

Реализация беспроводных сетей на основе технологии ZigBee стандарта 802.15.4

Вниманию читателей предлагается информация о новой технологии реализации беспроводных сетей на основе спецификации ZigBee и стандарта IEEE 802.15.4. Описываются возможные области применения технологии, архитектура стека протоколов ZigBee и его особенности. Дан краткий обзор программно-аппаратного обеспечения для реализации беспроводных сетей на основе технологии ZigBee и стандарта IEEE 802.15.4 от компании Freescale Semiconductor.

Михаил Соколов

rms001c@freescale.com

Олег Воробьев

oleg.vorobyev@petrointrade.ru

Беспроводные сети на базе стандарта IEEE 802.15.4 представляют собой альтернативу проводным соединениям в распределенных системах мониторинга и управления и отличаются более гибкой архитектурой, требуют меньших затрат при их установке и эксплуатации.

В 2001 году Институт инженеров электротехники и электроники IEEE разработал новый стандарт 802.15.4 семейства беспроводных персональных сетей WPAN. В 2002 году был организован альянс ZigBee. Альянс ZigBee — это консорциум поставщиков полупроводниковых компонентов, производителей готовых решений, а также конечных потребителей (всего более 90 компаний), который разрабатывает глобальную спецификацию программного стека протоколов ZigBee на базе стандарта IEEE 802.15.4 для надежных, с низкими энергозатратами беспроводных приложений с поддержкой различных сетевых топологий типа «звезда», «кластерное дерево», «многочечковая сеть» [1].

Технология ZigBee заняла нишу радиointерфейсов для низкоскоростных приложений с крайне малым энергопотреблением, где использовались либо

технологии с более высокими эксплуатационными характеристиками и с высоким энергопотреблением, либо решения, базирующиеся на микросхемах радиотрансиверов различных производителей, не относящихся ни к одному из распространенных стандартов. Приведенные на рис. 1 стандарты (Bluetooth, WLAN) отлично подходят для передачи больших объемов информации (голоса, данных, видео) с высокой скоростью (от 1 до 200 Мбит/с) и с дальностью передачи от 10 до 100 метров. Устройства на их основе способны работать в автономном режиме (от батарей и аккумуляторов). Все это позволяет заменить проводные соединения в таких системах, как компьютерные и развлекательные системы, вычислительные сети. Однако существует огромное множество систем (разнообразные датчики, системы контроля и сбора информации и т. д.), обладающих особой спецификой (небольшие объемы передаваемой информации, малое энергопотребление, простота установки и обслуживания, большое количество узлов сети и т. п.), вследствие чего в такого рода приложениях невозможно со 100-процентной эффективностью использовать упомянутые технологии. Именно на реализацию подобных задач нацелен стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) для низкоскоростных WPAN-сетей (рис. 1).

Применение технологии ZigBee/802.15.4 позволяет разрабатывать беспроводные интерфейсы с минимальными затратами благодаря простоте схемотехники, минимальному количеству внешних пассивных элементов, использованию готового программного обеспечения стека малых объемов. Стандарт позволяет создавать сети с многочечковой топологией, обслуживать таким образом очень большое число узлов и увеличивать дальность связи без дополнительных затрат на усилители мощности.

Стандарт IEEE 802.15.4 для беспроводных низкоскоростных персональных сетей (WPAN) определяет физический уровень PHY и уровень доступа к среде MAC [2]. Основные параметры стандарта приведены в таблице 1.

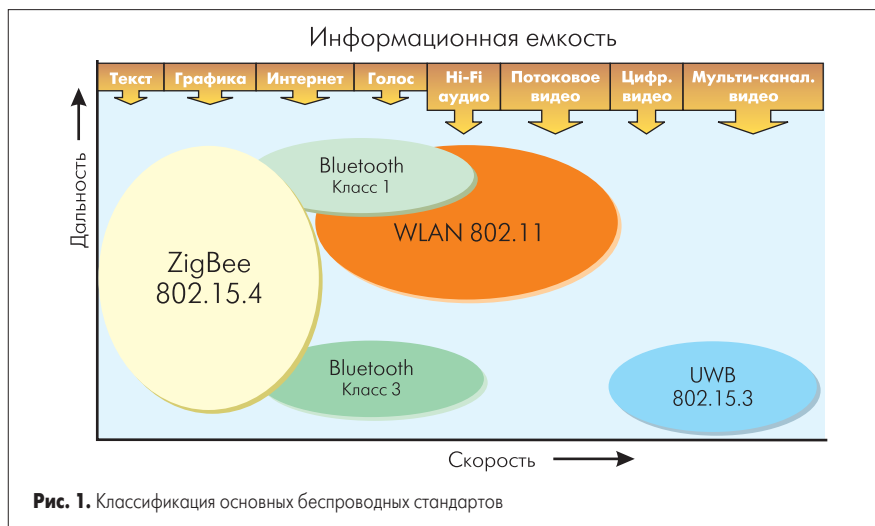


Таблица 1. Спецификация стандарта IEEE 802.15.4

Стандарт	802.15.4 ZigBee™		
Частота	868 МГц	915 МГц	2,4 ГГц
Число каналов/шаг	1/-	10/2 МГц	16/5 МГц
География распространения	Европа	Америка	Весь мир
Макс. скорость, модуляция	20 кбит/с, BPSK	40 кбит/с, BPSK	250 кбит/с, O-QPSK
Выходная мощность, ном.	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)
Дальность	10–100 м		
Чувствительность (спецификация)	-92 dBm	-92 dBm	-85 dBm
Размер стека	4–32 кбайт		
Срок службы батареи	От 100 до 1000 и более дней		
Размер сети	65536 (16-битные адреса), 264 (64-битные адреса)		

Спецификация ZigBee-стека определяет сетевой уровень, уровни безопасности и доступа к приложению и может использоваться совместно с решениями на базе стандарта 802.15.4 для обеспечения совместимости устройств.

Глобальная спецификация ZigBee для беспроводных приложений, основанная на едином стандарте 802.15.4, изначально нацелена и сфокусирована на приложениях мониторинга и контроля, распределенных сетях датчиков, на развертывании беспроводных информационных сетей для недорогих низкопотребляющих систем, использующихся в коммерческой, промышленной и домашней автоматике (рис. 2).

Одним из основных преимуществ стандарта 802.15.4/ZigBee является простота установки и обслуживания подобных систем. Особенности спецификации ZigBee позволяют с легкостью развертывать беспроводные персональные сети: «вы просто вынимаете устройство из коробки, вставляете батареи и совершаете простую операцию наподобие нажатия клавиши — подносите два устройства друг к другу, нажимаете кнопки и держите до тех пор, пока не загорятся зеленые светодиоды». Таким образом происходит объединение двух устройств в сеть либо привязка, например, выключателя света к определенной лампе. Реализация данного принципа предполагает внедрение ZigBee-модулей во все новые приборы и системы для дома и офиса. В результате появляется возможность создания единой сети совместимых устройств от разнообразных производителей.

Главный критерий внедрения новых технологий на крупных предприятиях — конечная цена одного устройства. Цена вопроса в такого рода приложениях крайне высока, и в промышленных масштабах даже десятки доли цента играют огромную роль. Тем не менее, основным способом снижения стоимости конечного решения ZigBee является наличие большого числа потенциальных и существующих рынков и увеличение объемов поставок электронных компонентов от производителей. А ведь рынок бытовых устройств просто огромен и исчисляется миллиардами единиц [5].

Стоимость решений, базирующихся на стандарте 802.15.4/ZigBee, сейчас составляет около 5\$ и будет постепенно снижаться до 2\$ в течение нескольких лет (в цену входят микрокон-



Рис. 2. Области применения технологии ZigBee / 802.15.4

троллер, радиотрансивер, программный стек). Однако все зависит от составляющих элементов схемы. Некоторые решения позволяют использовать уже существующий микроконтроллер (МК) в системе, в других приложениях необходим дополнительный МК. Например, использование только микросхемы приемопередатчика и программного обеспечения стека может добавить к стоимости конечного изделия порядка 2–4\$, в то время как стоимость конечного изделия может возрасти на 5–6\$, если потребуется применение более дорогого МК в системе или же использование дополнительного МК для реализации стека.

Стек протоколов ZigBee представляет собой иерархическую модель, построенную по принципу семиуровневой модели протоколов передачи данных в открытых системах OSI (Open System Interconnection). Стек включает в себя уровни стандарта IEEE 802.15.4, отвечающие за реализацию канала связи, и программные сетевые уровни и уровни поддержки приложений, определенные спецификацией ZigBee [1]. Реализация беспроводной сети возможна и без использования ZigBee-стека. Любой собственный стек может использовать уровни MAC и PHY стандарта 802.15.4.

Стандарт IEEE 802.15.4 определяет два нижних уровня стека: уровень доступа к среде (MAC) и физический уровень передачи данных в среде распространения (PHY), то есть нижние уровни протокола беспроводной передачи данных [2]. Альянс определяет программные уровни стека ZigBee от уровня канала передачи данных (Data Link Control) до уровня профилей устройств (ZigBee Profiles).

Прием и передача данных по радиоканалу осуществляется на физическом уровне PHY, определяющем рабочий частотный диапазон, тип модуляции, максимальную скорость, число каналов (табл. 1). Уровень PHY осуществляет активацию-деактивацию приемопередатчика, детектирование энергии принимаемого сигнала на рабочем канале, выбор физического частотного канала, индикацию качества связи при получении пакета данных и оценку свободного канала. Важно понимать, что стандарт 802.15.4 — это физическое радио

(микросхема радио-приемопередатчика), а ZigBee — это логическая сеть и программный стек, обеспечивающие функции безопасности и маршрутизации.

Далее в структуре стека ZigBee следует уровень контроля доступа к среде IEEE 802.15.4 MAC, осуществляющий вход и выход из сети устройств, организацию сети, формирование пакетов данных, реализацию различных режимов безопасности (включая 128-битное шифрование AES), 16- и 64-битную адресацию. Уровень MAC обеспечивает различные механизмы доступа в сеть, поддержку сетевых топологий от «точка-точка» до «многочайковая сеть», гарантированный обмен данными (ACK, CRC), поддерживает потоковую и пакетную передачи данных.

Для предотвращения нежелательных взаимодействий возможно использование временного разделения на основе протокола CSMA-CA (протокол множественного доступа к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий).

Временное разделение ZigBee базируется на использовании режима синхронизации, при котором подчиненные сетевые устройства, большую часть времени находящиеся в «спящем» состоянии, периодически «просыпаются» для приема сигнала синхронизации от сетевого координатора, что позволяет устройствам внутри локальной сетевой ячейки знать, в какой момент времени осуществлять передачу данных. Данный механизм, основанный на определении состояния канала связи перед началом передачи, позволяет существенно сократить (но не устранить) столкновения, вызванные передачей данных одновременно несколькими устройствами. Стандарт 802.15.4 основывается на полудуплексной передаче данных (устройство может либо передавать, либо принимать данные), что не позволяет использовать метод CSMA-CA для обнаружения коллизий — только для их предотвращения.

Создание библиотеки единых профилей устройств, работающих в сети ZigBee, призвано обеспечить совместимость оборудования от различных производителей. Пользовательские профили (набор сервисов, необходимый для устройств определенного типа, например

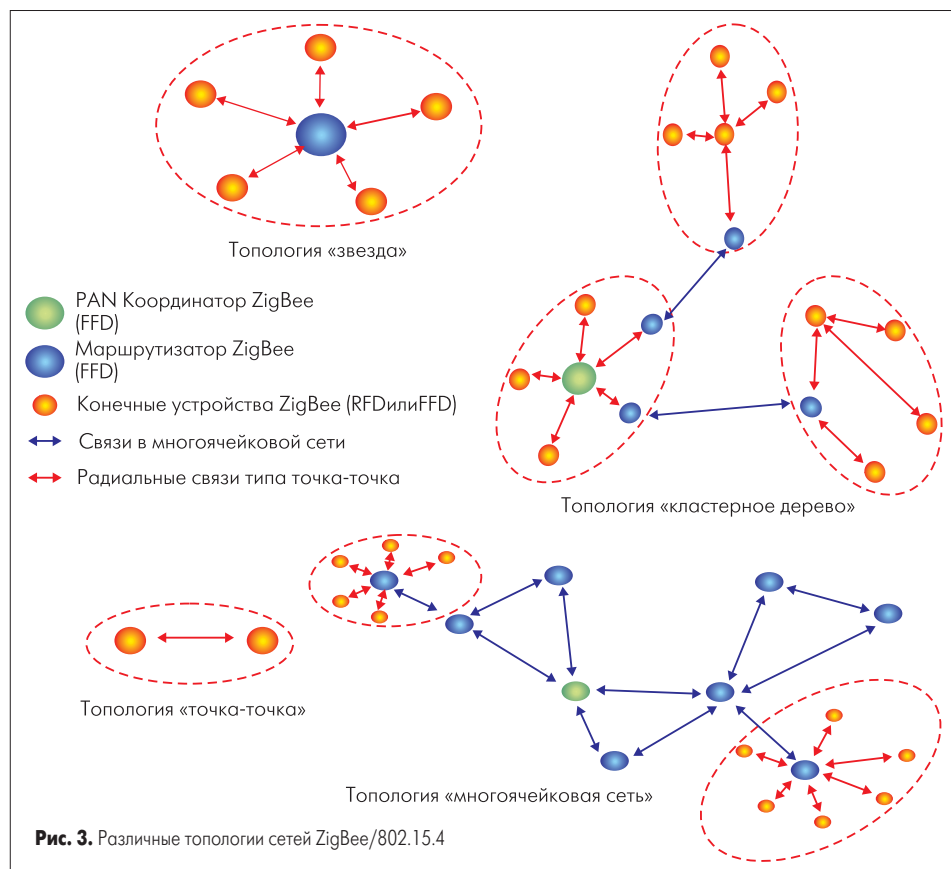


Рис. 3. Различные топологии сетей ZigBee/802.15.4

систем освещения или пожарных датчиков), находящиеся на самой вершине стека ZigBee, предоставляют типовые программные модули для использования в отдельных приложениях.

Стек ZigBee поддерживает разнообразные конфигурации сети и позволяет объединять устройства по следующим топологиям: «точка-точка», «звезда», «кластерное дерево» и «многочейковая сеть». Сетевые функции стека обеспечивают сканирование сети для детектирования активных каналов, идентификацию устройств на активных каналах, создание сети на незадействованных каналах и объединение с существующей сетью в зоне персональной беспроводной сети, распознавание поддерживаемых сервисов согласно определенным профилям устройств, функции маршрутизации. Это позволяет устройствам автоматически входить в сеть и выходить из нее, исключает нежелательные последствия «сбоя в одной точке» за счет наличия нескольких маршрутов к каждому узлу. На рис. 3 наглядно представлены различные варианты топологий сетей ZigBee.

Компания Freescale Semiconductor начала в числе первых предлагать законченные решения по реализации беспроводных соединений различной степени сложности на базе стандарта IEEE 802.15.4 [3]. Номенклатура продукции компании включает микросхемы радиотрансиверов MC13191/2, работающие в диапазоне ISM (Industrial, Scientific and Medical) 2,4 ГГц, специализированные 8-битные микроконтроллеры MC9S08GB/GT, наборы программного обеспечения для реализации беспроводных интерфейсов любой топологии — от простых соединений типа «точка-точка» и «звезда» до сложных сетевых топологий типа «кластерное дерево» и «многочейковая сеть» на базе стека ZigBee, что позволяет создавать готовые

беспроводные решения 802.15.4 / ZigBee на компонентах одного производителя.

Линейка радиомодемов компании Freescale Semiconductor включает две микросхемы приемопередатчиков MC13191 и MC13192. Радиомодемы работают на частоте 2,4 ГГц, соответствуют уровням MAC/PHY стандарта 802.15.4 (MC13192) и обеспечивают скорость передачи данных до 250 кбит/с. Микросхемы являются универсальными RF-приемопередатчиками, которые могут использоваться для организации любого радиointерфейса (не только ZigBee-совместимого). Для обмена данными возможно использование двух режимов: пакетный и потоковый режимы пе-

редачи. Основные технические параметры микросхем радиотрансиверов представлены в таблице 2.

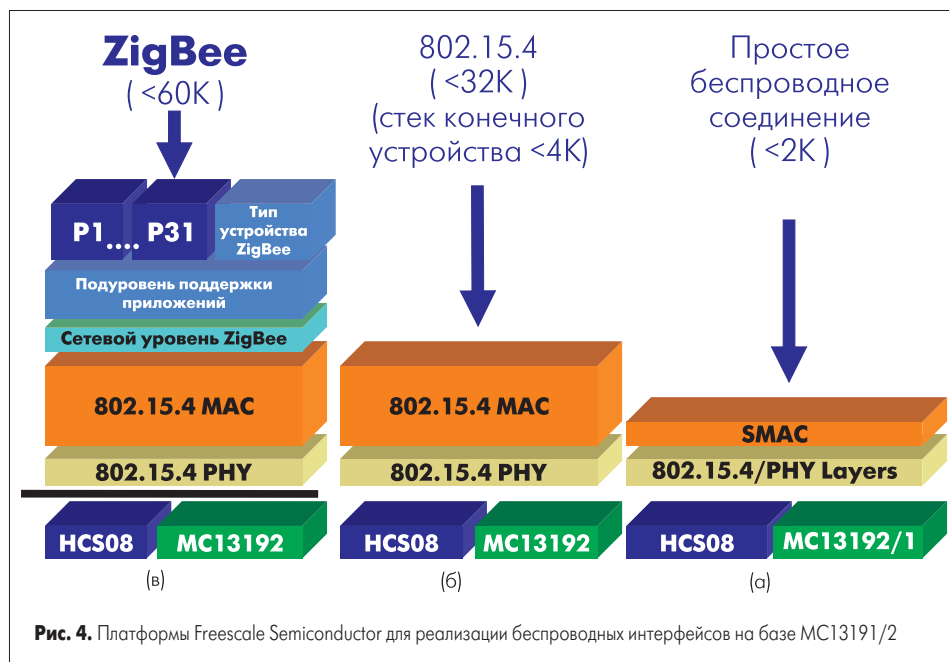
Микроконтроллеры MC9S08GB/GT семейства HCS08 спроектированы специально под беспроводные низкопотребляющие решения, для приложений с автономным питанием и длительным сроком работы от батарей, для радиоприложений, таких, как ZigBee. Высокая производительность МК обеспечивается благодаря частоте внутренней шины до 20 МГц. МК способен работать в широком диапазоне напряжений (от 1,8 до 3,6 В), поддерживает разнообразные режимы энергосбережения с крайне низкими токами потребления (до < 20 нА), обладает тремя типами интерфейсов: SPI, SCI, IIC, а также BDM-интерфейсом для отладки и программирования (3 breakpoints). Широкий набор периферии включает также: Flash-память от 32 до 60 кбайт, от 2 до 4 кбайт RAM, 8-канальный 10-битный АЦП, 8/4-канальные 16-битные модули таймеров, модуль контроля уровня питающего напряжения, модуль внутреннего тактирования. Микроконтроллеры MC9S08GB/GT доступны в следующих корпусах: 42 SDIP, 44 QFP (GT), 64 LQFP (GB) и включают до 56 портов ввода-вывода (до 36 для GT). Тактирование МК осуществляется непосредственно от микросхемы радиомодема MC13191/2, что уменьшает стоимость решения за счет использования в системе только одного кварцевого резонатора.

Программа развития линейки микросхем ZigBee компании Freescale Semiconductor предусматривает появление уже в 2005 году одночипового решения ZigBee-модуля, включающего кристалл радиомодема 2,4 ГГц, микроконтроллер, интегрированный переключатель приема-передачи, встроенный стек ZigBee. В дальнейшем, к концу 2005 года, планируется выпуск однокристальных ZigBee-модулей.

Компания Freescale Semiconductor предлагает готовые платформы для реализации беспроводных интерфейсов любого уровня сложности (рис. 4).

Таблица 2. Технические параметры микросхем радиотрансиверов MC13191/2

Параметр	MC13191	MC13192
Способ передачи	Пакетная	Пакетная, потоковая
Поддержка сетевых топологий	Точка-точка, звезда	Точка-точка, звезда, кластерное дерево, многочейковая сеть
Соответствие стандарту IEEE 802.15.4	Частичное	Полное
Рабочий частотный диапазон	2,4 ГГц	2,4 ГГц
Скорость передачи	До 250 кбит/с	До 250 кбит/с
Выходная мощность	Настраиваемая, от -30 dBm до 3,6 dBm	Настраиваемая, от -30 dBm до 3,6 dBm
Чувствительность	-91 dBm @ 1% PER	-92 dBm @ 1% PER
Модуляция	O-QPSK	O-QPSK
Число каналов, шаг	16 каналов с шагом 2 МГц	16 каналов с шагом 5 МГц
Интерфейс с МК	4-проводной SPI	4-проводной SPI
Напряжение питания	От 2 В до 3,6 В	От 2 В до 3,6 В
Поддержка энергосберегающих режимов	Да	Да
Память	4×64 кбайт ОЗУ	4×64 кбайт ОЗУ
Настраиваемая частота тактирования внешнего МК	Есть, от 16 МГц до 16,393 кГц	Есть, от 16 МГц до 16,393 кГц
Таймеры	2 канала 24-битного таймера событий	4 канала 24-битного таймера событий
Аппаратная реализация преамбулы, CRC, SFD	Есть	Есть
Определение качества связи, уровня напряженности поля, состояния канала	Есть	Есть
Возможность подключения внешних усилителей мощности/малошумящих усилителей	Есть	Есть
Доступность	Уже в продаже	Уже в продаже



Платформа простого беспроводного соединения поддерживает топологии типа «точка-точка» и «звезда», однако не является ZigBee/802.15.4-совместимой (рис. 4А). Данное решение использует упрощенный уровень MAC (Simple MAC), предъявляет пониженные требования к объемам памяти (< 2 кбайт), позволяет организовывать простые беспроводные соединения, совместимо с любым МК посредством стандартного SPI-интерфейса (программное обеспечение SMAC доступно в исходных кодах бесплатно). Аппаратная часть может быть выполнена на микросхемах радиомодемов MC13191/2 и МК MC9S08GT16/32 [3]. Возможно расширение зоны покрытия за счет использования дополнительных внешних усилителя мощности и малошумящего усилителя.

Программное обеспечение SMAC является упрощенной реализацией уровня MAC стандарта 802.15.4, поддерживает двухсторонний обмен и режимы энергосбережения. Объем кода для уровней MAC и PHY не превышает 2 кбайт, что позволяет с легкостью перенести его на любой МК благодаря его открытости. Программное обеспечение SMAC способно работать с двумя типами микросхем радиомодемов MC13191/2, однако поддерживает только пакетную передачу данных.

Для реализации платформы простого соединения компания Freescale Semiconductor предоставляет бесплатный код SMAC, примеры реализации несложных задач (программы и схемотехника), Gerber-файлы разводки печатных плат, рекомендации по созданию антенн различной конфигурации, макетные платы (отладочный комплект разработчика 13192DSK-A00, рис. 5).

Платформа 802.15.4 использует полноценный MAC-уровень, позволяет создавать беспроводные сети с топологиями типа «точка-точка», «звезда» и «кластерное дерево» и полностью поддерживает все функции стандарта 802.15.4 (рис. 4б). Данная платформа не является ZigBee-совместимой из-за отсутствия программных сетевых уровней и уровня приложений, определенных спецификацией ZigBee. Объем стека

варьируется от 32 до 4 кбайт в зависимости от функций узла в сети. Компания Freescale Semiconductor предоставляет полный программный стек IEEE 802.15.4 MAC (D18MAC — набор программных модулей и процедур в виде библиотек) стандарта 802.15.4.

Платформа ZigBee компании Freescale Semiconductor также имеет полноценный MAC-уровень, однако сетевой уровень и уровень приложений от компании Figure8Wireless полностью соответствуют спецификации стека ZigBee и позволяют создавать ZigBee-совместимые устройства на базе микросхем приемопередатчика MC13192 2,4 ГГц (рис. 4в). Объем стека в данном случае не превышает 60 кбайт. Кроме того, компания Figure8Wireless предоставляет набор программных средств разработки приложений Z-Tool для работы со стеком ZigBee. Поддерживаются топологии типа «точка-точка», «звезда», «кластерное дерево» и «многочеточечная сеть», поддерживается также параллельная работа сетей [4].

Все три платформы позволяют реализовывать беспроводные соединения с различной топологией, используя при этом аппаратно-программные средства только от компании Freescale Semiconductor, что значительно ускоряет разработку и улучшает совместимость компонентов схемы и готовых устройств.

Аппаратные средства разработки представлены несколькими наборами, ориентированными на различные платформы компании Freescale Semiconductor.

Набор разработчика Developer's Starter Kit (13192DSK-A00) позволяет создавать беспроводные соединения на основе стеков SMAC и 802.15.4 MAC, и включает две платы Sensor Applications reference Board (13192SARD), среду программирования Metrowerks CodeWarrior для микроконтроллеров HCS08, демонстрационное программное обеспечение TRIAX, последовательный кабель, 2 батареи 9 В, CD с документацией и инструкцию (рис. 5). Плата SARD построена на микросхеме радиомодема MC13192, микроконтроллере MC9S08GT60, включает датчики ускорений по осям X, Y, Z,



антенну, выполненную непосредственно на плате, и другую вспомогательную периферию. Программа TRIAX демонстрирует в реальном времени возможности радиоинтерфейса на основе SMAC при считывании и передаче показаний трех датчиков ускорения одновременно (при реализации беспроводной компьютерной мыши, курсор которой перемещается вслед за движениями руки оператора в воздухе), при передаче углов отклонения по трем осям (XYZ) на примере мониторинга промышленных, складских и портовых активов (перемещение по трем направлениям, кантование).

Плата RF Daughter Card (13192RFC-A00) для реализации узлов сетей SMAC/802.15.4 MAC и узлов стека ZigBee предназначена для работы совместно с отладочным комплектом микроконтроллера MC9S08GB60 Evaluation Board.

Для разработки сетей ZigBee компания Freescale Semiconductor рекомендует воспользоваться отладочным набором ZigBee Evaluation Kit (13192EVK-A00). Набор включает две платы SARD, три отладочные платы ZigBee/802.15.4, и позволяет моделировать сети ZigBee с топологиями любых типов. Также в комплект входит программное обеспечение IEEE 802.15.4 D18 MAC, набор инструментальных программ для работы со стеком ZigBee, примеры готовых решений, документация, кабель USB BDM, другие кабели и т. д. [3]. В комплекте стоит отдельно выделить устройство ZigBee Sniffer, с помощью которого можно сканировать эфир на любом из каналов в диапазоне 2,4 ГГц, что крайне необходимо при разработке сложных сетей.

Литература

1. www.zigbee.org
2. [http p:/grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG4.html](http://p:/grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG4.html)
3. www.freescale.com/zigbee
4. www.f8w.com
5. Дмитрий Захаров. Интернет начинает эфирное вещание // Коммерсантъ: Приложение ТЕЛЕКОМ. 2004. № 83 (2922).