

# БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ MeshLogic™

Сергей Баскаков, Владимир Оганов, ООО «Высокотехнологичные системы»

**В статье рассмотрены основные варианты практической реализации беспроводных сенсорных сетей на базе современных коммерчески доступных технологий и представлена новая аппаратно-программная платформа MeshLogic™ для разработки систем данного класса. Приведен краткий сравнительный анализ платформы MeshLogic™ с решениями на базе стандарта ZigBee™.**

## ВВЕДЕНИЕ

Современные успехи в области MEMS-технологий, беспроводной связи и цифровой электроники сделали возможным создание дешевых, низкопотребляющих и многофункциональных устройств, имеющих малые габариты и способных передавать данные по радиоканалу на короткие расстояния. Как правило, каждое такое устройство обладает набором датчиков, микропроцессором и радиочастотным приемопередатчиком, что позволяет реализовать различные протоколы сетевого взаимодействия между множеством аналогичных устройств — создавать так называемые беспроводные сенсорные сети (БСС).

Устоявшийся термин «беспроводная сенсорная сеть» обозначает новый класс беспроводных систем, которые представляют собой распределенную, самоорганизующуюся и устойчивую к отказу отдельных элементов сеть миниатюрных электронных устройств с автономным источником питания. Узлы такой сети способны ретранслировать сообщения по цепи, обеспечивая значительную площадь покрытия системы при малой мощности передатчиков и, следовательно, существенной экономии энергии.

Основными особенностями и преимуществами БСС являются:

- низкая стоимость и малые габариты узла;
- высокая энергетическая эффективность — срок эксплуатации может достигать нескольких лет;
- большие масштабы сетей (от десятков до тысяч устройств) с плотным размещением узлов в пространстве;
- высокие надежность и отказоустойчивость системы достигаются коммуникационной избыточностью — наличием множества альтернативных маршрутов доставки данных;
- устойчивость к изменениям топологии сети и характеристик среды распространения радиоволн;

- самонастройка и самовосстановление сети;

- способность узлов совместно обрабатывать полученные данные и принимать решения на базе распределенных алгоритмов;

- ограниченные коммуникационные, вычислительные и энергетические ресурсы узла.

Исследования в области БСС начались в конце 1990-х гг. и активно продолжаются в настоящее время во многих учебных и научных центрах по всему миру. По результатам нескольких исследовательских проектов были созданы коммерческие компании для продвижения технологий беспроводных сенсорных сетей на рынок.

До недавнего времени в сфере коммерческого использования БСС существовали только закрытые платформы, функционирующие по проприетарным (патентованным) протоколам и алгоритмам. В качестве примера можно привести следующие платформы:

- SmartMesh от Dust Networks;
- EmberNet от Ember;
- MeshScape от Millennial Net;
- SensiNet от Sensicast.

В конце 2004 г. был ратифицирован единственный на данный момент стандарт в области беспроводных сенсорных сетей — стандарт ZigBee, основанный на принятом ранее стандарте IEEE 802.15.4, который описывает физический уровень и уровень доступа к среде для беспроводных персональных сетей WPAN.

Очевидно, что использование стандартизированной технологии имеет множество преимуществ (например, уменьшение стоимости элементной базы и сокращение сроков выхода готового изделия на рынок), поэтому технология ZigBee выглядит достаточно востребованной.

Однако стандарт ZigBee в силу своей универсальности не является

оптимальным для многих прикладных задач БСС: в некоторых приложениях он избыточен, а в других — не обеспечивает необходимую функциональность. Кроме того, пока рано говорить о полной взаимозаменяемости и совместимости ZigBee-продуктов от различных производителей, т.к. ZigBee Alliance еще не выработал должное количество профилей приложений, следовательно, на данный момент времени на прикладном уровне ZigBee-сети не намного отличаются от проприетарных решений.

## ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

При возникновении задачи, требующей применения технологий БСС, разработчики имеют несколько вариантов решения проблемы.

Первый вариант — построение собственной системы на основе стандарта ZigBee. Сегодня доступно достаточно большое количество различных ZigBee-продуктов, начиная от микросхем приемопередатчиков стандарта IEEE 802.15.4 и заканчивая готовыми OEM-модулями со встроенным программным обеспечением сетевого стека ZigBee. Достоинства данного подхода — относительная простота и малые сроки получения работоспособного решения. Недостаток — необходимость в затрате времени и ресурсов как на детальное изучение самого стандарта ZigBee, так и на освоение реализации этой технологии в выбранном продукте, т.к. требуется глубокое понимание заложенных в ZigBee механизмов для построения эффективных ZigBee-сетей в реальных условиях эксплуатации. Ускорить процесс освоения можно с помощью отладочных средств, которые имеются практически у всех производителей ZigBee-продуктов, однако стоимость таких наборов разработчика является весьма высокой. Кроме того, при решении поставленной задачи разработчик ограничен рамками самого стандарта, поэтому не всегда возможно получить «элегантное» решение, а любое отступление от спецификации автоматически лишит систему совместимости — основного достоинства ZigBee.

Другим вариантом является применение одной из доступных проприетарных платформ (например, от Senciscast, Millennial Net или Dust Networks). В некоторых из них используются собственные приемопередатчики, а другие основаны на стандарте IEEE 802.15.4. Сетевой стек проприетарных платформ реализован на базе патентованных алгоритмов и протоколов, которые обеспечивают ряд преимуществ по сравнению с ZigBee, но ценой несовместимости с решениями от других производителей. Как правило, подобная продукция представляет собой набор аппаратных модулей с различной функциональностью, встроенного ПО узлов и ПО персонального компьютера для наладки и управления сетью. Недостатком этого подхода является закрытость проприетарной платформы и отсутствие возможности внесения изменений в логику сетевого взаимодействия для более точного удовлетворения требований конкретного приложения. Следовательно, подобные платформы подходят для интеграции в более крупную систему в качестве единого целого без какой-либо модификации.

Можно также попытаться самостоятельно разработать набор сетевых протоколов и реализовать их на собственной аппаратной базе. Таким образом может быть получено решение, наиболее точно соответствующее прикладной задаче, но временные и финансовые затраты на разработку могут быть слишком велики, т.к. для этого требуются серьезные знания в области беспроводных сенсорных сетей, имеющих массу особенностей и отличий от традиционных систем передачи данных. Следует также отметить, что отладка сети всего из нескольких беспроводных узлов уже является достаточно нетривиальной задачей и требует высокой квалификации разработчика.

Таким образом, на данный момент времени существующие коммерческие решения в области БСС не отличаются гибкостью, которая необходима для получения эффективной сети в конкретном приложении, а также сложны в освоении неспециалистами в данной области. В итоге повышаются стоимость и сроки разработки системы.

Именно поэтому было принято решение о создании аппаратно-программной платформы MeshLogic для реализации беспроводных сенсорных сетей в различных областях применения. Платформа не является готовым продуктом (изделием), который предоставляется конечному потребителю, т.к. предполагается ее исполь-

зование в качестве базы для создания различных беспроводных систем под конкретные требования заказчика и с учетом специфики прикладной задачи. Кроме того, платформа может использоваться как инструмент для проведения исследований по разработке новых алгоритмов и протоколов в области БСС.

При разработке платформы MeshLogic ставилась задача использовать наиболее современные достижения в области БСС, а также учитывать достоинства и недостатки существующих коммерческих решений, в том числе стандарта ZigBee.

Естественно, возникает резонный вопрос об отличиях платформы MeshLogic от других существующих решений, поэтому ниже приведен краткий сравнительный анализ платформы MeshLogic со стандартом ZigBee. Сравнение с другими коммерческими платформами затруднительно в силу отсутствия их подробного описания.

### СПРАВНЕНИЕ MeshLogic И ZigBee

Рассмотрим основные характеристики стандарта ZigBee и платформы MeshLogic в различных аспектах, описав отличие этих технологий.

#### Физический уровень

В ZigBee физический уровень и уровень доступа к среде соответствуют стандарту IEEE 802.15.4, в котором определены для использования следующие нелицензируемые частотные диапазоны: 868...868,6 МГц, 902...928 МГц и 2405...2483,5 МГц. Как и следовало ожидать, наибольшая часть производимых устройств работает в диапазоне 2,4 ГГц, поэтому будем рассматривать только эту область частот.

В IEEE 802.15.4 диапазон 2,4...2,4835 ГГц разделен на 16 каналов шириной 2 МГц с шагом 5 МГц. Используются квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом (O-QPSK) и расширение спектра методом прямой последовательности 16 фиксированными квазиортогональными 32-рядными кодами. В результате техническая скорость передачи данных в ZigBee составляет 250 Кбит/с при коэффициенте расширения спектра (processing gain), равном 9 дБ.

Текущая реализация беспроводного узла MeshLogic построена на основе приемопередатчиков Cypress WirelessUSB™, которые также работают в диапазоне 2,4...2,4835 ГГц с разбиением на 78 каналов (с учетом необходимого разнесения 39 кана-

лов) шириной 1 МГц. В WirelessUSB применяются гауссова частотная манипуляция и расширение спектра ортогональными последовательностями Голда длиной 32 или 64 элементарных символа. Приемопередатчики WirelessUSB позволяют изменять расширяющие коды, поэтому возможна также организация множественного доступа с кодовым разделением. В зависимости от выбранного режима работы скорость передачи данных может быть 15625 бит/с, 31250 бит/с или 62500 бит/с, при этом коэффициент расширения спектра составляет 18, 15 и 12 дБ соответственно.

Таким образом, ZigBee и MeshLogic функционируют в общедоступном нелицензируемом диапазоне частот 2,4...2,4835 ГГц, при этом в ZigBee скорость передачи данных выше, но физический уровень платформы MeshLogic обладает большей устойчивостью к помехам. Кроме того, для типовых приложений БСС скорость передачи данных не является критичным параметром, в то время как потери пакетов оказывают непосредственное влияние на качество обслуживания сети и энергопотребление узлов.

Следует отметить, что принципиально платформа MeshLogic позволяет использовать на физическом уровне и другие приемопередатчики, аналогичные Cypress WirelessUSB, в том числе соответствующие стандарту IEEE 802.15.4.

#### Устойчивость к соканальной интерференции

Учитывая рост количества беспроводных систем в нелицензируемом диапазоне частот 2,4...2,4835 ГГц, БСС должна обладать механизмами повышения устойчивости к соканальной интерференции.

Например, в офисном здании велика вероятность появления одной или нескольких сетей стандарта IEEE 802.11b/g, которые могут быть серьезной помехой для сети ZigBee или MeshLogic. Как правило, в ZigBee и MeshLogic мощность полезного сигнала составляет примерно 1 мВт при ширине полосы 2 МГц и 1 МГц соответственно, в то время как в IEEE 802.11b/g мощность может быть до 100 мВт с шириной полосы 22 МГц по уровню ослабления 30 дБ.

При создании ZigBee-сети необходимо выбрать один из 16 каналов в свободном от других систем частотном диапазоне. Однако в процессе эксплуатации может появиться источник внутрисполосных помех, из-за которого часть сети выйдет из строя,

поэтому потребуется снова «вручную» задать новый активный канал, причем для всей сети. Следовательно, усложняется обслуживание системы.

Рассмотрим для примера следующую ситуацию. В крупном здании существует несколько Wi-Fi-сетей, настроенных на частотные каналы так, что весь диапазон 2,4...2,4835 ГГц ими перекрыт (см. рис. 1). Следовательно, все 16 каналов стандарта IEEE 802.15.4 будут попадать в область одной или нескольких Wi-Fi-сетей, поэтому в данных условиях фактически невозможна нормальная работа распределенной по всему зданию ZigBee-сети, т.к. часть устройств не будет функционировать из-за воздействия близрасположенной сети IEEE 802.11b/g.

Для решения подобных проблем в платформе MeshLogic реализован механизм динамического выделения каналов: в зависимости от локальной помеховой обстановки выбирается свободный частотный диапазон, при этом различные участки сети могут работать на разных каналах.

Первоначально во всей сети MeshLogic используется канал, выбранный на этапе инсталляции системы. При достаточно большой и распределенной в пространстве беспроводной сети область воздействия появившейся в некоторый момент времени помехи на данной частоте покрывает только часть узлов, которые после падения качества связи ниже порогового уровня перейдут на новую частоту в соответствии с алгоритмом динамического выделения каналов. Отметим, что смену канала выполняют только те узлы, для которых это действительно необходимо, остальная же часть сети продолжает функционировать на прежнем канале. Естественно, связность всей сети сохраняется.

Очевидно, данный механизм позволяет эксплуатировать сеть MeshLogic в описанной выше ситуации, т.к. различные участки сети будут использовать те или иные частотные каналы, выбранные в зависимости от соседствующей Wi-Fi-сети (см. рис. 2).

Все описанные действия выполняются автоматически и не требуют вмешательства обслуживающего персонала.

### Топология сети

Обе технологии поддерживают простейшие топологии «точка-точка» и «звезда», разница заключается в реализации многоячейкового принципа построения сети, а также в ZigBee возможна топология «кластерное дерево».

В ZigBee устройства делятся на 3 класса:

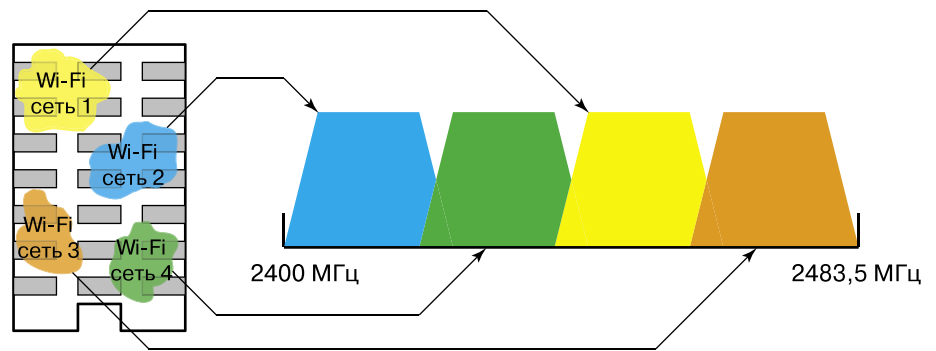


Рис. 1. Множество Wi-Fi-сетей внутри здания

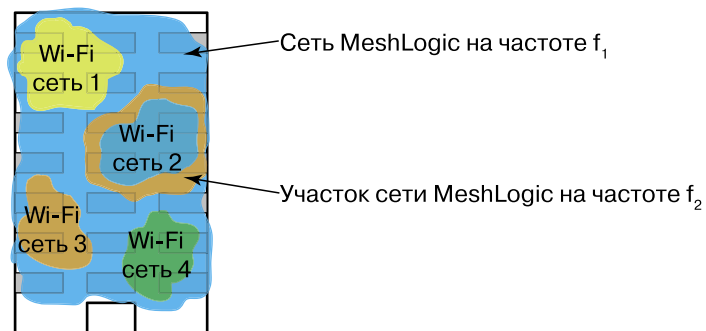


Рис. 2. Совместная работа Wi-Fi-сетей и сети MeshLogic

- координатор – в сети присутствует только один PAN-координатор, который управляет процессом создания сети и задает параметры режимов работы всех остальных узлов;

- маршрутизатор – способен ретранслировать сообщения и поддерживает все топологии сети, может выполнять функции координатора кластера;

- оконечное устройство – простейший узел, который неспособен выполнять маршрутизацию и поддерживает только топологии «точка-точка» и «звезда».

Очевидно, что в зависимости от функционального типа устройства предъявляются различные требования к аппаратным и энергетическим ресурсам узла.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют топологии «кластерное дерево» и «многоячейковая сеть».

Топология «кластерное дерево» по сути является множеством сетей типа «звезда», в вершинах которых находятся узлы-маршрутизаторы в роли координатора кластера. Процесс организации такой сети начинается с PAN-координатора, который создает кластер уровня 0, далее выбирается маршрутизатор для координации работы кластера уровня 1 и т.д. В результате возможно получение большой области покрытия сети ценой увеличения латентности. Маршруты однозначно связаны со структурой

«дерева» сети, поэтому путь доставки данных может сильно отличаться от оптимального. Кроме того, сети этого типа имеют низкую устойчивость к изменениям в топологии (см. ниже).

Поддержка топологии «многоячейковая сеть» является одной из основных особенностей беспроводных сенсорных сетей как класса систем передачи данных, в этом случае обеспечиваются устойчивость к отказу отдельных узлов сети и адаптация к изменениям условий окружения.

Формально в ZigBee возможно создание «многоячейковой сети», если все устройства будут маршрутизаторами, но стандарт не содержит в явном виде механизмов создания сетей данного вида. Согласно черновому варианту, в новой версии стандарта IEEE 802.15.4b должна быть базовая поддержка одноранговых многоячейковых сетей, при этом управление «эстафетной» маршрутизацией должно быть реализовано верхними уровнями стека, что планируется сделать в ZigBee версии 1.1.

Итак, в общем случае ZigBee-сеть имеет вид «кластерного дерева» (см. рис. 3).

В платформе MeshLogic все устройства сети равноправны и обладают одинаковой функциональностью, отличия между ними определяются только прикладным уровнем. Топология «многоячейковая сеть» является основной для MeshLogic, т.к. платформа проектировалась для создания

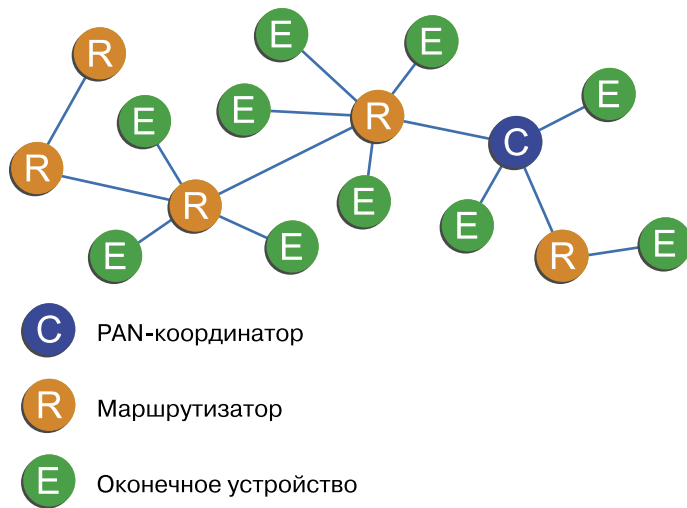


Рис. 3. Типовая топология сети ZigBee

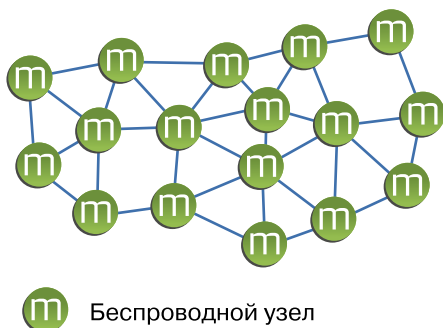


Рис. 4. Типовая топология сети MeshLogic

сетей именно этого типа. Доставка пакетов возможна от любого узла сети к любому другому — типовая система MeshLogic представляет собой одноранговую многоячеювую сеть (рис. 4), в которой все узлы способны ретранслировать пакеты в процессе доставки.

**Механизм формирования сети**

ZigBee и MeshLogic являются самоорганизующимися сетями, что значительно облегчает установку системы, т.к. узлы способны самостоятельно определять и корректировать маршруты доставки данных.

Однако ZigBee требует планирования размещения устройств различного типа на этапе проектирования системы. Считается, что в ZigBee-сети большинство узлов является конечными устройствами, которые неспособны ретранслировать сообщения, поэтому в радиусе действия каждого оконечного устройства должен быть хотя бы один узел-маршрутизатор. Следовательно, необходимо заранее оценить оптимальное взаимное расположение устройств различного класса, чтобы обеспечить приемлемое соотношение цена/производительность сети. В результате увеличива-

ются сложность проектирования и монтажа системы и, как следствие, стоимость.

Платформа MeshLogic не требует подобного рода действий, т.к. все узлы одинаковы и могут выступать в роли маршрутизаторов. При размещении устройств необходимо руководствоваться только специфической прикладной задачей и условиями распространения радиоволн в конкретных условиях эксплуатации. Следовательно, затраты ресурсов на установку системы минимальны.

**Устойчивость к изменениям в топологии сети**

В процессе эксплуатации возможны изменения в топологии сети по различным причинам, например:

- появление (добавление нового), исчезновение (из-за неисправности или отключения для технического обслуживания) и перемещение узлов;
- изменение препятствий прохождения сигналов;
- включение и отключение источников помех и т.д.

Поэтому БСС должна обладать механизмами уменьшения последствий изменения локальной коммуникационной обстановки.

В ZigBee маршрутизация пакетов основана на 2 принципах:

- реактивная маршрутизация (по требованию, on-demand);
- маршрутизация «по дереву».

В реактивных алгоритмах маршруты создаются динамически по запросу узла-отправителя, который перед началом передачи данных инициирует процесс обнаружения маршрута до узла-получателя. После этого информация о маршруте поддерживается в актуальном состоянии до тех пор, пока есть необходимость в дан-

ном маршруте. В случае «разрыва» пути доставки пакетов на каком-либо промежуточном участке выполняется процесс восстановления маршрута. Поэтому в сетях ZigBee могут иметь место значительные затраты ресурсов (пропускная способность, энергия) на формирование и восстановление маршрутов при высокой вероятности изменения топологии сети. При этом ситуация будет усугубляться с увеличением масштабов сети и длины маршрутов.

Маршрутизация второго типа применяется при топологии сети «кластерное дерево». В этом случае при инициализации сети каждому узлу специальным образом назначается адрес в зависимости от его принадлежности к тому или иному кластеру. В результате адрес узла содержит информацию, необходимую для принятия решения при выборе следующего узла в цепи передачи пакета. Алгоритм позволяет достаточно просто реализовать маршрутизацию пакетов, но из-за жесткой привязки адресации узлов к иерархической структуре топологии возможны проблемы. Например, при нарушении связности головного узла кластера все подчиненные узлы вынуждены заново инициировать процесс присоединения к сети и получать новые «короткие» адреса. Естественно, накладные расходы на подобные операции могут оказать существенное влияние на характеристики системы.

В MeshLogic используется абсолютная адресация узлов без привязки к текущему положению. При принятии решения протокол маршрутизации оперирует только информацией о ближайшем сетевом окружении узла, т.е. платформа обладает свойством масштабируемости. Оптимальный маршрут доставки данных определяется по мере передачи пакета по сети, в том числе в обход вышедших из строя узлов. В результате достигается устойчивость к изменениям в топологии сети и повышается надежность доставки данных.

**Энергопотребление**

Одна из ключевых особенностей БСС заключается в энергетической эффективности. В большинстве случаев минимальное энергопотребление является более приоритетным критерием, чем пропускная способность, латентность, равномерность предоставления доступа к среде и т.п. В этом заключается основная специфика сетевых протоколов для БСС.

В ZigBee наименьшее энергопотребление достигается при синхрони-



зированном (beacon mode) доступе к среде, который позволяет переводить в «спящий» режим как оконечные устройства, так и маршрутизаторы. Однако на практике достаточно трудно настроить расписание доступа к среде при сложной топологии сети или при неравномерной скорости генерации трафика. Более простым является множественный доступ к среде по алгоритму CSMA/CA, но при этом координаторы должны постоянно находиться в режиме прослушивания канала, поэтому маршрутизаторам требуется стационарная сеть питания. Следовательно, можно ожидать, что во многих практических задачах только оконечные устройства будут работать на автономном источнике питания (батарея), а маршрутизаторы и PAN-координатор — от сети питания.

В платформе MeshLogic все узлы способны работать от автономного источника питания, при этом не требуется какая-либо настройка режимов доступа к среде. Разработанный MAC-протокол динамически выбирает оптимальный с точки зрения энергопотребления режим работы каждого узла в зависимости от его текущей сетевой нагрузки. Система самостоятельно адаптируется под изменяющиеся требования прикладного уровня, что необходимо, например, в сетях с переменным периодом формирования пакетов данных.

### Требования к аппаратным ресурсам

Стремление минимизировать энергопотребление и габариты устройств накладывает ограничения на аппаратное обеспечение беспроводного узла. Как правило, в подобных устройствах применяются 8- или 16-разрядные низкопотребляющие микроконтроллеры, которые не отличаются вычислительными возможностями и большими объемами памяти. Следовательно, сетевые протоколы должны предъявлять минимальные требования к аппаратным ресурсам узла.

Считается, что реализация ZigBee-стека может занимать от 4 до 32 Кбайт флэш-памяти в зависимости от функционального типа устройства.

Очевидно, что размер стека оказывает влияние на величину доступных прикладному уровню ресурсов микроконтроллера, поэтому многие современные ZigBee-платформы предполагают двухпроцессорную реализацию узла, в которой один микроконтроллер занимается выполнением сетевых функций, а второй — решением прикладных задач. В результате увеличиваются энергопотребление, стоимость и габариты.

В платформе MeshLogic требования к аппаратным ресурсам всех узлов одинаковые и для текущей реализации составляют около 12 Кбайт памяти программ и 2 Кбайт ОЗУ. Следовательно, в большинстве случаев будет достаточно одного микроконтроллера в составе узла.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены различные варианты реализации беспроводных сенсорных сетей на базе коммерчески доступных технологий, а также представлена новая платформа MeshLogic для создания систем данного класса.

Конечно, не существует оптимального решения для всех возможных задач, поэтому необходимо детально рассматривать особенности приложения и выбирать наиболее подходящую технологию.

Краткий сравнительный анализ платформы MeshLogic с решениями на базе ZigBee показал, что MeshLogic имеет ряд преимуществ, что делает ее использование более целесообразным в приложениях, в которых:

- топология сети заранее неизвестна или может изменяться в процессе функционирования;
- направления потоков данных в сети произвольные, возможно изменение источников и потребителей информации;
- требования к аппаратным ресурсам всех узлов должны быть одинаковые и ниже, чем для полнофункциональных ZigBee-устройств;
- все устройства сети должны работать на автономном источнике питания;
- в процессе работы возможно появление внутрисетевых помех на различных участках сети.

Подчеркнем, что на данном этапе не планируется продажа решений на основе MeshLogic в виде OEM-модулей или лицензируемого встроенного программного обеспечения сетевого стека. При создании действительно эффективной беспроводной сенсорной сети требуется учитывать особенности прикладной задачи на всех уровнях архитектуры узла: от аппаратной реализации и протокола доступа к среде до прикладного уровня. Для выполнения необходимой оптимизации разработчик системы должен иметь полный контроль над компонентами платформы, что невозможно обеспечить в функционально законченных изделиях. Именно поэтому технология MeshLogic будет предоставляться конечному потребителю в виде комплексной аппаратно-программной системы, разработанной под специфические требования заказчика.