

Компоненты Analog Devices

для построения беспроводных
сенсорных сетей SmartMesh IP

В статье приведена краткая информация о технологии SmartMesh IP и модулях для ее реализации, выпускаемых компанией Analog Devices и предназначенных для организации сенсорных сетей промышленных систем IoT, которые обеспечивают высокую достоверность передачи данных при работе в сложных условиях значительных радиопомех. Универсальность модулей и их технические характеристики позволяют создавать масштабируемые сенсорные сети с использованием модулей только двух типов.

Владимир Макаренко, к. т. н.
v.makarenko@vdm.ais.ua

По различным прогнозам, к 2020 году количество подключенных к Интернету устройств вырастет до 40–200 млрд. При этом около 10 млрд из них будет приходиться на телефоны и компьютеры, все остальное — на «умные» вещи, способные контролировать не только параметры окружающей среды и различных объектов, но и ход технологических процессов при производстве разных видов продукции, его подготовке и логистике: от холодильника до датчиков на сельскохозяйственных и промышленных предприятиях, элементах инфраструктуры, на транспорте и в других областях человеческой деятельности. Инвестиции в «Интернет вещей» (Internet of Things — IoT) достигнут \$6 трлн, причем основными пользователями станут правительства и корпорации.

Использование потенциала IoT для экономического и социального развития в ближайшие годы станет одной из основных задач. Именно поэтому многие производители электронных компонентов разрабатывают устройства, ориентированные на применение в системах IoT и IIoT (Industrial IoT).

Экономисты все чаще говорят, что мир стоит на пороге четвертой промышленной революции. Комбинирование технологий, в том числе применение недорогих датчиков, процессоров с низким энергопотреблением, постоянное масштабирование облачных сервисов, а также повсеместное внедрение беспроводных технологий связи позволили начать эту революцию.

Компания Analog Devices, являясь одним из ведущих производителей электронных компонентов, также выпускает комплекты микросхем и сертифицированных модулей для реализации систем IoT, включающих различные датчики, микроконтроллеры с низким энергопотреблением, модули для организации

беспроводных сенсорных сетей, способные работать в жестких условиях промышленного «Интернета вещей».

Изделия семейства SmartMesh для организации беспроводных сенсорных сетей представляют собой микросхемы и предварительно сертифицированные модули на основе печатных плат, поставляемые в комплекте с программным обеспечением для смешанных (mesh) сетей, которые позволяют датчикам передавать информацию в сложных условиях промышленного «Интернета вещей» [1]. Все продукты данного семейства соответствуют требованиям стандартов 6LoWPAN (стандарт взаимодействия по протоколу IPv6 в маломощных беспроводных персональных сетях стандарта IEEE 802.15.4 [2]), 802.15.4e (определяет физический слой и управление доступом к среде для беспроводных персональных сетей с низкой скоростью передачи информации [3]) и WirelessHART (IEC62591 [4]).

WirelessHART утвержден как международный стандарт IEC62591 и описывает технологию построения самоорганизующихся беспроводных сетей, в которых каждый прибор является ретранслятором данных от остальных приборов. Два ключевых компонента, обеспечивающих надежность беспроводных сетей, — это наличие нескольких независимых путей передачи информации для каждого прибора и автоматический выбор маршрута передачи. Сети WirelessHART могут быть задействованы как для управления, так и для мониторинга.

Стандарт WirelessHART, опубликованный в сентябре 2007 года, основан непосредственно на HART-протоколе, не связанном с физической средой передачи информации.

HART-протокол (Highway Addressable Remote Transducer — магистральный адресуемый удаленный преобразователь) является открытым стандартом на метод сетевого обмена, который

Требование	Проблема	Технология передачи данных			
		SmartMesh IP	ZigBee/Thread	Bluetooth Mesh	LoRa
Надежная связь в сетях с большим числом узлов	Узлы мешают друг другу, замедляя сеть	Эффективное распределение каналов исключает коллизии	Зависит от коллизий, которые замедляют работу сети		
Длительный срок службы батареи при установке датчиков в экранированных местах	Требует энергоэффективных соединений с граничными узлами для обеспечения длительного срока службы батареи	Узлы маршрутизации с питанием от батареи устанавливают соединения с близкими к граничным узлам	Линейные маршрутизаторы с линейным питанием устанавливают соединения с близкими к граничным узлам	Узлы маршрутизации с питанием от батареи устанавливают соединения с близкими к граничным узлам	Требуется большая мощность для связи с далеко расположенными граничными узлами
Надежное соединение в динамической промышленной среде	Движение оборудования или открытие/закрытие дверей вызывают многолучевые отражения	Использует переключение каналов, чтобы избежать потери связи	Ограничено одним каналом и приводит к выпадению узлов из сети	Использует переключение каналов, чтобы избежать потери связи	Работа в субгигагерцовом диапазоне и эффективное кодирование минимизируют потери от отражения
Надежная связь в перегруженных радиодиапазонах	Источники помех ограничивают пропускную способность сети	Скачкообразное переключение частоты каналов позволяет уменьшить влияние помех и поддерживать пропускную способность сети	Работа в одном канале и коллизии с другими узлами быстро ухудшают пропускную способность сети	Предназначен для небольших сетей и страдает от перегрузки сети	Разработана для низкоскоростной передачи данных, коллизии значительно снижают пропускную способность сети
Надежная передача сообщений в сетях большой протяженности	Узлы на периметре сети становятся труднодоступными	Использует несколько переходов для достижения конечных узлов			Конечные узлы потеряны, если находятся за пределами диапазона

Рис. 1. Сравнительные характеристики различных технологий построения беспроводных сенсорных сетей

содержит не только протокол взаимодействия устройств, но и требования к аппаратуре канала связи [5]. Он также содержит протокол обмена, проводной и беспроводной физические уровни. Проводной вариант предусматривает передачу цифровых данных и питания по двум проводам, сохраняя совместимость с аналоговыми датчиками стандарта токовая петля 4–20 мА.

Устройства HART работают в нелицензируемом диапазоне 2,4 ГГц, используемом в качестве среды передачи несколькими беспроводными технологиями, в том числе по беспроводной локальной сети.

Сходство между WirelessHART и HART позволяет беспроводным устройствам использовать существующую организацию производственного процесса, минимизирует количество изменений и расширяет возможности автоматизации процессов путем добавления беспроводных точек измерения и контроля для различных применений, включая техническое обслуживание, безопасность, охрану окружающей среды и др.

Основные характеристики системы связи, построенной по стандарту WirelessHART:

- диапазон частот для передачи информации: 2,4 ГГц;
- дальность связи: до 225 м;
- низкое потребление энергии;
- скорость передачи информации: до 250 кбит/с;
- соответствие стандарту HART.

Технология SmartMesh IP разработана компанией Linear Technology (на сегодня — Analog Devices) и ориентирована на создание надежных беспроводных сенсорных сетей, работающих в условиях сильных помех. Основные характеристики системы связи, построенной по технологии SmartMesh IP, практически совпадают с характеристиками системы, выполненной по стандарту WirelessHART. Отличие — в соответствии стандарту IEEE 802.15.4 (технология ZigBee).

Особенности и преимущества технологии SmartMesh IP иллюстрирует рис. 1.

Технология SmartMesh IP позволяет поддерживать топологии сети: «точка-точка», «звезда», «ячеистая» и «кластерная». IP-сеть SmartMesh состоит из беспроводных точек доступа (Motes у Linear Technology), которые собирают и ретранслируют данные, и сетевого менеджера, управляющего производительностью и безопасностью сети и обменивающегося данными с хост-приложением.

Типовая топология такой сети приведена на рис. 2. Точки доступа могут соединяться с сенсорами напрямую (рис. 3а) и через клиентский микроконтроллер (рис. 3б). При прямом соединении точки доступа с сенсором она должна содержать набор инструментальных средств разработки программного обеспечения (SDK).

Analog Devices выпускает четыре типа универсальных модулей для построения сетей SmartMesh IP

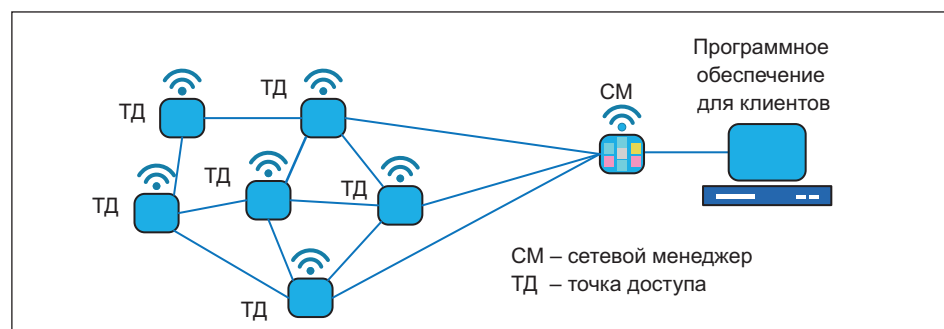


Рис. 2. Типовая топология сети SmartMesh

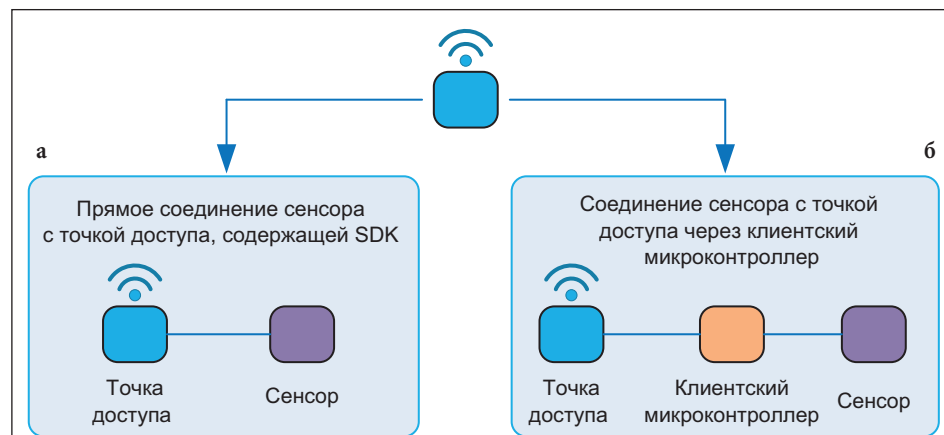


Рис. 3. Подключение точки доступа к сенсору напрямую (а) и через клиентский микроконтроллер (б)

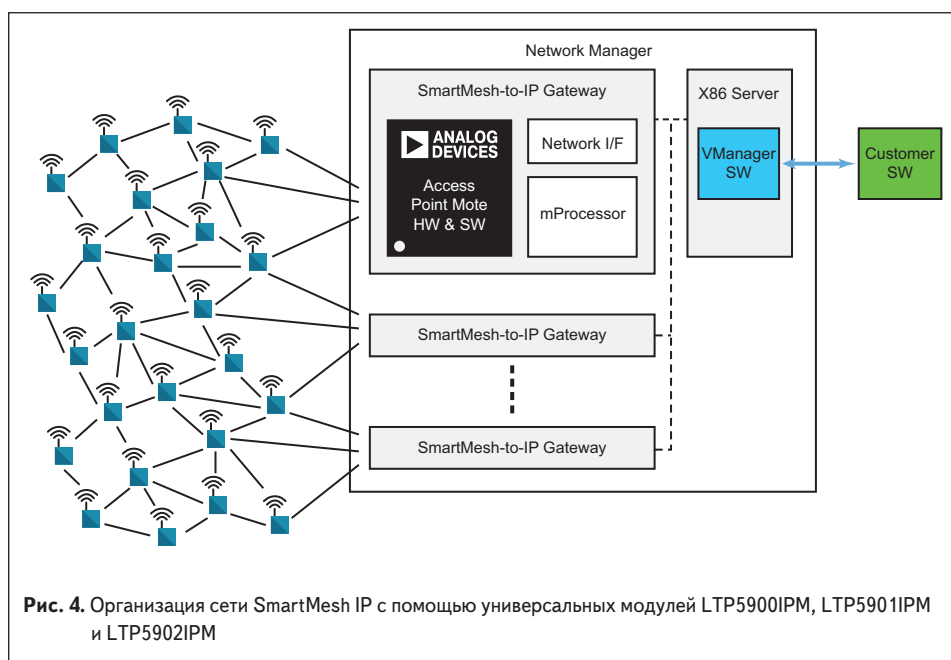


Рис. 4. Организация сети SmartMesh IP с помощью универсальных модулей LTP5900IPM, LTP5901IPM и LTP5902IPM

(табл. 1), четыре типа модулей сетевого менеджера и четыре типа модулей точек доступа для построения сетей WirelessHART (табл. 2).

В режиме сетевого менеджера модуль LTC5800-IPM поддерживает до 100 точек доступа на сеть, подключенную к одному шлюзу. Модули LTP5900IPM, LTP5901IPM и LTP5902IPM обеспечивают до 300 точек доступа на один шлюз и позволяют объединять до 165 шлюзов в одну сеть (рис. 4).

Кратко рассмотрим основные характеристики универсального модуля LTP5902IPM [6, 7], чей внешний вид представлен на рис. 5.

Основные характеристики модуля:

- наличие приемопередатчика, встроенного процессора и сетевого программного обеспечения для формирования самовосстанавливающейся ячеистой сети SmartMesh;
- синхронизация с сетью;
- скачкообразная перестройка частоты передатчика;
- высокая надежность ($H > 99,999\%$ в самых тяжелых условиях радиобстановки);
- возможность реализации различных топологий сети;
- оптимизация энергопотребления;

Таблица 1. Универсальные модули для построения сетей SmartMesh IP

Тип	Режим работы	Примечания
LTP5902IPM	Точка доступа SmartMesh IP, сетевой менеджер, точка доступа	Разъем MMCX для подключения антенны
LTP5901IPM		Встроенная антенна
LTP5900IPM		Разъем MMCX для подключения антенны
LTC5800IPM		ИМС, корпус QFN72, 1×10 мм

Таблица 2. Универсальные модули для построения сетей WirelessHART

Тип	Функциональное назначение	Количество поддерживаемых точек доступа	Примечания
LTP5903IPCWHR	Сетевой менеджер	500	Разъем MMCX для подключения антенны
LTP5903IPCWHRB		250	
LTP5903CENWHR		500	2dBi-диполь
LTP5903CENWHRB		250	
LTP5902WHM	Точка доступа	-	Разъем MMCX для подключения антенны
LTP5901WHM		-	Встроенная антенна
LTP5900WHM		-	Разъем MMCX для подключения антенны
LTC5800WHM		-	ИМС, корпус QFN72, 10×10 мм

Таблица 3. Значение тока потребления модуля LTP5902IPM в различных режимах работы

Режим работы	Ток потребления	Примечания
Глубокий сон (Deep Sleep)	0,8 мкА	Все узлы модуля находятся в спящем режиме
Спящий режим (Doze)	1,2 мкА	Активен только узел формирования сигнала 32,768 кГц
Пиковое потребление тока	30 мА	Тактовая частота 14,7 МГц, режим передачи, запись во Flash-память, мощность излучения +8 дБм (макс.), длительность 4,33 мс
Режим передачи	5,4/9,7 мА	Мощность излучения 0/+8 дБм
Режим приема	4,5 мА	Тактовая частота 7,3728 МГц

- безопасность, сертифицированная NIST;
- соответствие 6LoWPAN Internet Protocol (IP) и IEEE 802.15.4e;
- ток потребления в режиме приема: не более 4,5 мА; в режиме передачи: 9,7 мА при излучаемой мощности 8 дБм;
- сертифицирован в США, Канаде, ЕС, Японии, Тайване, Корее, Индии, Австралии и Новой Зеландии;
- печатная плата с чип-антенной (LTP5901IPM) или с разъемом антенны MMCX (LTP5902IPM);
- наличие набора для разработки программного обеспечения;
- диапазон рабочих температур: $-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- габаритные размеры: 24×37 мм.

Благодаря возможности синхронизации все точки доступа в сети могут работать как маршрутизаторы или как источники данных. Малое энергопотребление позволяет обеспечить непрерывное функционирование модуля в течение нескольких лет без замены батареи питания. Модули легко настраиваются и программируются с помощью специализированного программного обеспечения.

Время, необходимое для синхронизации устройства в сети, не превышает 1 мс. При возникновении значительных радиопомех осуществляется повторная передача информации по другому пути и на другой частоте.

Сеть будет формироваться после того, как сетевой менеджер начнет отправку пакетов, содержащих информацию для синхронизации с сетью. Постоянный процесс опроса состояния сети гарантирует, что будут найдены пути передачи информации при значительных радиопомехах.

Кроме того, в сети отслеживается каждый канал, оценивается его производительность и ведется статистика (качество используемых путей, списки потенциальных путей и др.). Периодически каждая точка доступа отправляет эту информацию сетевому менеджеру в пакетах, называемых отчетами о состоянии здоровья (healthreports).

Использование режима планирования времени передачи информации позволяет устройствам находиться в спящем режиме между сеансами передачи. Программное обеспечение сетевого менеджера формирует это расписание автоматически. Интервал времени активной работы точки доступа составляет менее 1% от длительности полного цикла. А поскольку энергопотребление в спящем режиме намного меньше, чем в активном



Рис. 5. Внешний вид универсального модуля LTP5902IPM

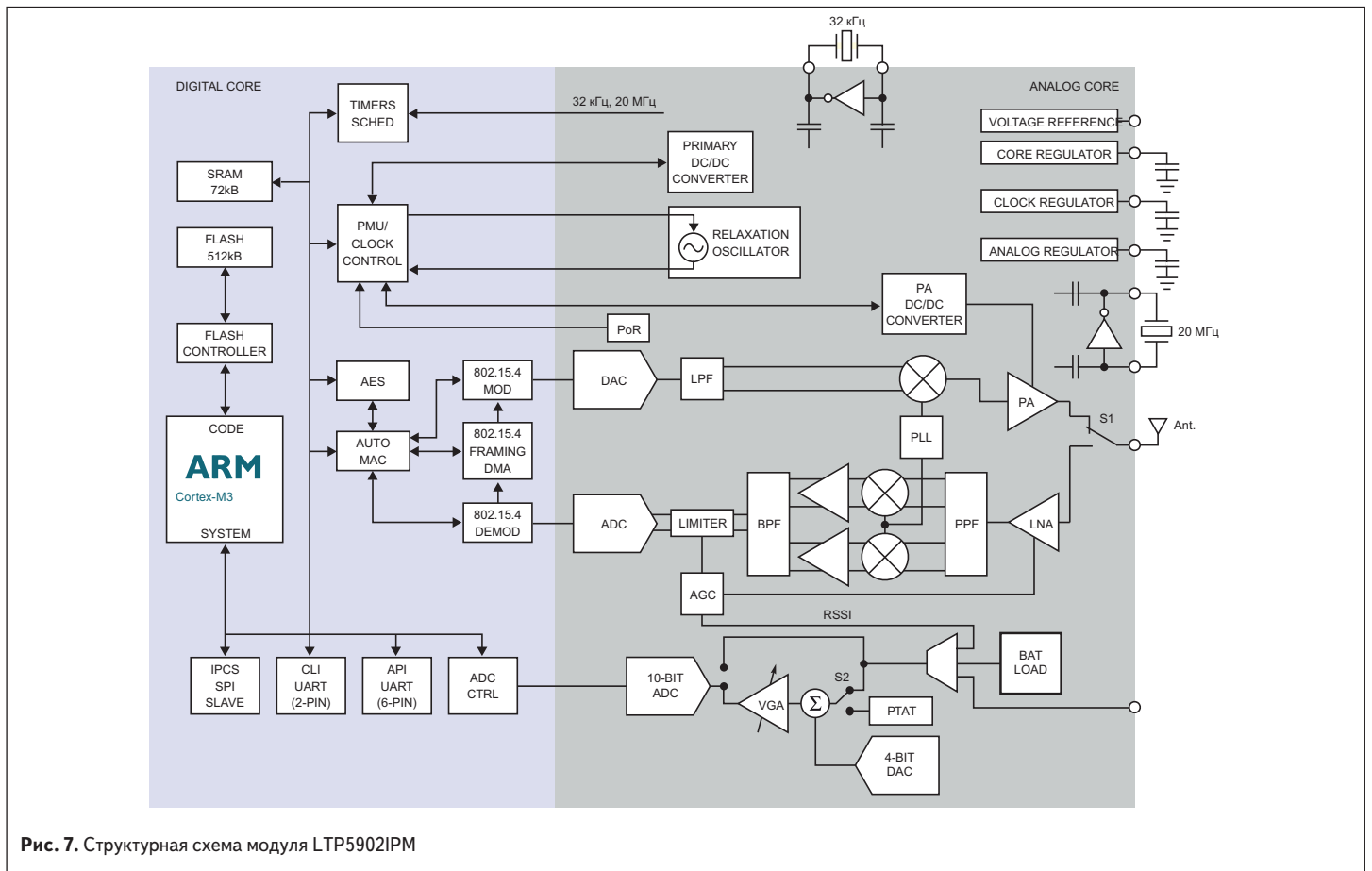
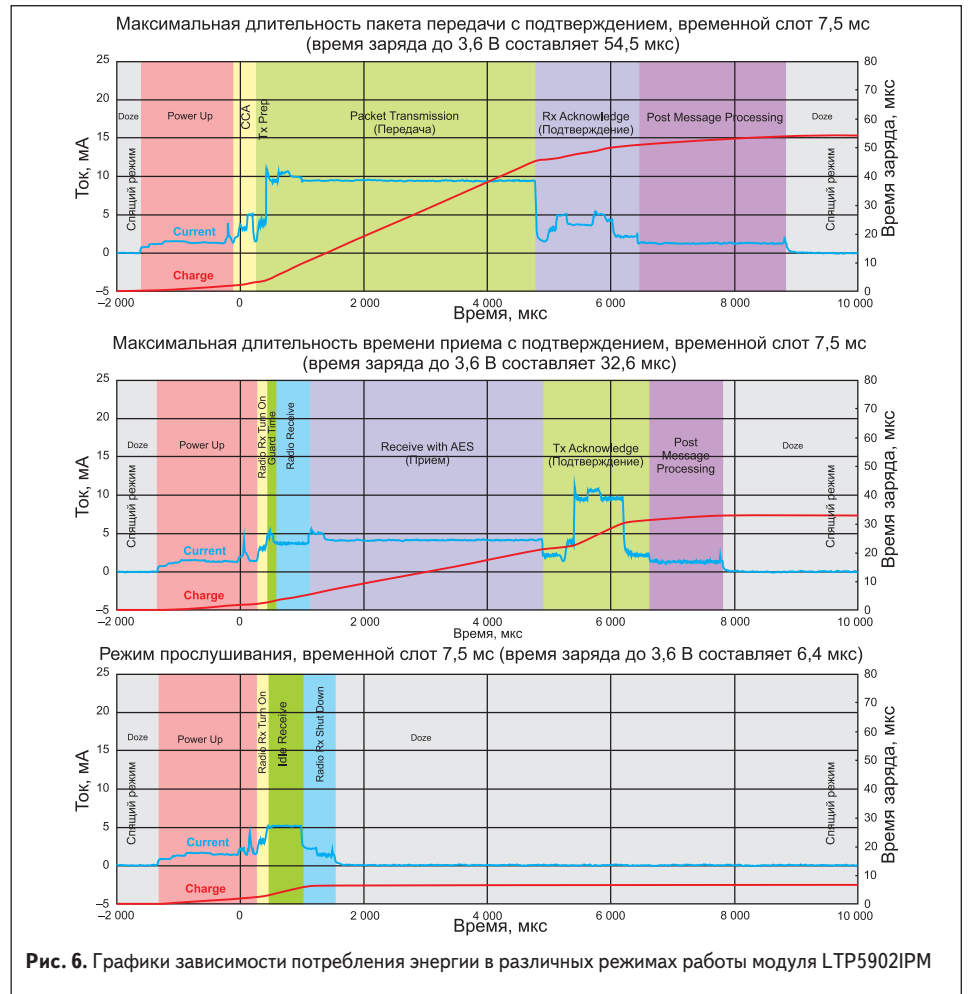
режиме, таким образом обеспечивается высокая энергоэффективность устройства.

Это хорошо иллюстрируют графики энергопотребления модуля LTP5902-IPM в различных режимах работы, приведенные на рис. 6. Энергопотребление в различных режимах работы (передача, прием, прослушивание) может быть охарактеризовано либо зарядом, либо энергией [6]. В Data Sheet модуля LTP5902IPM для оценки общего энергопотребления в различных режимах работы используется время заряда некоторого конденсатора (красные графики на рис. 5). Например, в режиме передачи весь цикл состоит из нескольких временных отрезков: времени пробуждения модуля; времени подготовки отправки сообщения; времени, необходимого для передачи сообщения; времени, отведенного для получения подтверждения о верном (или неверном) приеме сообщения; времени для последующей (после получения подтверждения) обработки результатов. Каждый из этих периодов характеризуется различным током потребления, а кривая заряда конденсатора является интегральной оценкой энергопотребления.

Больше всего времени модуль проводит в режиме ожидания, в котором, в свою очередь, спящий режим занимает свыше 80% времени.

Для оценки энергопотребления модуля LTP5902IPM в таблице 3 приведены значения потребляемого тока в различных режимах работы. Из приведенных данных следует, что 99% времени ток потребления модуля составляет примерно 1 мкА, что и обеспечивает значительный срок службы в автономном режиме без замены батареи питания.

Структурная схема модуля приведена на рис. 7.



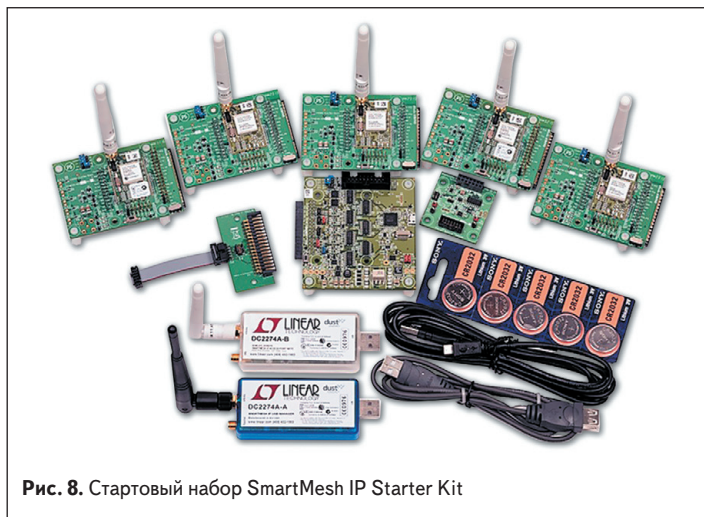


Рис. 8. Стартовый набор SmartMesh IP Starter Kit

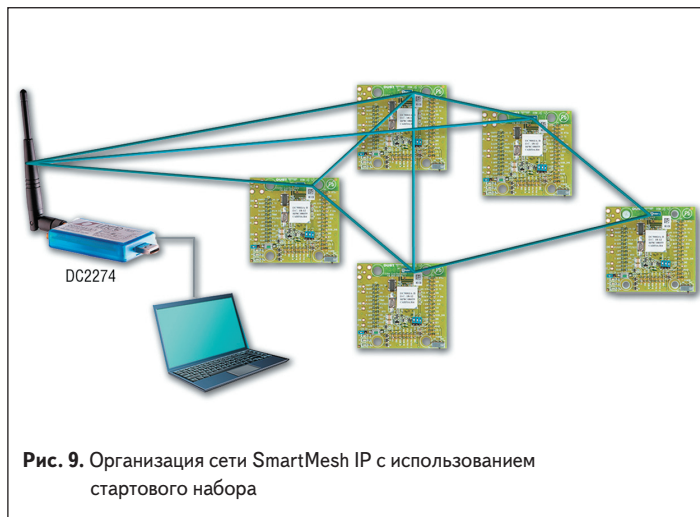


Рис. 9. Организация сети SmartMesh IP с использованием стартового набора

Модуль LTP5902IPM условно можно разделить на две части:

1. Цифровую, включающую процессор, Flash-память объемом 512 кбайт, контролер Flash-памяти, статическое ОЗУ объемом 72 кбайт, систему контроля тактовой частоты, цифровые модулятор и демодулятор.
2. Аналоговую, включающую:
 - в канале передачи — ЦАП, ФНЧ, смеситель, усилитель мощности (PA) и DC/DC-преобразователь;
 - в канале приема — малошумящий усилитель (LNA), два полосовых фильтра, квадратурный смеситель, ограничитель и АЦП;
 - синтезатор на основе системы ФАПЧ;
 - компоненты для ввода аналогового сигнала — усилитель, управляемый напряжением (VGA), 4-разрядный ЦАП и 10-разрядный АЦП.

Для управления и связи с внешними устройствами модуль LTP5902IPM содержит интерфейсы:

- UART;
- GPIO;
- SPI Master;
- I²C Master;
- 1Wire Master.

Подробное описание модуля, режимов его работы и особенностей программирования можно найти в [6, 7].

Компания Analog Devices предлагает стартовый набор SmartMesh IP Starter Kit [8], который содержит (рис. 8):

- один сетевой менеджер с интерфейсом USB (DC2274AA);
- один USB-модем (DC2274AB);
- пять точек доступа (DC9018BB);
- одну интерфейсную плату Eterna (DC9006A), которая включает плату адаптера DC9004;
- один адаптер Eterna QuickEval (DC9005A);
- дополнительные батареи CR2032;
- кабели USB.

С помощью данного набора удастся быстро создать небольшую сеть (рис. 9) и оценить ее возможности в условиях, близких к рабочим. Графический интерфейс пользователя программного обеспечения оценки StarGazer (GUI) помогает быстро увидеть структуру сети, статистику производительности, оценить достоверность передачи данных и задержку ожидания отклика (латентность).

Для оценки производительности сети компания Analog Devices предлагает программу SmartMesh Power and Performance Estimator [9], которая позволяет вводить различные конфигурации сети, размеры и скорости передачи отчетов данных, увидеть оценочную производительность сети, среднее потребление энергии, задержку, время формирования сети и другие параметры.

Более подробная информация о модулях, стартовом наборе и программном обеспечении представлена в [1–9] и на сайте компании Analog Devices. ■

Литература

1. www.analog.com/en/products/rf/microwave/wireless-sensor-networks/smartmeship.html
2. Олссон Д. Раскрываем тайны 6LoWPAN // Новости электроники. 2015. № 11.
3. www.eece.colorado.edu/~liue/teaching/comm_standards/2015S_zigbee/802.15.42011.pdf
4. www.picxxx.info/pml.php?action=GETCONTENT&md5=f29dacf185ffbf54b292d486473628df
5. www.bookasutp.ru/Chapter2_5.aspx
6. www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/59012ipmfa.pdf
7. www.analog.com/media/en/technical-documentation/userguides/SmartMesh_IP_User_s_Guide.pdf
8. www.analog.com/en/designcenter/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/dc9021b.html
9. www.analog.com/media/en/simulation-models/software-and-simulation/smartmesh_power_and_performance_estimator.xls