

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ZIGBEE/802.15.4

Михаил Соколов, инженер по применению, ООО «Freescale Semiconductor»

В статье рассматривается архитектура стека протоколов ZigBee, обсуждаются ключевые особенности стека. Предлагаются программно-аппаратные средства реализации беспроводных сетей различных топологий на основе технологии ZigBee и стандарта IEEE 802.15.4.

Стек протоколов ZigBee построен по принципу иерархической семи-уровневой 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 Альянса ZigBee [1].

АРХИТЕКТУРА СТЕКА ZIGBEE

Архитектура стека ZigBee/802.15.4 представлена на рисунке 1. Стандарт IEEE 802.15.4 определяет уровень доступа к среде (MAC) и физический уровень передачи данных в среде распространения (PHY), т.е. нижние уровни протокола беспроводной передачи данных [2]. Альянс определяет программные уровни стека ZigBee от уровня канала передачи данных (DLC) 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: O-QPSK — квадратичная фазовая манипуляция со смещением для диапазона 2,4 ГГц (16 каналов, 250 Кбит/с), BPSK — двоичная фазовая манипуляция для частот 915 МГц (10 каналов, 40 Кбит/с) и 868 МГц (1 канал, 20 Кбит/с). 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 для реализации протокола CSMA-CA (протокол множественного доступа к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий). Важно понимать, что стандарт 802.15.4 — это физическое радио (микросхема радиоприемопе-

редатчика), 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 (см. рис. 1). Характеристики MAC уровня:

- 64-битная IEEE адресация, 16-битная адресация внутри локальных сетей (теоретически максимальное количество устройств в сети 2^{64} , организация простых сетей при использовании 16-битной локальной адресации с более чем 65 тыс. (2^{16}) устройств). Способы адресации:

- идентификаторы: сетевой ID + ID устройства (топология «Звезда»);

- идентификатор Отправителя/Получателя (передача между равноправными узлами);

- вхождение в сеть/выход из сети, автоматическая/полуавтоматическая организация сети;

- формат пакетов сообщений сети ZigBee, максимальная полезная нагрузка одного пакета данных составляет 104 байта данных, максимальная длина кадра равна 127 байт;

- уровни безопасности:

- свободный доступ к сети;

- список контроля доступа;

- таймеры определения задержек при передаче и актуальность пакетов данных;

- шифрование с использованием 128-битного симметричного ключа AES;

- механизм доступа в сеть, функции временного разделения и гарантированных временных интервалов, доступ к каналу посредством протокола CSMA-CA;

- поддержка сетевых топологий, включая соединения типа «точка — точка», «звезда», многоточечковой и кластерной топологий;

- оповещение о поступлении пакета данных, подтверждение приема (ACK), 16-битный контроль ошибок (CRC);

- поддержка трех классов устройств;

- пакетный/поточный режимы передачи.

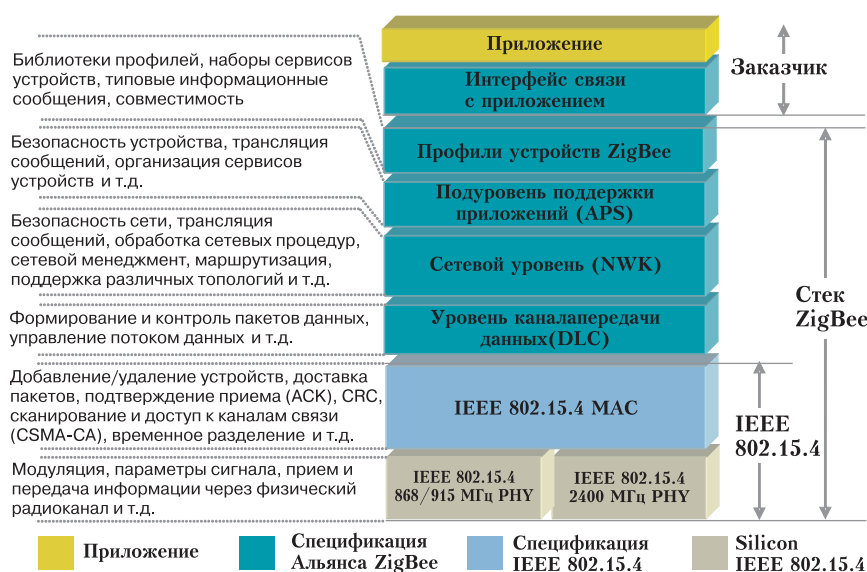


Рис. 1. Архитектура стека ZigBee

Основные функции программных уровней стека протоколов ZigBee приведены на рисунке 1. В рамках одной статьи невозможно рассказать обо всех особенностях стека, остановимся лишь на некоторых из них.

ТРИ КЛАССА УСТРОЙСТВ

Технология ZigBee/802.15.4 предоставляет разработчику несколько классов устройств: FFD-устройства-маршрутизаторы (Full Function Device — устройство с полным набором функций), устройства-координаторы (Coordinators — FFD с дополнительными системными ресурсами в зависимости от сложности сети) и RFD-оконечные устройства (Reduced Function Device — устройство с ограниченным набором функций). В каждой локальной сети ZigBee имеется только одно устройство-координатор. Основная задача координатора заключается в установке параметров и создании сети, выборе основного радиочастотного канала, в задании уникального сетевого идентификатора. При этом координатор является наиболее сложным из трех типов устройств, обладает наибольшим объемом памяти и повышенным энергопотреблением (питание от сети).

Маршрутизаторы используются для расширения радиуса действия сети, поскольку способны выполнять функции ретрансляторов между устройствами, расположенными далеко друг от друга. Устройства поддерживают любую сетевую топологию ZigBee, могут выполнять функции координатора и обращаться ко всем узлам сети (FFD и RFD).

Устройства с ограниченным набором функций не участвуют в маршрутизации, не могут выполнять функции координатора, обращаются только к координатору локальной сети (FFD-устройству), поддерживают соединения типа «точка — точка» и «звезда», играют роль конечных сетевых узлов.

На практике большинство узлов сети являются RFD-устройствами, а применение FFD-устройств и координаторов необходимо для образования мостов связи и соответствующей сетевой топологии. Как только маршрутизаторы и другие устройства подключаются к сети, они получают информацию о ней от координатора или любого уже задействованного в сети маршрутизатора и на основе этой информации устанавливают свои операционные параметры в соответствии с характеристиками сети. Маршрутизатор ZigBee получает таблицу сетевых адресов, которые он распределяет между подклю-

чившимися к сети конечными устройствами. Устройство FFD использует древовидную адресацию при принятии решений о маршрутизации. Для повышения эффективности маршрутизации, алгоритм ZigBee позволяет FFD-устройствам использовать сокращенную адресацию. Каждый маршрутизатор, на котором предполагается использовать сокращения, должен поддерживать таблицу, содержащую пары вида DN, где D — это адрес цели, а N — адрес следующего устройства на пути к этой цели. Сочетание маршрутизации по древовидному принципу и на основе таблицы обеспечивает гибкость работы и предоставляет разработчикам выбор оптимального соотношения цена/производительность [5].

МЕХАНИЗМЫ ДОСТУПА В СЕТЬ

Оптимизация энергопотребления является приоритетной задачей при построении ZigBee сетей. Одним из решений этой задачи является стратегия связи, основанная на передаче данных только при их поступлении и последующее ожидание подтверждения в случае успешного приема пакета со стороны адресата. При этом каждое устройство может инициировать передачу в любой момент. Очевидным недостатком данного метода является вероятность интерференции при одновременной передаче данных несколькими устройствами. Однако возможность наложения сводится к минимуму благодаря крайне малой длительности активного цикла устройства, случайности момента передачи и, как правило, небольшим объемам передаваемой информации. Надежность соединения повышается за счет использования протокола CSMA-CA.

Стратегия простого множественного доступа применима только к соединениям типа «точка — точка» или «звезда». Она подходит не всем приложениям. Для предотвращения нежелательного взаимодействия возможно использование протокола множественного доступа с временным разделением (TDMA). Технология ZigBee/802.15.4 гарантирует временные интервалы по принципу схожему с технологией

TDMA, но использование данного разделения возможно только совместно с режимом синхронизации и временного разделения, что является более сложным и менее энергоэффективным алгоритмом по сравнению с обычным TDMA-доступом [6].

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. Координатор управляет обменом, выделяет каналы и осуществляет вызовы с интервалом от 15 мс до 252 с. Передача сигнальных пакетов определяет пропускную способность, обеспечивает малое время ожидания очереди доступа и выделение 16 временных интервалов одинаковой длительности, на каждом из которых исключены коллизии в сети (см. рис. 2). Временной интервал доступа для каждого из узлов сети определяется либо координатором, либо посредством механизма CSMA-CA. Интервалы покоя необходимы для реализации энергосберегающих режимов сетевого координатора при работе от автономного источника питания. Недостаток — состояние ожидания сигнала синхронизации приводит к незначительному увеличению энергопотребления из-за наличия небольших временных расходов, что вынуждает устройства «просыпаться» немного раньше, чтобы не пропустить сигнал. Функция синхронизированного доступа применяется в сетях с расширенной топологией, таких как «кластерное дерево» и «многоячейковая сеть» [6].

В таблице 1 приводятся различия в пересылках данных между координатором и узлом сети для случаев простого множественного доступа и доступа с функцией синхронизации.

Стандартный множественный доступ может иметь место в системах безопасности и охраны зданий при

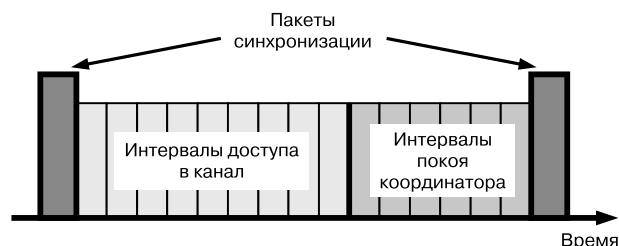


Рис. 2. Синхронизированный доступ в сеть ZigBee

организации ZigBee-сети разнообразных датчиков (проникновения, движения, дыма и т.д.). Условиями применимости можно считать общее время состояния покоя систем порядка 99,9%, переход устройств в активное состояние в псевдослучайные моменты времени для сообщения координатору о своем присутствии в сети. В момент срабатывания датчик сразу переходит в активное состояние и передает сигнал тревоги. При этом координатор, работающий от сети питания, постоянно находится в активном состоянии и принимает сигналы от всех оконечных сетевых устройств.

Синхронизированный доступ позволяет координатору иметь автономное питание благодаря отсутствию случайных пересылок от оконечных устройств. Регистрация в сети в данном случае происходит следующим образом:

- оконечное устройство сразу после подачи питания ждет сигнала синхронизации от координатора существующей сети ZigBee (временной интервал ожидания сигнала 0,015...252 с);
- обмен первичной информацией с координатором и ожидание ответа;
- переход в состояние покоя, «пробуждение» в моменты, определяемые координатором сети ZigBee;
- по окончании сеанса связи с оконечным устройством координатор также переходит в состояние покоя.

Данный способ доступа предполагает незначительное увеличение стоимости времязадающих цепей в каждом из узлов сети. Более длительные интервалы состояния покоя предполагают наличие точных времязадающих цепей, а ранний переход в активное состояние для уверенного приема сигнального пакета увеличивает потребление электроэнергии принимающей стороной. Максимальное значение пе-

риода синхронизации (252 с) объясняется стремлением ограничить предельную точность цепи времени.

ПРОФИЛИ УСТРОЙСТВ СЕТЕЙ ZIGBEE

Создание библиотеки единых профилей устройств, работающих в сети ZigBee, призвано обеспечить совместимость оборудования различных производителей. Пользовательские профили — это набор сервисов, необходимый для устройств определенного типа, например, систем освещения или пожарных датчиков. Они находятся на вершине стека ZigBee и предоставляют типовые программные модули для использования в отдельных приложениях.

Профили устройств определяются в т.н. «Marketing Requirements Documents (MRD)», над которыми работает Группа маркетинга Альянса [1]. Документы MRD являются руководящими документами для Управляющего технического комитета и Подкомитета по архитектуре ZigBee в процессе приведения профилей устройств в соответствие с архитектурой стека ZigBee. Профили приложений определяются для каждой области возможного применения. Каждый профиль определяет набор описаний и сервисов устройства, который, в свою очередь, задает для приложения индивидуальный режим работы. Благодаря использованию профилей, OEM-производителям предоставляются большие возможности по ускорению процесса создания гарантированно совместимых решений и сертификации готовой продукции. Профили представляют собой утвержденный набор информационных сообщений, характерных для определенного приложения (например, «домашняя автоматика — управление освещением»).

Реализация беспроводной сети возможна и без использования стека ZigBee [3]. Любой стек может использовать уровни MAC и PHY стандарта 802.15.4. Первые беспроводные решения, созданные на базе стандарта 802.15.4, будут обладать своими сетевыми уровнями, пока будут выявлены и исправлены все недочеты и ошибки спецификации ZigBee. Может возникнуть вопрос: зачем использовать стек ZigBee, когда можно использовать собственное решение? Несмотря на то, что ряд компаний планирует создание стеков, руководствуясь, например, соображениями безопасности, а производители оборудования и готовых решений, к примеру, не хотят иметь конкурентов своей продукции, большинство осознает те преимущества, которые может предоставить единый стандарт (совместимость, низкая стоимость, широкий выбор поставщиков). Наверняка многие компании предложат свои профили устройств для уровня приложения стека ZigBee, но в случае, когда необходима стопроцентная совместимость в конкретном решении (например, датчики пожарной сигнализации от различных производителей), предполагается использование профилей устройств, определенных Альянсом. Также компании могут создавать открытые индивидуальные профили устройств для свободного использования другими фирмами, но фактически это случается крайне редко.

СЕТЕВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТЕКА

Стек ZigBee поддерживает различные конфигурации сети, в том числе следующие топологии: «точка — точка», «звезда», «кластерное дерево» и «многочаечковая сеть». Сетевые функции стека включают в себя сканирование сети для обнаружения ак-

Таблица 1. Протоколы пересылок для двух стратегий доступа в сеть

Направление передачи данных	Синхронизированный доступ	Простой множественный доступ
К координатору	— Устройство ожидает сигнальный пакет. — Устройство синхронизируется с сетью. — Устройство передает пакет данных в определенный временной интервал согласно протоколу CSMA-CA. — Координатор передает подтверждение приема данных.	— Устройство передает пакет по мере появления данных согласно протоколу CSMA-CA. — Координатор передает подтверждение приема данных.
От координатора	— Во время сигнального пакета Координатор сообщает о наличии новых данных. — Устройство ждет сигнальный пакет. Если есть новые данные, устройство запрашивает данные в определенный временной интервал согласно протоколу CSMA-CA. — Координатор передает подтверждение получения запроса от устройства. — Координатор пересылает данные в определенный момент времени согласно протоколу CSMA-CA.	— Координатор хранит данные, пока не поступит на них запрос от устройства. — Устройство посылает запрос координатору согласно протоколу CSMA-CA. — Координатор передает подтверждение получения запроса от устройства. — Координатор пересылает данные согласно протоколу CSMA-CA.

тивных 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, маршрутизацию. 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.

В зависимости от типа, каждое устройство имеет определенные сетевые функции:

- координатор сканирует сеть и определяет свободные каналы для организации сети;

- маршрутизатор (FFD) сканирует сеть, находит активные каналы и пытается войти в состав существующей сети либо создает собственную персональную сеть на правах координатора, если нет активных каналов или не произошло объединение с активной сетью. Если произошло объединение, согласно правилам уже существующей сети координатор примыкающей локальной сети переводится в ранг маршрутизатора и передает всю информацию о локальной сети координатору существующей сети. Из сигнального пакета синхронизации от координатора новообразованный маршрутизатор получает необходимую информацию о временных параметрах сети для обнаружения последующих сигнальных пакетов (см. рис. 3);

- оконечное RFD-устройство всегда пытается войти в существующую сеть.

На рисунке 4 представлены различные варианты топологии сетей ZigBee. Соединения типа «точка — точка» и «звезда» (см. рис. 4а, б) подходят для самых простых приложений, обладают минимальной стоимостью, максимально низким энергопотреблением и позволяют использовать стратегию стандартного множественного доступа. В каждой сети с топологией «звезда» имеется один координатор сети, но при этом могут быть и другие полнофункциональные оконечные устройства (FFD), которые являются подчиненными по отношению к координатору.

Топология «кластерное дерево» обеспечивает масштабируемость сети и расширение зоны покрытия, не требуя дополнительных затрат на инфраструктуру. На рис. 4в показана такая топология, включающая в себя только основу дерева. Сеть типа «кластер-

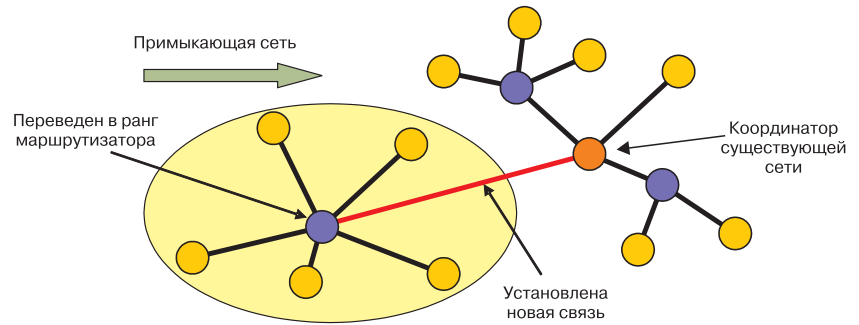


Рис. 3. Пример объединения сетей

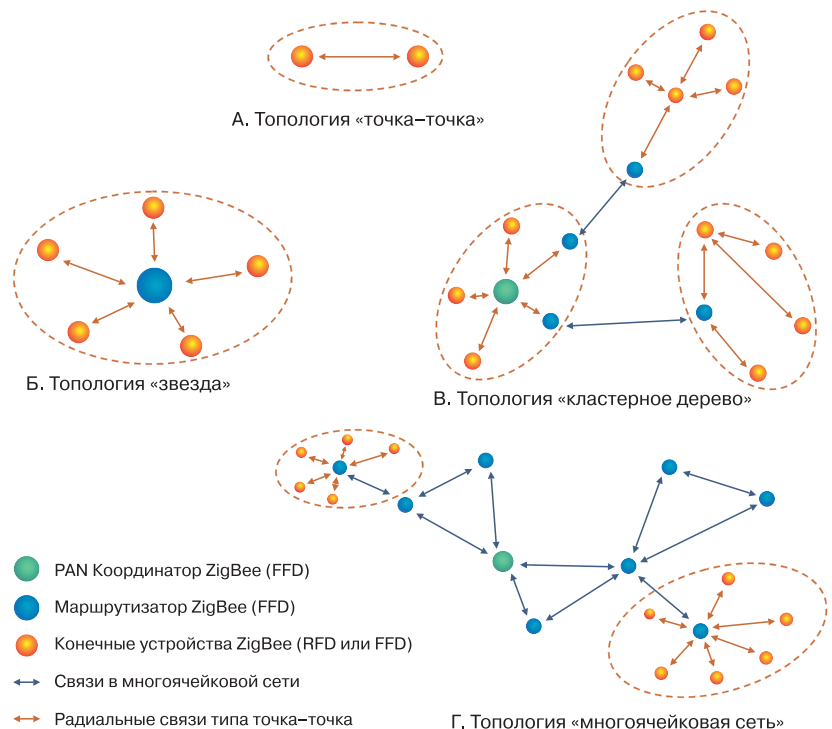


Рис. 4. Варианты топологий сетей ZigBee/802.15.4

ное дерево» может включать в себя несколько подсетей с топологией «звезда» и устройствами с ограниченными функциями (RFD).

Помимо топологий типа «звезда» и «кластерное дерево» технология ZigBee поддерживает многочечковый принцип построения сетей (см. рис. 4г). При такой топологии любой сетевой узел может выполнять также функции маршрутизатора для других устройств в сети. Если возникло препятствие на пути сигнала от одного узла к другому (бетонная или металлическая преграда и т.п.), выбирается альтернативный маршрут для передачи данных адресату. Более плотная концентрация сетевых узлов приводит к более защищенной, надежной системе. Если один из узлов вышел из строя, маршрут автоматически определяется через другие узлы сети, и в результате сеть становится самовос-

становливающейся [7]. Однако в многочечковой сети срок службы автономных источников питания уменьшается за счет применения метода синхронизованного доступа, увеличивается сложность определения каналов передачи и происходит задержка (десятки миллисекунд) при каждой пересылке сообщения сетевым узлом.

Все узлы многочечковой сети способны обнаруживать другие узлы и, распознав друг друга, вычислять оптимальный путь передачи пакетов, максимальную скорость обмена, частоту возникновения ошибок и время ожидания. Рассчитанные значения передаются соседним узлам, а оптимальный путь передачи трафика выбирается исходя из мощности принимаемых сигналов.

Процессы обнаружения узлов и выбора пути идут постоянно, поэтому каждый узел поддерживает текущий



Рис. 5. Структура радиомодема MC13191/2

список соседей и при изменении их расположения может быстро вычислить наилучший маршрут. Если какой-то узел изымается из сети (для технического обслуживания или вследствие сбоя), соседние узлы быстро изменяют конфигурацию своих таблиц и заново определяют маршруты потоков трафика. Это свойство самовосстановления и преодоления сбоев существ-

венно отличает сети с ячеистой топологией от сетей с жесткой архитектурой.

ПЛАТФОРМА ZIGBEE ОТ FREESCALE SEMICONDUCTOR

Компания Freescale Semiconductor в числе первых предложила 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, работающих в диапазоне 2,4 ГГц ISM (Industrial, Scientific and Medical), специализированные 8-битные микроконтроллеры MC9S08GB/GT, наборы программного обеспечения для реализации на базе стека ZigBee беспроводных интерфейсов любой топологии — от простых соединений типа «точка — точка» и «звезда» до сложных сетевых топологий типа «кластерное дерево» и «многочечковая сеть». Это позволяет создавать готовые беспроводные решения 802.15.4/ZigBee на компонентах одного производителя.

РАДИОМОДЕМЫ MC13191/2/3 ДИАПАЗОНА 2,4 ГГц СТАНДАРТА IEEE 802.15.4

Линейка радиомодемов компании Freescale Semiconductor включает в себя три микросхемы приемопередатчиков MC13191, MC13192 и MC13193. Радиомодемы работают на частоте 2,4 ГГц, соответствуют уровням MAC/PHY стандарта 802.15.4 (MC13192/3) и обеспечивают скорость передачи данных до 250 Кбит/с. Технически микросхемы MC13192 и MC13193 идентичны друг другу, однако для реализации ZigBee-совместимых устройств возможно использование только MC13193, в то время как для не ZigBee-совместимых устройств целе-

Таблица 2. Технические параметры микросхем радиотрансиверов MC13191/2/3

Параметр	MC13191	MC13192/3
Способ передачи	Пакетная	Пакетная, потоковая
Поддержка сетевых топологий	Точка–точка, звезда	Точка–точка, звезда, кластерное дерево, многочечковая сеть
Соответствие стандарту IEEE 802.15.4	Частичное	Полное
Рабочий частотный диапазон, ГГц	2,4...2,484	
Скорость передачи, Кбит/с	До 250	
Выходная мощность, дБм	Настраиваемая: –30...3,6	
Чувствительность, дБм (1% PER)	–91	–92
Модуляция	O-QPSK	
Число каналов, шаг	16 каналов с шагом 2 МГц	16 каналов с шагом 5 МГц
Интерфейс с МК	4-проводной SPI	
Напряжение питания, В	2...3,6	
Поддержка энергосберегающих режимов	Да	
Память ОЗУ, Кбайт	4 × 64	
Настраиваемая частота тактирования внешнего МК	Есть, 16 МГц...16,393 кГц	
Таймеры	2 канала 24-битного таймера событий	4 канала 24-битного таймера событий
Аппаратная реализация преамбулы, CRC, SFD	Да	
Определение качества связи, уровня напряженности поля, состояния канала	Да	
Возможность подключения внешних усилителей мощности/малошумящих усилителей	Да	
Доступность	Уже в продаже	

сообразно применять микросхемы MC13191/2. Основные технические параметры микросхем радиотрансиверов представлены в таблице 2. Структура микросхем радиомодемов представлена на рисунке 5.

Для обмена данными возможно использование двух режимов — пакетного и потокового. Пакетный режим задействует два 128-байтовых буфера (один буфер для MC13191) во время передачи данных и один 128-байтовый буфер при приеме данных. В режимах приема и передачи устройство не требует взаимодействия с внешним микроконтроллером (МК), максимальная частота работы SPI-интерфейса составляет 8 МГц. В потоковом режиме используется 2-байтовый буфер, при этом МК обрабатывает прерывания каждые 64 мкс для приема/пересылки слова данных и осуществляет программный контроль последовательности кадра. Скорость обмена по SPI синхронизируется со скоростью передачи пакета данных.

Радиомодем MC13191/2/3 требует минимума внешних компонентов, обладает всей необходимой интегрированной периферией, встроенным усилителем мощности с программируемым коэффициентом усиления и внутренней схемой регулятора напряжения. Благодаря использованию набора энергосберегающих режимов ток потребления в состоянии покоя составляет менее 1 мкА (см. табл. 3), а при количестве сеансов связи менее 15 тыс. в день решению на базе MC13191/2/3 нет равных на рынке по энергопотреблению.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ MC9S08GB/GT

Микроконтроллеры MC9S08GB/GT семейства HCS08 спроектированы специально для беспроводных низкопотребляющих решений, приложений с автономным питанием и длительным сроком работы батарей, радиоприложений ZigBee. Высокая производительность МК обеспечивается

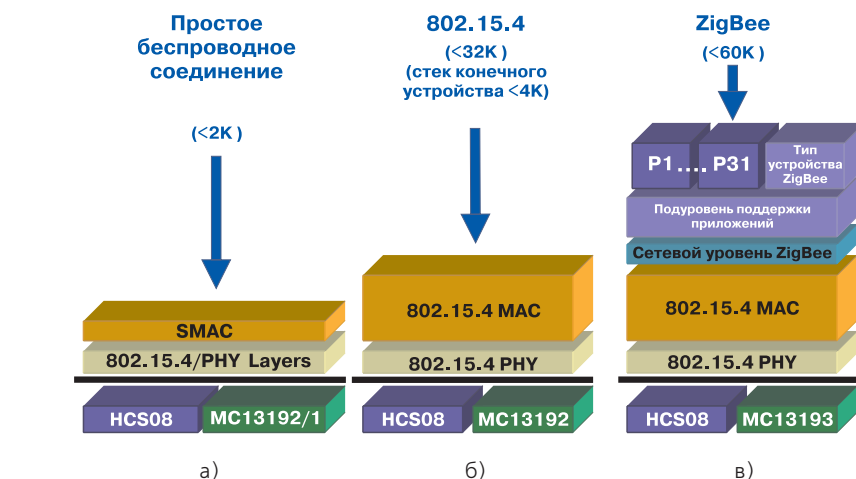


Рис. 6. Платформы Freescale Semiconductor для реализации беспроводных интерфейсов на базе MC13191/2/3

благодаря высокой частоте внутренней шины (до 20 МГц). МК функционирует в широком диапазоне напряжений 1,8...3,6 В, поддерживает разнообразные режимы энергосбережения с крайне низкими токами потребления (до 20 нА), обладает тремя типами интерфейсов SPI, SCI и IIC, а также BDM-интерфейсом для отладки и программирования (3 breakpoints). Широкий набор периферии включает FLASH-память 32...60 Кбит, 2...4 Кбит 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 корпусах 42 SDIP, 44 QFP (GT) и 64 LQFP (GB); включают до 56 портов ввода/вывода (до 36 для GT). Тактирование МК осуществляется непосредственно от микросхемы радиомодема MC13191/2/3, что уменьшает стоимость решения за счет использования в системе только одного кварцевого резонатора.

Программа развития линейки микросхем ZigBee компании Freescale Semiconductor предусматривает уже в 2005 г. появление однокорпусного решения ZigBee-модуля, включающего

кристалл радиомодема на 2,4 ГГц, микроконтроллера, интегрированного переключателя приема/передачи, встроенного стека ZigBee. К концу 2005 г. планируется выпуск однокристальных ZigBee-модулей.

ОТ ПРОСТЫХ СОЕДИНЕНИЙ — К СЛОЖНЫМ СЕТЯМ ZIGBEE

Компания Freescale Semiconductor предлагает готовые платформы для реализации беспроводных интерфейсов любого уровня сложности (см. рис. 6).

Платформа простого беспроводного соединения поддерживает топологии типа «точка — точка» и «звезда», однако не является ZigBee/802.15.4-совместимой (см. рис. 6а). Данное решение использует упрощенный MAC-уровень (Simple MAC, SMAC), предъявляет пониженные требования к объему памяти (<2 Кбайт), позволяет организовывать простые беспроводные соединения, совместимости 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]. При использо-

Таблица 3. Энергосберегающие режимы радиомодема MC13191/2/3

Режим	Функции	Ток	Время перехода
Off	Отключены все функции МК, только ток утечки	<1 мкА	23,332 мс в режим Idle
Hibernate	Отключен генератор тактовой частоты. Активация — по уровню сигнала в цепи антенны	3 мкА	18,332 мс в режим Idle
Doze*	Генератор тактовой частоты активен, нет внешнего выхода тактовой частоты	40 мкА	332 мкс в режим Idle
Idle	Генератор тактовой частоты активен, тактовая частота подается на вход МК, SPI-интерфейс активен	500 мкА	
Receive	Активны: генератор тактовой частоты, приемник, SPI-интерфейс приостановлен	37 мкА	144 мкс из режима Idle
Transmit	Активны: генератор тактовой частоты, передатчик, SPI-интерфейс	34 мА	144 мкс из режима Idle

* Doze — уникальный режим 802.15.4/ZigBee, гарантирующий крайне быстрый переход в активное состояние с целью увеличения срока службы батарей.



Рис. 7. Внешний вид отладочного комплекта «Developer's Starter Kit (13192DSK-A00)»



Рис. 8. Внешний вид платы «RF Daughter Card (13192RFC-A00)» и отладочного комплекта «MC9S08GB60 Evaluation Board»

вании дополнительного внешнего усилителя мощности и маломощного усилителя возможно расширение зоны покрытия.

Программное обеспечение SMAC является упрощенной реализацией уровня MAC стандарта 802.15.4. Оно поддерживает двухсторонний обмен и режимы энергосбережения. Объем кода уровней MAC и PHY не превышает 2 Кбайт, что позволяет с легкостью переносить его на любой МК благодаря его открытости. Необходимый объем памяти RAM для уровня SMAC составляет 10 байт плюс длина пакета данных. Программное обеспечение SMAC способно работать с двумя типами микросхем радиомодемов MC13191/2, однако поддерживает только пакетную передачу данных. Из всех таймеров событий задействован только один для определения времени простоя при приеме (RX Timeout). Код SMAC не включает в себя сетевой уровень, его реализация возложена на уровень приложений. При топологии



Рис. 9. Внешний вид комплекта «ZigBee Evaluation Kit (13192EVK-A00)»

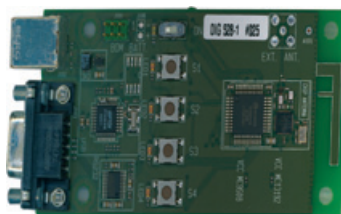


Рис. 10. Внешний вид отладочной платы ZigBee/802.15.4 из набора разработчика «ZigBee Evaluation Kit (13192EVK-A00)»

«звезда» объем стека координатора локальной сети увеличивается за счет дополнительного сетевого уровня на 1...6 Кбайт в зависимости от количества оконечных устройств и типа приложения. Минимальный набор линий связи МК и микросхемы радиомодема включает SPI-интерфейс или 3 линии портов МК, линии CE, RTXEN, ATTN, Reset, IRQ. Уровень SMAC не соответствует уровню MAC стандарта 802.15.4.

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

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 (см. рис. 66). Данная платформа не является ZigBee-совместимой из-за отсутствия программного сетевого уровня и уровня приложений, определенных спецификацией ZigBee. Объем стека FFD-устройства не превышает 32 Кбайт (объем кода MAC-уровня составляет порядка 20...25 Кбайт, кода сетевого уровня — 5...15 Кбайт), объем стека оконечного RFD-устройства составляет порядка 4 Кбайт. Компания Freescale Semiconductor предоставляет полный программный стек MAC-уровня стандарта IEEE 802.15.4 (D18MAC — набор программных модулей и процедур в виде библиотек). Сетевой уровень и уровень поддержки приложений поставляет компания Figure8Wireless [4]. Физический уровень обеспечивается микросхемой MC13192.

В отличие от платформы SMAC данное решение подразумевает использование дополнительного МК (MC9S08GB/GT) на стороне радиомодема для реализации сетевых функций и минимизации изменений в существующих приложениях. Как результат, платформа совместима с любым типом МК на стороне уже реализованного приложения. Для новых систем платформа 802.15.4 позволяет использовать единственный МК для реализации беспроводного интерфейса одновременно с выполнением основных задач устройства.

Платформа ZigBee компании Freescale Semiconductor имеет полноценный MAC-уровень, однако сетевой уровень и уровень приложений от компании Figure8Wireless тоже полностью соответствуют спецификации стека ZigBee, что позволяет создавать ZigBee-совместимые устройства на базе микросхем приемопередатчиков MC13192/3 диапазона 2,4 ГГц. При этом микросхема MC13193 предназначена именно для реализации стека ZigBee, ее появление ожидается в ближайшее время (см. рис. 6в). Объем стека в этом случае составляет не более 60 Кбайт, а объем кода MAC-уровня составляет порядка 18...25 Кбайт, кода сетевого уровня — 8...20 Кбайт, кода уровня безопасности — 5...10 Кбайт. Компания Figure8Wireless также предоставляет набор программных средств разработки приложений Z-Tool для работы со стеком ZigBee. Поддерживаются топологии типа «точка — точка», «звезда», «кластерное дерево» и «многоточечная сеть», параллельная рабо-

та сетей. Финальная версия программного обеспечения стека ZigBee будет доступна после ратификации версии 1.0 в конце октября 2004 г. [4].

Все три платформы позволяют реализовывать беспроводные соединения с различной топологией, используя 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. Он включает в себя 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, инструкцию (см. рис. 7). Плата SARD построена на микросхеме радиомодема MC13192,

микроконтроллере MC9S08GT60, включает датчики X, Y, Z-ускорений, антенну, выполненную непосредственно на плате, и другую вспомогательную периферию. Программа TRIAX демонстрирует в реальном времени возможности радиointерфейса на основе SMAC при считывании и передаче показаний трех датчиков ускорения одновременно при реализации беспроводной компьютерной мыши, курсор которой перемещается вслед за движениями в воздухе руки оператора, 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/ZigBee предназначена для работы совместно с отладочным комплектом микроконтроллера MC9S08GB60 «MC9S08GB60 Evaluation Board» (см. рис. 8).

Для разработки сетей ZigBee компания Freescale Semiconductor рекомендует воспользоваться отладочным набором «ZigBee Evaluation Kit (13192EVK-A00)», который позволяет моделировать сети ZigBee с топология-

ми любых типов (см. рис. 9). Набор включает две платы SARD и три отладочные платы ZigBee/802.15.4 (см. рис. 10). Также в комплект входит программное обеспечение IEEE 802.15.4 D18 MAC, набор инструментальных программ для работы со стеком ZigBee, примеры готовых решений, документация, USB BDM, другие кабели и т.д. 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 [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы сайта www.zigbee.org
2. Материалы сайта <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG4.html>
3. Материалы сайта www.freescale.com/zigbee
4. Материалы сайта www.f8w.com
5. Смит З. ZigBee поддерживает встроенные сети, Computerworld. 2004. №24.
6. Legg G. ZigBee: Wireless Technology for Low-Power Sensor Networks, TechOnLine. May 6, 2004.
7. Джордан Б. Умные ячейки, Сети. 2004. №3.