КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВЫХ СЕТЕЙ

ДЖО ТИЛЛИСОН (JOE TILLISON), директор отдела технологий, Avnet Electronics Marketing

Дальнейшее распространение интеллектуальных систем по управлению энергопотреблением и большое количество недорогих микроконтроллеров стимулируют рост беспроводных датчиковых сетей с исполнительными механизмами (WSAN), которые находят широкое применение, в т.ч. в системах автоматизации домов, освещения и телемедицине. В статье [1] рассматриваются некоторые основные концепции построения беспроводных датчиковых сетей и протоколов, основные элементы узлов и некоторые важные особенности их использования.

Сети WSAN обеспечивают простое и экономичное решение по установке устройств распределенного контроля и управления, позволяя избежать необходимости в дорогостоящем обновлении проводных систем. Однако отсутствие достаточного опыта проектирования РЧ-систем и пугающее изобилие протоколов беспроводной связи продолжают оставаться главными препятствиями на пути разработчика приложений.

Сети WSAN (см. рис. 1) состоят из небольших распределенных устройств, которые обеспечивают три основных функции: контролируют физические условия и состояние окружающей среды (часто – в реальном времени), в т.ч. температуру, давление, освещенность и влажность; управляют такими устройствами как коммутаторы и электроприводы, отслеживающими эти условия; обеспечивают эффективную и надежную связь по беспроводным сетям.

Реализация последней функции является самой уникальной для этих сетей. Поскольку они предназначены для приложений мониторинга и контроля с невысокой скоростью трафика, эти сети не поддерживают, например, Wi-Fi. Типовые скорости передачи данных в датчиковых сетях находятся в диапазоне 20 Кбит/с…1 Мбит/с. Следовательно, они потребляют намного меньше энергии, что, в свою очередь, позволяет реализовать небольшие сетевые узлы с батарейным питанием.

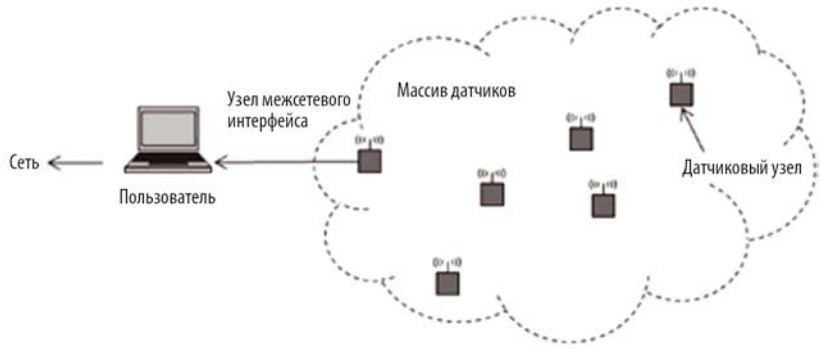

Рис. 1. **Беспроводная датчиковая сеть с исполнительными механизмами**

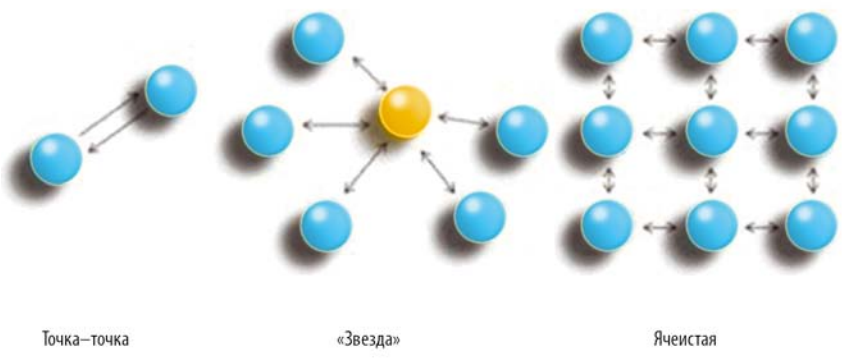

Рис. 2. **Базовые топологии беспроводной сети**

Датчиковые сети, как правило, являются самоорганизующимися и самовосстанавливающимися. Самоорганизация позволяет новому узлу автоматически присоединиться к сети без вмешательства оператора, а функция самовосстановления позволяет узлам найти альтернативные каналы в обход отказавших узлов. Эти функции реализуются в соответствии с сетевой топологией, действующим протоколом по управлению сети и определяют ее гибкость, масштабируемость, стоимость и рабочие характеристики.

В беспроводных датчиковых сетях применяются три топологии: «точка-точка», «звезда» (точка-многоточка) и ячеистая (см. рис. 2). Топология «точка-точка» представляет собой выделенный канал между двумя точками и, по сути, не образует сеть. Звездообразные сети объединяют ведомые узлы типа «точка–точка», управление которыми осуществляется с помощью ведущего узла, обеспечивающего также передачу исходящих данных.

Управляющие узлы, объединяясь с другими главными узлами, образуют сеть с топологией «звезда» в разных конфигурациях кластерного типа (см. рис. 3).

Одним из недостатков звездообразной топологии является то, что если происходит сбой в работе главного узла, перестает работать вся подчиненная ему сеть. В ячеистой топологии у каждого узла имеется несколько каналов связи с каждым другим узлом, что обеспечивает наибольшую отказоустойчивость и гибкость такого решения. В большинстве ячеистых сетей используется псевдоячеистая тополо-

гия с равноправными каналами связи и маршрутизацией. Сообщения проходят по сети, где применяется алгоритм маршрутизации со многими перескоками, который оптимизируется по минимальной задержке или минимальному энергопотреблению. Поскольку каждый узел в ячеистой сети должен иметь информацию о других узлах, которая указывается в таблицах маршрутизации, объем памяти и времени обработки служебных сигналов в сетях с этой топологией больше.

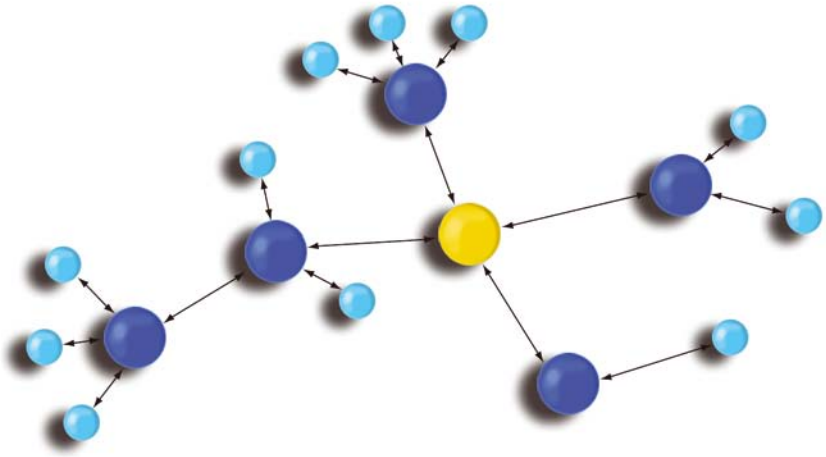

Рис. 3. **Кластерное «дерево» – расширенная топология «звезда»**

РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ ПРОТОКОЛАМИ

Протокол сетевого управления определяет вид поддерживаемой топологии и способ реконфигурации сети при добавлении или удалении узлов. Протоколы отличаются друг от друга специфическими процессами, используемыми при формировании сети, ее автоматической настройке, маршрутизации и т.д. Помимо таких широко распространенных протоколов как ZigBee и WirelessHART существуют десятки соперничающих друг с другом несовместимых протоколов, у каждого из которых имеются свои преимущества и недостатки. Многие из этих протоколов являются фирменными разработками. В то время как протоколы, поддерживаемые принятым отраслевым стандартом, обеспечивают совместимость изделий разных производителей, некоторые протоколы собственной разработки учитывают такие специфические требования к рабочим характеристикам как простота реализации сети, отказоустойчивость или безопасность передачи данных. С другой стороны, необходимость периодического обновления протокола фирменной разработки привязывает заказчика к одному производителю.

Следует понимать, что не существует единого стандарта для беспроводных датчиковых сетей, как, например, в случае с Wi-Fi-сетями для передачи данных. Напротив, некоторые протоколы появляются де-факто как стандарты для определенных приложений. Например, стандарт ZigBee был создан в мае 2003 г., а его ратификация состоялась в конце 2004 г. Ныне это главный стандарт для интеллектуальных энергосетей и систем автоматизации частных домов и зданий.

WirelessHART является расширением принятого (проводного) протокола HART (Highway Addressable Remote Transducer – адресуемый дистанционный магистральный преобразователь), используемого в промышленных системах автоматизации и поддерживаемого Альянсом HART. Стандарт ISA100.11a, также применяемый в промышленных приложениях, позволяет создать единую беспроводную инфраструктуру, учитывающую возможность ее адаптации к любому типу проводных промышленных сетей, например, Can, Modbus, FieldBus, ProfiBus, HART и т.д. Возможно даже, что протокол 6LoWPAN, продвигаемый Альянсом IPSO (IP for Smart Objects – IP-протокол для «умных» объектов), позволит подключать небольшие встраиваемые устройства в IPv6-сети. Этот стандарт определяет уровень адаптации IP-протокола, который учитывает небольшой размер памяти устройств с ограниченными ресурсами.

В мае 2010 г. организации ZigBee Alliance и IPv6 Forum установили стратегическое партнерство с альянсом IPSO Alliance с целью ускорить принятие стандарта для «умных» объектов IP-сетей в рамках концепции «интернета вещей». Поскольку датчиковый узел располагается в том месте, где необходимо контролировать конкретный параметр, физические размеры и энергопотребление этого узла, как правило, невелики. К числу базовых компонентов датчикового узла относятся микроконтроллер, память, РЧ-модуль, интерфейс датчика/исполнительного механизма, источник питания, встроенное программное обеспечение, в т.ч. сетевой стек протоколов (см. рис. 4).

Стек представляет собой набор программных модулей, которые выполняют на МК определенный протокол. Это

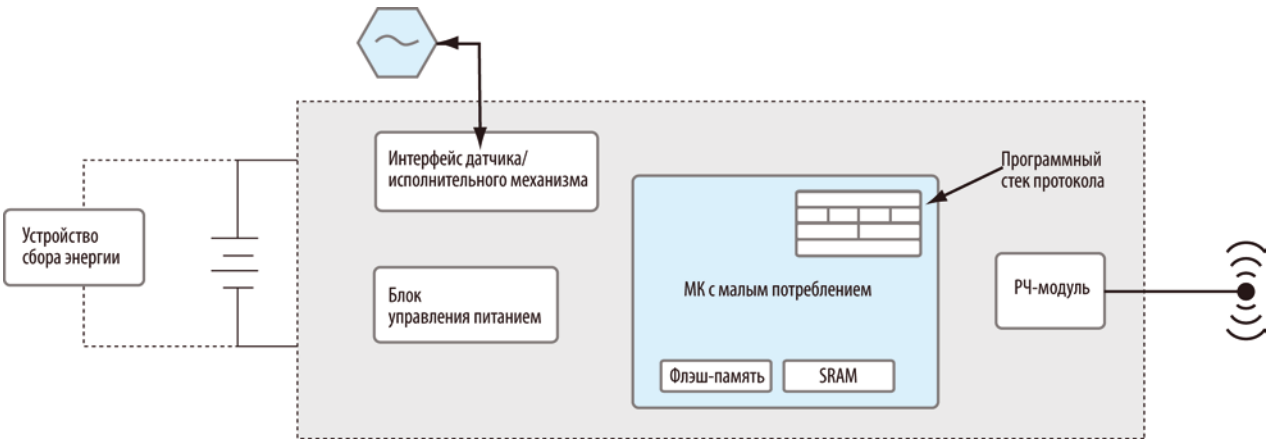

Рис. 4. **Структурная схема датчикового узла**

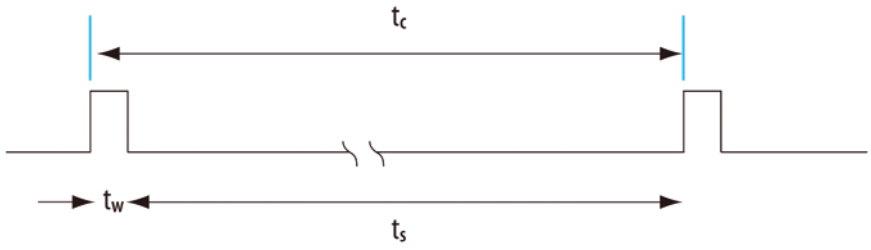

Рис. 5. **Средняя потребляемая мощность датчикового узла**

важный элемент датчиковой системы. Поскольку в сенсорных узлах используются, как правило, микроконтроллеры с низким энергопотреблением, стек протокола должен быть небольшим по объему и эффективным, т.е. занимать 64–128 Кбайт внутренней памяти МК, которая также используется прикладными программами датчиков.

Стеки оптимизируются в соответствии с нуждами конкретных приложений, например, по совместимости между разными стандартами, энергоэффективности, скорости исполнения команд, объему памяти, архитектуре МК и т.д. Поставщики микроконтроллеров, как правило, бесплатно предлагают заказчикам своих изделий проверенные и сертифицированные стеки, совместимые по стандартам ZigBee и 6LoWPAN, а также более простые стеки собственной разработки.

Основу стандартного беспроводного сенсорного или исполнительного узла составляет миниатюрный микроконтроллер с низким энергопотреблением. Поскольку часто питание сенсорных узлов батарейное, потреблением МК необходимо тщательно управлять. Большинство протоколов датчиковых сетей предусматривает управление узлами с малоактивным рабочим циклом. Чтобы выполнить определенную задачу, узлы через каждые несколько минут выходят из состояния сна на десятые доли миллисекунд. Поскольку МК проводит до 99,9% срока службы в состоянии сна, количество потребляемого им тока в этом режиме является критичным параметром.

Ток потребления многих микроконтроллеров, предлагаемых в настоящее время на рынке, в состоянии сна составляет доли 1 мкА. Не меньшее внимание уделяется и тому, чтобы эти устройства потребляли как можно меньше энергии в активном режиме и обеспечивали высокое быстродействие. Микроконтроллеры должны быстро выходить из состояния сна, оперативно выполнять требуемые задачи с использованием протокола связи и возвращаться в спящий режим как можно быстрее, чтобы время их нахождения в активном состоянии было минимальным.

Из рисунка 5 видно, что средняя потребляемая мощность датчикового узла определяется его характеристиками и соотношением времени в активном и спящем режимах.

$$Pavg = \frac{P_w t_w + P_s t_s}{t_c},$$

$$t_s \gg t_w$$

АККУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ИЗ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аккумуляция энергии из окружающей среды становится все более распространенным средством, обеспечивающим питание беспроводных датчиковых узлов. Хотя датчик может годами работать, питаясь от литиевой батареи CR2032, техническое обслуживание большой беспроводной сети с сотнями датчиков является непростым делом.

Устройства для сбора энергии позволяют решить эту проблему. Например, стандартный фотоэлектрический элемент, установленный в офисе с освещенностью 300 лк, обеспечивает выходную мощность величиной 50 мкВт.

Пьезоэлектрические устройства для сбора энергии вибраций в диапазоне 50–200 Гц непрерывно выдают мощность порядка нескольких мВт. В сочетании с небольшими перезаряжаемыми аккумуляторными батарейками эти устройства могут эффективно использоваться для питания датчиковых узлов с относительно небольшой длительностью включения.

РЧ-трансивер является другим критичным компонентом беспроводной датчиковой сети. Как и микроконтроллер, трансивер должен быть энергоэффективным, чтобы его работа существенно не сократила срока службы батарей. Трансивер должен характеризоваться малым потреблением в спящем режиме, в режиме приема, иметь программируемый уровень мощности при передаче данных и функцию пробуждения по таймеру.

В настоящее время получили широкое распространение трансиверы, в состав которых входят все необходимые РЧ-цепи – фильтры, усилители, миксеры, модулятор/демодулятор и т.д.

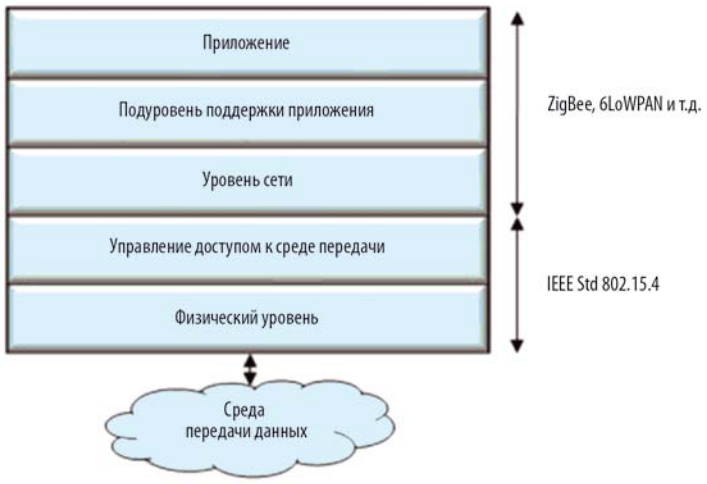

Рис. 6. **Стек протоколов, использующий IEEE Std 802.15.4**

Таблица 1. **Физические параметры IEEE Std 802.15.4-2006**

PHY, МГц	Диапазон частот, МГц	Модуляция	Каналы	Разнесение каналов, МГц	Скорость потока, Ксимв./с	Скорость передачи символов, Ксимв./с	Символы
868	868–868,6	BPSK	1	–	20	20	двоичные
868	868–868,6	ASK	1	–	250	12,5	20-бит PSSS
868	868–868,6	O-QPSK	1	–	100	25	16-ричные ортогональные
915	902–928	BPSK	10	2	40	40	двоичные
915	902–928	ASK	10	2	250	50	5-бит PSSS
915	902–928	O-QPSK	10	2	250	62,5	16-ричные ортогональные
2450	2400–2483,5	O-QPSK	16	5	250	62,5	16-ричные ортогональные

в одном небольшом корпусе. Эти трансиверы работают в субгигагерцовом и ISM-диапазонах с использованием схем модуляции FSK, OOK, BPSK и QPSK. В спецификации трансивера указывается чувствительность приемника и мощность передатчика при разных скоростях передачи данных (в единицах дБм, где дБм = 10log(P/1 мВт)). Разность между этими двумя параметрами в первом приближении позволяет определить бюджет РЧ-канала между узлами сети.

2,45-ГГц канал связи с бюджетом 85 дБ на канал обеспечивает передачу данных в радиусе 200 м в полевых условиях прямой радиовидимости. Внутри помещений радиус связи уменьшается до 10 м из-за поглощения радиоволн и влияния условий распространения. Сенсорному узлу требуется либо антенна, установленная на кристалл с помощью технологии поверхностного монтажа, либо антенна, встроенная в печатную плату.

Многие важные аспекты реализации РЧ-блока в значительной мере могут усложнить его проектирование. К счастью, поставщики ИС и модулей производят изделия, которые существенно упрощают эту задачу.

Одним из особенно заслуживающих внимания устройств для построения беспроводных датчиковых сетей является радиомодуль стандарта IEEE 802.15.4. Это устройство с малым радиусом действия и широким диапазоном частот обеспечивает скорость передачи данных до 250 Кбит/с в 16 каналах, используя одну из трех полос ISM и несколько схем модуляции. Устройство, главным образом, предназначено для работы в крупных ячеистых сетях с малым потреблением и низкими скоростями передачи данных. Этот модуль поддерживает ZigBee, WirelessHART, 6LoWPAN, а также многие другие протоколы собственной разработки. В таблице 1 перечислены характеристики физического уровня IEEE Std 802.15.4-2006.

Стандарт IEEE определяет требования к физическому (PHY) уровню и к управлению доступом к среде передачи (Media Access Control, MAC), тогда как определение верхних уровней управления сетью осуществляется в соответствии с требованиями конкретного приложения.

2,45-ГГц физический уровень, который работает в нелицензируемом диапазоне частот, использует схему модуляции O-QPSK и расширение спектра методом прямой последовательности (DSSS) с 32-бит псевдослучайными кодовыми последовательностями. Эта комбинация обеспечивает отказоустойчивость при возникновении сосредоточенных помех и позволяет ослабить эффект замирания из-за многолучевого распространения. Стандарт IEEE предусматривает сосуществование с устройствами 802.11 и Bluetooth, которые также работают в 2,4-ГГц диапазоне. Несколько производителей поставляет радиомодули, совместимые со стандартом 802.15.4, по цене менее 3 долл.

Полупроводниковые компании предлагают СнК с высокой степенью интеграции, оптимизированные для работы в датчиковых сетях. Как правило, эти устройства оснащены малопотребляющими микроконтроллерами ARM Cortex-M3 и радиомодулями стандарта IEEE 802.15.4. На рынке, похоже, складывается тенденция к появлению запрограммированных устройств со стеками протокола на базе ПЗУ, что в еще большей мере упрощает проектирование программного обеспечения. Поставщики модулей пошли дальше, предложив полнофункциональные беспроводные решения в виде миниатюрного модуля, в состав которого входят микроконтроллер, радиопередатчик, стек протокола и даже антенна. Эти протестированные решения отвечают требованиям FCC/ETSI.

Привлекательность предлагаемых на рынке модулей в том, что они обеспечивают заметную экономию расходов по сравнению с устройствами собственной разработки (в случае если компания-разработчик самостоятельно проектирует РЧ-модуль и занимается его тестированием). Исходя из того, что цена готовых модулей составляет 10–20 долл., а на долю соответствующего списка расходных материалов приходится 2/3 этой стоимости, разработка собственного решения экономически оправдана при объеме производства свыше 50 тыс. изделий.

Подводя итоги, следует заметить, что датчиковые беспроводные сети с исполнительными механизмами обеспечивают удобные и экономически выгодные способы реализации интеллектуального контроля. Выбор того или иного метода построения сети связан с большим числом компромиссов и функций. Гибкость сети, ее производительность и устойчивость к динамическим изменениям определяются сетевой архитектурой и протоколом.

Поскольку в сетях WSAN используется множество разных протоколов, выбор одного из них сопряжен с определенными компромиссами. При этом такие протоколы как ZigBee, WirelessHART и 6LoWPAN получили более широкое распространение, чем остальные. К счастью, производители поставляют не только решения, которые обеспечивают поддержку достаточно большого количества протоколов, имеют уже протестированные программные стеки для микроконтроллеров с малым энергопотреблением, РЧ-микросхемы, совместимые со многими стандартами, но и предлагают полностью интегрированные и предварительно сертифицированные модули для реализации беспроводных датчиковых сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Joe Tillison. An introduction to wireless sensor network concepts//www.eetimes.com.