

Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4

В. Варгаузин

Стандарты цифровой связи

Сегодня на рынке есть всё необходимое для быстрого распространения сенсорных радиосетей: сенсоры со встроенным цифровым интерфейсом, дешёвые сетевые устройства со встроенными функциями маршрутизации и несколько технологий создания сетей. Сетевые устройства (трансиверы) созданы в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4—2003. Стандарт ориентирован на поддержку сетевых устройств с автономным питанием, хотя на его основе могут создаваться и низкоскоростные сети со стационарным питанием, но практически с произвольной сетевой топологией. В 2005 году на основе стандарта альянсом компаний ZigBee утверждена сетевая технология с одноимённым названием, представляющая набор сетевых протоколов для автоматического создания сенсорных сетей, сетей мониторинга и контроля промышленной и медицинской аппаратурой, управления освещением, бытовой аппаратурой и, наконец, воплощения в жизнь концепции «Умный дом». Приведём в оригинале одно из изречений значимости ситуации: «Just as the personal computer was a symbol of the '80s, and the symbol of the '90s is the World Wide Web, the next nonlinear shift, is going to base the advent of cheap sensors» (Paul Saffo, Institute for the Future).

Место стандарта в семействе беспроводных стандартов

Семейство стандартов 802.15 предназначено для организации беспроводных персональных сетей (Wireless Personal Area Networks, WPANs), отличительной чертой которых является небольшой радиус действия сетевых устройств. Все они описывают два нижних уровня протоколов модели взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection, OSI): **физический** (PHysical Layer, **PHY**) и **уровень доступа к среде передачи** (Medium Access Control, **MAC**). Место этих стандартов в семействе стандартов IEEE 802 для беспроводных сетей иллюстрируется на рис. 1.

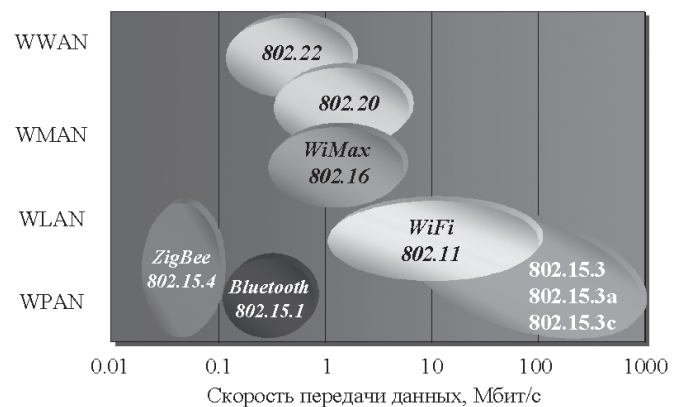


Рис.1. Семейство стандартов IEEE 802 для построения беспроводных сетей.

Стандарт 802.15.1 (Bluetooth) ориентирован на поддержку высокоскоростных мультимедийных приложений. Следствием является и относительно высокая стоимость сетевых устройств. Стандарт 802.15.3 ориентирован на ещё большую скорость передачи мультимедийных данных в WPAN, а стандарты 802.15.3a — на значительно большую скорость передачи данных за счёт использования сверхширокополосных сигналов (Ultra Wide Band, UWB). Разрабатываемый стандарт 802.15.3c является альтернативой стандарту 802.15.3a на физическом уровне. Эти стандарты, по сути, призваны воплотить в жизнь беспроводной прототип компьютерной технологии USB. Форум по продвижению стандарта 802.15.3a имеет название Wireless USB.

Стандарт IEEE 802.15.4 утверждён в 2003 году и ориентирован на организацию WPAN с небольшими скоростями передачи данных (Low-Rate WPANs, **LR-WPANs**) при радиусе действия сетевых устройств от 10 до 75 м. Скорость передачи данных ограничена величиной 250 кбит/с. Низкая скорость передачи данных, однако, при прочих равных условиях требует и низкого энергопотребления сетевых устройств. Это, в свою очередь, позволяет упростить создание таких устройств, работающих с автономным энергоснабжением. Поэтому стандарт имеет вполне конкретную рыночную нишу и ориентирован на разработку **дешёвых** сетевых беспроводных устройств, при необходимости работающих **от автоном-**

ного питания. Помимо низкой скорости передачи данных используются и относительно короткие пакеты данных (до 104 байт). Передача коротких пакетов является отличительной чертой систем **управления, мониторинга и сбора данных от сенсоров** (датчиков).

Физический уровень

Для построения персональной сети (Personal Area Network, **PAN**) выделено три диапазона частот: 2,4 ГГц, 868 и 915 МГц. Для нелицензируемого диапазона 2,4 ГГц выделено 16 частотных каналов, отстоящих друг от друга на 5 МГц. В диапазонах 868 и 915 МГц выделено 1 и 10 частотных каналов соответственно. В диапазоне 915 МГц шаг между частотными каналами составляет 2 МГц. В Европе диапазон 915 МГц является лицензируемым.

Все сетевые устройства в PAN работают в одном частотном канале. В результате в диапазоне 2,4 ГГц возможно развертывание в одном месте 16 различных PAN, не создающих друг другу электромагнитных помех.

В диапазоне 2,4 МГц скорость передачи данных сетевым устройством составляет 250 кбит/с. Используется квадратурная офсетная фазовая модуляция (Offset Quadrature Phase Shift Keying, O-QPSK).

В диапазонах 868 и 915 МГц скорость передачи данных сетевым устройством равна 20 и 40 кбит/с соответственно. Используется относительная двоичная фазовая модуляция (Binary Phase Keying, BPSK).

Для повышения помехоустойчивости приёма по отношению к сосредоточенным помехам используется сигнал с расширенным спектром, состоящий из 32 фазоманипулированных элементов (чипов). Спектр сигнала формируется в соответствии с требованиями на электромагнитную совместимость других беспроводных устройств, работающих в этом же диапазоне. Эти требования регламентируются стандартом 802.15.2.

Типы физических устройств и их функции в сети

PAN строится с использованием двух типов физических устройств: полнофункционального устройства (**Full Function Device, FFD**) и устройства с ограниченным набором функций (**Reduced Function Device, RFD**). Одно FFD может осуществлять связь как с несколькими FFD, так и с несколькими RFD. RFD не может осуществлять связь с другим RFD.

Разделение устройств на два типа оправдано различной стоимостью этих устройств, поскольку возможность связи с несколькими устройствами требует от них больших вычислительных ресурсов и большей объёма памяти. К примеру, FFD может перед пересылкой данных соседнему устройству использовать оценку качества канала связи (**Link Quality Indication, LQI**) до этого устройства. Индикатор качества имеет 8 градаций. Использование этой функции позволяет на основе FFD реализовать интеллектуальные устройства для выбора маршрута передачи данных по сети, если в сферу его радиодоступа попадают несколько сетевых устройств. Если попадает лишь одно устройство или же ему достаточно «слышать» лишь одного соседа в сети, то и нет смысла наделять его интеллектом.

Полнофункциональное сетевое устройство может быть настроено для работы в трёх режимах: координатор PAN, координатор и простое устройство.

Функцией **координатора PAN (PAN Coordinator)** обладает одно FFD в PAN. Это устройство инициирует процесс самоорганизации сети, под которым понимается способность сетевых узлов обнаружи-

вать новые сетевые узлы и включать их в существующую сетевую структуру без вмешательства человека (**Self-organizing**). В функцию координатора PAN входит сканирование частотных каналов для нахождения свободного канала и создания сети. Найдя свободный канал, координатор PAN формирует 16-разрядный адрес PAN (PAN identifier), который можно интерпретировать как корень дерева адресного пространства сети. После этого координатор PAN может начать «зывать» в сеть периодически передаваемыми сигналами **маяков (Beacons)** новые сетевые устройства, которые могут сканировать эфир с целью обнаружения этих сигналов и дальнейшего присоединения к существующей PAN. Для этого служит функция обнаружения сигнала (**Energy Detection, ED**). В адресном пространстве PAN два типа устройств отличаются специальным битом в поле MAC адреса, значение которого указывает тип устройства (FFD или RFD). PAN может включать 2^{64} сетевых устройств.

Для присоединения к сети удалённых от координатора PAN новых сетевых устройств могут использоваться уже присоединённые к сети FFD в режиме **координатора**. В этом режиме они, как и изначально координатор PAN, «зывают» маяками в сеть новые сетевые устройства. В результате формируется **кластер** из сетевых устройств, которые «слышат» своего координатора. Тем не менее, вся информация о кластере доступна координатору PAN. Подобным образом могут формироваться мультикластеры из сетевых устройств.

При передаче данных между сетевыми устройствами функция координатора сводится к излучению кадров синхронизации доступа к радиоканалу. Эти кадры передаются между сигналами маяков, поэтому временные интервалы между этими сигналами называются кадрами маяков (**Beacon Frame**). Передача данных по сети, однако, может быть организована и без синхронизации доступа.

При передаче пакета данных (**Data Frame**) по сети сетевое устройство преобразует его в кадр данных, включающий адрес назначения, преамбулу для синхронизации, 2 проверочных байта циклического кода (CRC) для обнаружения ошибок и т.п. Максимальный размер кадра составляет 127 байт. Кадр данных может быть зашифрован 128-битным ключом в соответствии со стандартом AES (Advanced Encryption Standard).

Базовые топологии сетей

Функциональные возможности физических устройств позволяют строить сети с двумя базовыми топологиями: Star (звезда) и Peer-to-Peer (равный-равному) (рис.2).

В центре «звезды» – координатор PAN. Все устройства PAN «слышат» лишь координатора PAN и поэтому могут обращаться друг другу только через него.

Примером сети с топологией «звезда» может служить сеть уп-

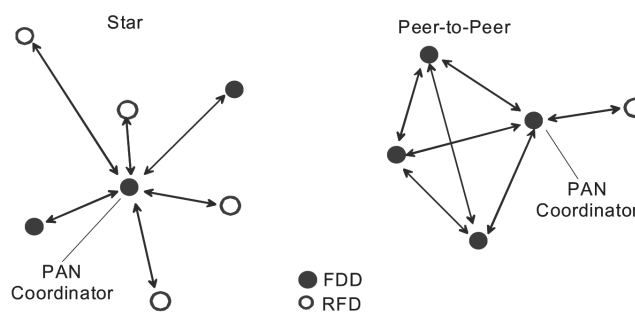


Рис.2. Базовые топологии сетей стандарта IEEE 802.15.4.

равления домашней автоматикой и бытовой аппаратурой. Простейшая сетевая топология «точка-точка» является частным случаем топологии «звезда» при взаимодействии двух устройств и, значит, должна содержать координатор PAN. В несколько иной терминологии это означает, что одно из двух устройств должно быть ведущим (master), другое – ведомым (slave). Взаимодействие этих устройств состоит лишь при выполнении двух условий. Во-первых, у ведущего устройства должен быть адрес PAN. Во-вторых, адрес ведомого устройства (к примеру, инфракрасного сенсора телевизора) «прописан» в памяти у ведущего устройства (пульта управления). «Прописка», то есть присоединение устройства к PAN, может выполняться автоматически. Для этого координатор PAN использует сигналы маяков, которые распознаёт любое сетевое устройство. Распознав эти сигналы, оно посылает запрос на присоединение в сеть. В ответ получает сетевой адрес.

В топологии Peer-to-Peer у каждого сетевого устройства есть несколько **соседей**. Каждого из них оно «слышит» и может с «поговорить с соседом на равных». Поэтому группа соседей может образовать ячейку (**Mesh**), в которой все могут «поговорить» друг с другом. Такая ячейка и приведена на рис. 1. Если, кроме того, устройства постоянно не «спят» и «слушают» своих соседей и не экономят энергопотребление, то сеть из нескольких ячеек может обладать свойством самовосстановления (**Self-healing**) – способностью выявлять и исправлять неисправности в работе сетевых узлов и связей между узлами без вмешательства человека. Эта способность может быть основана на проверке качества линий связи между FFD благодаря постоянному прослушиванию эфира и наличию функции LQI. В такой сети доставка данных может никак не координироваться из центра, а осуществляться по принципу «взаимовыручки» соседей. Сеть, построенная на базе топологии Peer-to-Peer с децентрализованной доставкой данных, называют сетью **Mesh**. Роль координатора PAN сводится лишь к функции первого сетевого устройства, являющегося носителем адреса PAN. Для передачи данных по сети координатор PAN не требуется. Конкретные методы реализации подобных сетей стандартом 802.15.4 не рассматриваются и являются предметом сетевых технологий, к примеру, ZigBee.

Возможность самоорганизации и самовосстановления сети на базе топологии Peer-to-Peer позволяет спонтанно и оперативно создавать сети. Примером может служить сеть, узлы которой представляют FFD с сенсором. Большое число таких узлов, разбросанных по некоторой территории, автоматически формирует сеть. Подключив к одному из FFD центр сбора информации, формируется **сенсорная радиосеть** сбора информации. Если, однако, все сетевые узлы сети (или их большинство) имеют автономное питание, существует проблема ограниченного времени функционирования такой сети (см. раздел «Сети без синхронизации доступа»). Уменьшается оно и с увеличением территории охвата сетью. Тем не менее, существует большое число областей человеческой деятельности, в которых оперативность и отсутствие затрат на координирование является главным критерием. Спонтанно создаваемые сети именуются латинским термином **Ad-Hoc**, что означает «по случаю». Отличительной чертой таких сетей является ограниченная возможность в расширении во времени и в пространстве.

Алгоритмы доступа к радиоканалу

Базовым алгоритмом доступа к радиоканалу является алгоритм доступа на конкурентной основе с обнаружением несущей частоты и предотвращением коллизий (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance, **CSMA/CA**).

В отличие от стандарта 802.11 в алгоритме CSMA/CA отсутствует механизм предварительного запроса канала доступа, при котором сетевое устройство-отправитель перед отправкой информационного кадра сначала делает запрос устройству-получателю на разрешение передачи. Этот механизм в стандарте 802.11 реализуется с использованием двух кадров: кадра готовности отослать RTS (Ready To Send) и кадра готовности принять и CTS (Clear To Send).

Алгоритм CSMA/CA используется как в сетях без синхронизации, так и в сетях с синхронизацией доступа. В полностью асинхронных сетях использование этого алгоритма в сочетании со «спячкой» сетевых устройств мало эффективно. Наличие синхронизации доступа позволяет экономно расходовать энергопотребление сетевых устройств. Кроме того, в сетях с синхронизацией доступа возможно использование сочетания CSMA/CA с доступом на неконкурентной основе. Эта возможность обеспечивается выделением гарантированного временного слота (Guaranteed Time Slot, **GTS**) устройству по предварительному от него запросу.

Сети без синхронизации доступа

Рассмотрим использование алгоритма CSMA/CA в сетях без синхронизации доступа к радиоканалу. В таких сетях передача данных производится при отсутствии сигналов маяков, и по этой причине они называются сетями без маяков (**Not Beacon-enabled PAN**).

Пусть сетевому устройству в случайный момент требуется передать кадр данных. Тогда попытка передачи данных начинается с «прослушивания» эфира.

Если принимается решение о наличии свободного канала (несущая не обнаружена), то через интервал времени, равный некоторому случайному числу из заданного интервала времени T_1 , устройство передаёт кадр данных. Начало времени передачи и выбирается случайным для предотвращения коллизии с кадром данных от другого устройства.

Если было принято решение о том, что канал занят (несущая обнаружена), попытка передачи возобновляется через интервал времени, равный некоторому случайному числу из заданного интервала времени T_2 .

Приём кадра данных может подтверждаться кадром-квитанцией (**Acknowledgement Frame**). Приём считается правильным в случае отсутствия ошибок в кадре данных. Эта проверка производится кодом CRC. Если кадр-квитанция получена с ошибками, попытка передачи кадра данных производится повторно.

Возможен, однако, и режим доступа без кадра-квитанции. Это позволяет снизить энергопотребление, связанное как с передачей этого сигнала, так и с его приёмом. Этот режим доступа называют неполным алгоритмом CSMA/CA.

Отметим, что использование алгоритма CSMA/CA крайне неэффективно в случае передачи данных «просыпающимися» в случайные моменты времени передатчиками, адресованные в основном «спящим» приёмникам. Для сетей с топологией «звезда» это означает, что координатор PAN должен постоянно «слушать» эфир. Для сетей с топологией Peer-to-Peer все сетевые устройства должны постоянно слушать эфир. Иначе говоря, полностью асинхронный и ничем не координированный режим как доступа, так и спячки, несовместим с алгоритмом CSMA/CA.

Сети с синхронизацией доступа

Доступ к радиоканалу в сетях производится под командованием координатора, который периодически излучает сигналы маяков. Такие сети в стандарте названы сетями с маяками (**Beacon-enabled PAN**).

В таких сетях доступ к радиоканалу и расписание «сна» сетевых устройств «привязаны» к сигналам маяков от координатора. На рис.3 приведена временная диаграмма возможного алгоритма предоставления доступа. Временной интервал между двумя сигналами маяков (**Beacon Interval, BI**) от координатора разбит на две части: активную и неактивную (**Inactive**). Во время неактивной части координатор и все остальные устройства могут «спать». Во время активной части координатор разрешает доступ проснувшимся сетевым устройствам. Активная часть (**Active**) носит название **суперкадра (Superframe)**. Длительность суперкадра (**Superframe Duration, SD**) разделена на два интервала. Во время первого интервала (**Contention Access Period, CAP**) предоставляется доступ на конкурентной основе в соответствии с алгоритмом CSMA/CA. Во время второго интервала (**Contention Free Period, CFP**) предоставляется доступ с разведением во времени. При этом устройство получает доступ во время закреплённого за ним временного слота (**Guaranteed Time Slot, GTS**). На рис.3 изображены два таких интервала для разных устройств. Выделение устройству слота предоставляется координатором после предварительного запроса от устройства MAC командой, который делается во время интервала CAP.

Использование алгоритма CSMA/CA при наличии синхронизации имеет особенности, связанные с привязкой случайных параметров алгоритма к временным интервалам (слотам) CAP. Если в на текущем слоте CAP принимается решение о наличии свободного канала (несущая не обнаружена), то кадр данных передаётся в слоте, отстоящим от текущего по номеру на некоторое случайное целое число C_1 . Если было принято решение о том, что канал занят (несущая обнаружена), попытка передачи возобновляется на слоте, отстоящим по номеру от текущего на некоторое случайное целое число C_2 . По этой причине алгоритм носит название слотового CSMA/CA (**slotted CSMA/CA**) в противоположность рассмотренному выше не слотовому алгоритму (**unslotted CSMA/CA**) в асинхронной сети.

Параметры синхронного доступа можно выбирать достаточно гибко в зависимости от требований на энергопотребление координатора, сетевых устройств, времени доставки информационных пакетов и достоверности доставки.

Период **BI** следования сигналов маяков может быть выбран в интервале от 5 мс до 252 с. Он рассчитывается по формуле $BI = BI_{min} * 2^{BO}$, где BI_{min} – минимальный период, BO – число в интервале от 0 до 14. Выбор разумного значения **BI** позволяет экономить энергопотребление координатора.

Длительность суперкадра **SI** можно выбирать достаточно произвольно вплоть до величины **BI**. Очевидно, что с ростом **SI** растёт и достоверность доставки данных при использовании алгоритма CSMA/CA и заданном времени доставки. Платой за эту возможность является рост энергопотребления сетевых устройств.

Длительность суперкадра можно перераспределять между CAP и CFP. Для этого суперкадр поделен на 16 тактовых интервалов (рис.3). Для CFP может быть отведено до 7 последних интервалов. Возможность перераспределения длительности между CAP и CFP удобна для построения сетей, в которых устройства могут передавать несколько типов сообщений. Для примера, в охранных системах к таким сообщениям относятся сигналы мониторинга от охраняемых объектов, сообщения о постановке на охрану, сообщения о взятии на охрану и, наконец, сигналы тревоги. Для подобных систем можно выбрать параметры рассмот-

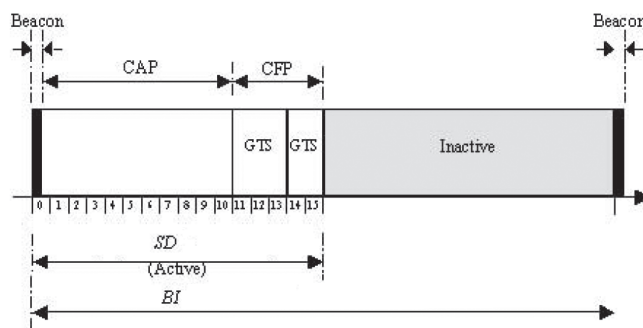


Рис.3. Временная диаграмма при синхронном доступе.

ренного алгоритма доступа в зависимости от числа объектов в сети и требований к вероятностям доставки информационных пакетов.

Наконец, длительность слота GTS может состоять из нескольких тактовых интервалов. При отсутствии необходимости у устройства в GTS оно сообщает об этом координатору и он увеличивает CAP, предоставляя больший временный интервал доступа на конкурентной основе с использованием алгоритма CSMA/CA. Эту операцию можно интерпретировать как **дефрагментацию** суперкадра. Для примера, на рис.4 приведена дефрагментация при удалении интервала GTS2 из CFP.

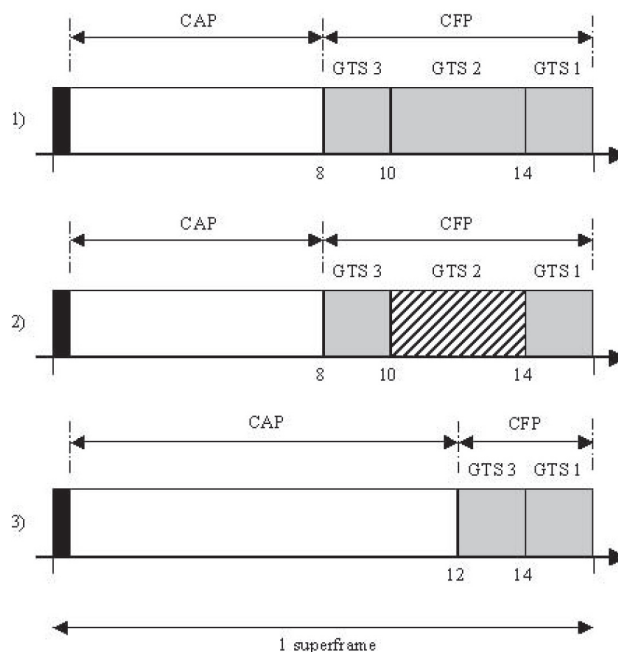


Рис.4. Дефрагментация суперкадра при синхронном доступе.

Итак, стандарт IEEE 802.15.4 является весьма гибким в выборе параметров и позволяет создавать сети, ориентированные как на низкое автономное питание сетевых узлов, так и спонтанно образуемую топологию.

Трансиверы

На рынке трансиверов стандарта IEEE 802.15.4 лидирующие позиции занимают тандем компаний **Chipcon** и **Ember** и компания **Freescale** — отделение компании Motorola по разработке полупроводниковых приборов.

Результатом объединения компаний ChipCon и Ember явилось одно техническое решение трансивера 2420. Микросхемы имеют аббревиату-

Терминология персональных сетей стандарта IEEE 802.15.4

Ad-Hoc network – спонтанно созданная сеть. Отличительной чертой является ограниченная возможность сети в расширении во времени и в пространстве.

Self-organizing – способность сетевых узлов обнаруживать новые сетевые узлы и включать их в существующую сетевую структуру без вмешательства человека.

Self-healing – способность сети выявлять и исправлять неисправности в работе сетевых узлов и связей между узлами без вмешательства человека.

FFD (Full Function Device) – устройство с полным набором функций устройств стандарта IEEE 802.15.4. Устройство способно взаимодействовать с несколькими устройствами в сети. Может работать в трёх режимах: координатор PAN, координатор и простое сетевое устройство (device).

Coordinator PAN – полнофункциональное устройство, являющееся диспетчером PAN и формирующее адрес PAN.

Coordinator – полнофункциональное устройство, периодически передающее сигналы маяков (Beacons).

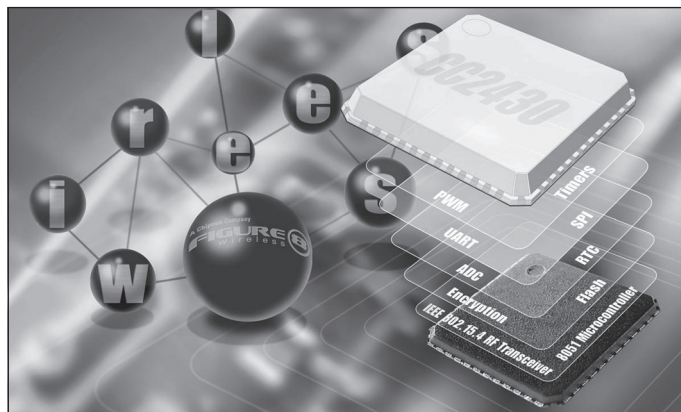
RFD (Reduced Function Device) – устройство с ограниченным набором функций устройств стандарта IEEE 802.15.4. Может взаимодействовать только с полнофункциональным устройством.

Beacon-enabled PAN – персональная сеть, включающая по меньшей мере одно устройство, которое периодически передаёт кадры синхронизации (Beacon Frames).

Non-beacon-enabled PAN – персональная сеть, в которой нет ни одного устройства, которое бы периодически передавало кадры синхронизации (Beacon Frames).

ры CC или EM в зависимости от завода изготовителя. Трансивер позволяет использовать контроллер вместе с программным обеспечением стека протоколов ZigBee.

В конце 2005 года компания Chipson объявила о выпуске двух изделий CC2430 и CC2431 – однокристальных систем (System-on-Chip, **SoC**) 802.15.4/ZigBee, не требующих контроллера. В систему CC2431 дополнительно встроена радиометка (Radio Frequency Identification, **RFID**) – миниатюрный приёмо-передатчик с антенной. Компания Ember также объявила о выпуске SoC EM250.



Однокристальная система (SoC) компании Chipson: трансивер стандарта IEEE 802.15.4, управляемый сетевым протоколом ZigBee.

Компания Freescale выпускает трансивер MC13193, позволяющий использовать программное обеспечение стека протоколов ZigBee. Трансиверы MC13191/2 предполагает разработку сетевого уровня разработчиком сети.

Радиомодули для сенсорных сетей на базе трансиверов стандарта IEEE 802.15.4

MICAz – радиомодули компании **Crossbrow** с сетевым стеком протоколов ZigBee.

Представляют собой трансиверы стандарта IEEE 802.15.4 компании Chipson и аналогово-цифровой сенсорный интерфейс. Автоматически соединяются с соседним сетевым узлом, как маршрутизаторы. Радиомодули могут использоваться с датчиками температуры, освещённости, биомедицинскими, сейсмическими, акустическими и магнитными датчиками. Компания Crossbrow выпускает также и другие модули для построения сенсорных сетей, которые в силу своего размера называют **notes** (пылинки). Большинство этих модулей предполагает использование сетевого протокола XMesh компании Crossbrow.

SmartMesh – радиомодули компании **Dust Networks**, использующие трансиверы стандарта IEEE 802.15.4 и аналогово-цифровой сенсорный интерфейс. Используют сетевой стек протоколов, отличный от ZigBee.



Радиомодули 802.15.4/ZigBee

XBee – радиомодули компании

MaxStream. Представляют 802.15.4/ZigBee полностью автономные трансиверы и трансиверы и с последовательным интерфейсом RS-232 и USB интерфейсом. В диапазоне 2,4 ГГц при мощности излучения 100 (1) мВт дальность действия при прямой видимости до 1200 (100) м. Полная поддержка создания Ad-Hoc сетей.



IP-Link – радиомодули компании

Helicomm. Представляют 802.15.4/ZigBee трансиверы для построения сети с топологией «звезда» с координированием от компьютера.



Модуль ZigBee USB

Dongle компании **Integration** с USB интерфейсом. Представляет 802.15.4/ZigBee трансивер.



Изделия для сенсорных радиосетей NE на базе стандарта IEEE 802.15.4

Модули компании **Millenial Net** представляют трансиверы со встроенным аналогово-цифровым сенсорным интерфейсом. Протокол **MeshScope** компании Millenial Net поддерживает сети, состоящие из конечных узлов («end node») и маршрутизаторов («mesh node»). Сеть управляется компьютерным шлюзом («MeshGate»). Протокол считается ZigBee подобным.