

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ

МАЛЫЕ СИСТЕМЫ – БОЛЬШИЕ БАКСЫ

Если революция в электронике привела к созданию умных (смарт) игрушек и смарт бомб, то почему бы не появиться и "смарт пыли" (smart dust) – полностью функциональной сети сенсорных устройств, малые размеры и стоимость которых позволят разместить тысячи их на подлежащей контролю площади? И действительно, так называемая "смарт пыль" – прозвище, данное беспроводным сенсорным сетям, уже стала реальностью. Исследовательские работы, начатые в середине 90-х годов, наконец, принесли плоды в виде сетевых узлов размером с почтовую марку. Эти миниатюрные узлы, названные "крошками" (moten), могут объединять разнообразные датчики и устройства передачи собранной ими информации нуждающимся в ней пользователям. В 2004 году начались контрольные испытания smart dust технологии. "Пожарная цепочка" крошечных объединенных в сети датчиков, вероятно, в конечном итоге сможет отслеживать любое событие, в любое время и в любом месте. И многие крупные и малые фирмы, а также университеты стремятся сделать мир (и все, что на нем) умнее.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ "КРОШЕК"

Технология беспроводных сетей датчиков – одна из передовых компьютерных сетевых технологий, которая может привести к формированию рынка, оцениваемого во многие миллиарды долларов. Разработка технологии, которая первоначально ассоциировалась с научной фантастикой, повествующей об интеллектуальных сетях, опутывающих все: от стен дома до карманных компьютеров, проводилась несколькими университетами. Самыми успешными оказались исследования профессора университета штата Калифорния в Беркли Кристофера Пистера, привлекшие внимание DARPA (Управления перспективных разработок МО). Реализация идеи привела к появлению таких новых компаний, как Dust Networks (www.dustnetworks.com), образованной К.Пистером при поддержке Центральной информационной службы Управления In-Q-Tel (независимой неприбыльной организации, финансирующей разработки передовых технологий), и Crossbow Technologies (www.xbow.com).

Идея smart dust сети с уникальными свойствами и датчиками вызвала интерес компаний, входящих в альянс ZigBee – консорци-



В.Майская

ума, образованного фирмами Ember, Freescale Semiconductor, Honeywell, Invensys, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips Electronics и Samsung с целью реализации на основе открытого стандарта беспроводных сетей мониторинга и управления с малой потребляемой мощностью. Сегодня в консорциум входят более 100 компаний-изготовителей систем, датчиков и микросхем, в том числе Analog Devices, Atmel, Cisco Systems, Crossbow Technologies, Dust Networks, LG, Microchip, Nanotron Technologies, NEC, Oki, Omron, Texas Instruments. Компании, входящие в альянс, на основе выпущенного в сентябре 2003 года стандарта IEEE 802.15.4 на физический и MAC уровни маломощных радиоустройств, работающих в ISM-диапазоне частот (2,4 ГГц) и передающих данные со скоростью в несколько десятков бит в секунду на расстояние 15–20 м, смогут активно участвовать в формировании новой ниши рынка – изделий для беспроводных сенсорных сетей.

Крошки – гигантский скачок в сравнении с традиционными сенсорными устройствами, используемыми для измерения всевозможных параметров среды. Стоимость традиционного сенсорного устройства, требующего электрической проводки, может достигать 200–400 долл., тогда как уже сегодня одна крошка стоит ~100 долл. А затраты на формирование инфраструктуры значительно ниже (прокладка проводов традиционной сенсорной системы стоит ~70–100 долл./м, создание беспроводной инфраструктуры – ~10 долл./м). В будущем же стоимость крошек по мере увеличения объема потребления и совершенствования характеристик может упасть до 10 долл. По оценкам аналитической компании In-Stat Group, к 2006 году продажи беспроводных датчиков смогут достичь 625 млн. долларов. Компания по маркетинговому исследованию рынка Harbor Research оценивает продажи беспроводных датчиков в 2009 году в более чем 1 млрд. долл. Согласно прогнозам фирмы IBM, рынок беспроводных сенсорных сетей к 2007 году достигнет 6 млрд. долларов.

КАК "КРОШКИ" РАБОТАЮТ

Назначение узлов, или крошек smart dust сети, – сбор, анализ и хранение данных, на основе которых принимается разумное решение. Миниатюрная инфраструктура smart dust сети рассматривается как инфраструктура сенсорной сети с малой скоростью передачи информации небольшого объема. Беспроводные сенсорные узлы малой площади содержат датчики, фиксирующие изменения температуры, давления, влажности, уровня освещенности, звука и магнитного поля; источник питания; устройства обработки и передачи данных, а также программные сетевые средства и прикладные программы, объединенные в единую кремниевую платформу.

Сбор и хранение данных не имеет смысла, если их нельзя передать заинтересованным пользователям. Самые популярные систе-

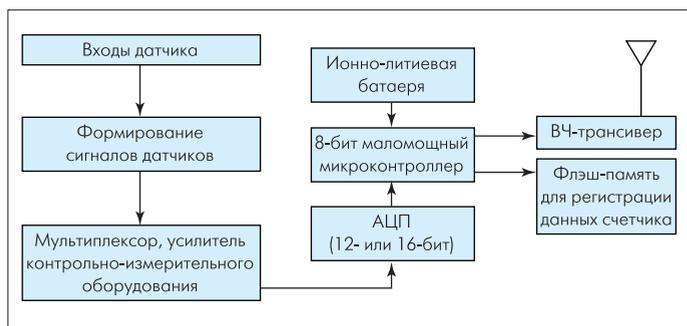


Рис. 1. Функциональная блок-схема узла беспроводной сенсорной сети со средствами регистрации данных и ВЧ-устройством двунаправленной передачи

мы передачи – высокочастотные и оптические, каждая со своими достоинствами и недостатками. В случае высокочастотной передачи сетевые крошки содержат микропроцессор и трансивер, объединенные с датчиками, антенной и источником питания (рис. 1). Основные требования, предъявляемые к узлам smart dust сети, – малые габариты и, следовательно, малая потребляемая мощность (на уровне микроватт). Вот почему разработчики компании Dust Networks обратились к ячеистой беспроводной сенсорной сети – SmartMesh, в которой, по крайней мере между двумя узлами, имеется несколько каналов связи. Электронная "пожарная цепочка" сети передает сообщение от узла к узлу, добавляя свои данные (если они есть), пока оно не достигнет базовой станции, а затем и центрального компьютера. При этом для передачи данных от одного узла к соседнему требуется значительно меньшая мощность, чем при коммуникации между двумя конечными узлами. Сеть SmartMesh состоит из трех компонентов: самого узла, в который входят антенна, батарея, датчики и актюатор, разработанные фирмами, специализирующимися в области сенсорной технологии; устройства управления, или сетевого интерфейса, и программного обеспечения – операционной системы и прикладной программы, обеспечивающих выбор маршрута передачи, синхронизации, оптимизации работы сети. Прикладная программа может выполняться частями, причем части программы различных узлов могут отличаться друг от друга. Стандартные операционные системы, такие как Windows или Unix, для столь малых крошек слишком велики и требуют слишком мощных процессоров. Поэтому в Университете в Беркли была разработана чрезвычайно компактная сетевая ОС – TinyOS, отличающаяся высокой степенью модульности. Благодаря модульному исполнению несущественные для данного узла модули программы удаляются, оставляя в памяти узла больше места для хранения данных датчика (объем памяти, занимаемой программой, не превышает 4 Кбайт). Программное обеспечение сенсорной сети позволяет каждому узлу при поступлении данных "пробуждаться" на доли секунды для передачи информации ближайшему соседнему узлу. Как правило, узлы отключены в течение ~10 с и включаются для сбора данных на несколько миллисекунд (длительность интервалов включения/отключения задается при интеграции крошек в основное оборудование). В результате большая часть устройств узла отключена, функционирует лишь генератор тактовых сигналов и несколько таймеров. Благодаря такой экономии энергозатрат узел может функционировать без замены батареи до пяти лет. Если конфигурация сети изменяется из-за выхода одного из узлов из строя, падения его напряжения питания или воздействия радиопомех, встроенная логика остальных узлов вносит поправки и пересылает сообщение ближайшему работающему узлу сети. Все это обеспечивает высокую надежность сети.

Вспомогательная программа TinyDB предназначена для обработки запросов с целью извлечения информации из TinyOS-сети.

В сети компании Dust Networks узлы работают в шумоподобном режиме со скачкообразной перестройкой частоты в диапазоне 902–928 МГц. Расстояние между узлами составляет 30–60 м в помещении и до 150 м вне помещения.

Однако из-за малых размеров крошек размер антенны также должен быть мал, и передачу данных необходимо вести на высокой частоте. А это не всегда совместимо с требованием малой потребляемой мощности. К тому же, ВЧ-трансиверы – достаточно сложные устройства со схемами модуляции и демодуляции, полосовыми фильтрами. А для передачи данных большого числа узлов требуются дополнительные схемы мультиплексной передачи с временным, частотным или кодовым разделением. Все это существенно усложняет задачу снижения потребляемой мощности до требуемого уровня в несколько микроватт. Поэтому более привлекательна оптическая связь.

Со стороны нисходящей линии оптической связи модулированный сигнал может передаваться набору узлов-крошек единичным лазерным передатчиком. Приемник узла содержит полосовой оптический фильтр, фотодиод, предусилитель и слайсер. Со стороны восходящей линии связи для передачи сообщений можно использовать лазерный передатчик. Но при этом потребляемая мощность достаточно велика. Чтобы ее снизить, можно использовать направленный пучок и устройство активного управления пучком, что усложняет конструкцию крошки. Эту проблему можно решить за счет применения пассивного, выполненного на базе МЭМС-структуры оптического передатчика, т.е. устройства, обеспечивающего передачу модулированных оптических сигналов без затрат энергии. Такая структура предложена разработчиками Калифорнийского университета в Беркли. Она представляет собой кубический уголкового ретрорефлектора (Corner-Cube Retroreflector – CCR) с тремя взаимно перпендикулярными гранями (зеркалами). При облучении ретрорефлектора удаленным лазером падающий на него свет отражается под углом 180°. Основа структуры – МЭМС-актюатор, обеспечивающий изменение положения одного из зеркал и тем самым модуляцию сигнала с быстродействием 10 Кбит/с. Узел smart dust сети с оптической связью так же, как и ВЧ-аналог, содержит сенсорную, обрабатывающую, приемную секции и источник питания. Приемник со стороны восходящей линии связи содержит формирователь изображения, выполненный на основе линзы и ПЗС или КМОП-матрицы датчиков изображения (рис. 2). Помимо приема информации датчиков, ее фильтрации и хранения полученной выборки в памяти, узел опрашивает оптический приемник для обнаружения поступающих сообщений, которые могут содержать новые команды или отклики на предыдущие сообщения.

Благодаря малой длине волны видимого света или ближнего ИК-излучения (400–1600 нм), на которых работают такие оптические передатчики и приемники, приборы миллиметрового размера могут формировать узкий пучок излучения. Другое достоинство работы на малых длинах волн – возможность приемника базовой станции, оснащенного малогабаритным формирователем изображения, декодировать данные, передаваемые одновременно большим числом узлов, расположенных в разных местах поля обзора приемника, т.е. возможность работы в режиме уплотнения с пространственным разделением. В результате конструкция крошек и протоколы системы значительно упрощаются. Для успешного приема данных такой системой необходимо лишь, чтобы узлы не блокировали линию прямой видимости друг друга (а это благодаря их

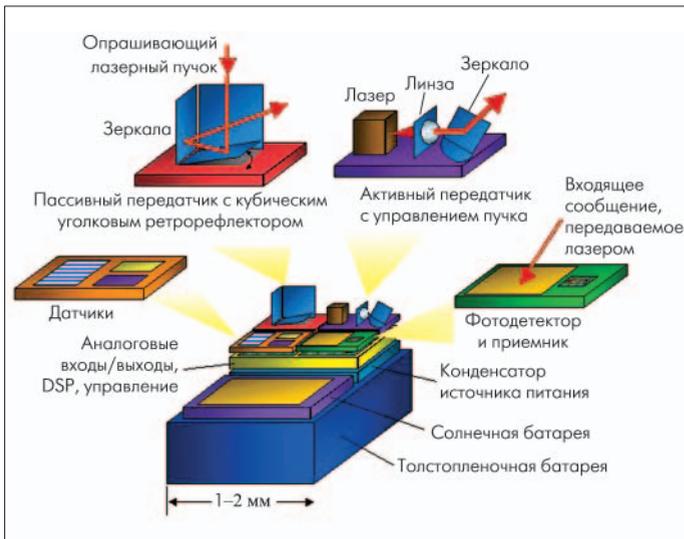


Рис.2. Структура узла беспроводной сенсорной сети с оптической связью

малым размерам практически невозможно), а также чтобы данные различных узлов формировались различными элементами изображения.

На конференции института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике 2002 года, посвященной сенсорам, разработчики описали автономный узел сенсорной сети с питанием от солнечной батареи, обеспечивающий двухстороннюю оптическую связь и занимающий объем 16 мм³. Узел преобразует сигналы датчиков в цифровую форму и передает/принимает данные, передаваемые оптическим излучением в свободном пространстве. В узел входят три микросхемы (рис.3):

- КМОП-специализированная схема ASIC-типа, содержащая светочувствительный датчик, генератор на частоту 3 МГц, оптический приемник, 8-бит АЦП и контроллер (конечный автомат);
- КНС-микросхема солнечной батареи с несколькими выходами;
- кубический угольный МЭМС-ретрорефлектор (см. рис.3).

Максимальное быстродействие АЦП составляет ~100 Квыборок/с, энергия, затрачиваемая на одну выборку, – 360 пДж/с, мощность в режиме ожидания – 41 пВт при напряжении питания 1 В, ширина полосы пропускания – 2,5 кГц. Оптический приемник содержит фотодетектор, схемы обработки аналогового сигнала, цифровой блок восстановления синхронизации и логику для декодирования входящих пакетов данных. Приемник обнаруживает сигналы мощностью до 50 нВт (полный размах), что соответствует ин-

тенсивности 1,25 мкВт/мм². Мощность, потребляемая приемником в рабочем состоянии, составила 26 мкВт при напряжении 2,1 В или 69 пВж/бит при скорости приема 375 Кбит/с. Кольцевой генератор, интегрированный в ASIC-микросхему, потреблял 1,5 мкВт при напряжении 1 В и частоте 3,9 МГц.

CCR изготавливался на КНИ-подложке, поверх которой нанесен слой поликремния толщиной 50 мкм, позволяющий получить плоские гладкие отражающие поверхности. Для улучшения коэффициента отражения зеркал на этот слой осаждалась пленка золота толщиной 50 нм. CCR обеспечивал передачу данных с быстродействием выше 4 Кбит/с на расстояние до 180 м. Потребляемая энергия составила 16 пДж/бит, что намного лучше, чем у беспроводных ВЧ-систем, скажем, Bluetooth (энергия передачи на расстояние несколько десятков метров – 1 нДж/бит).

Матрица солнечных элементов также изготавливалась на КНИ-подложке площадью 2,6 мм². При этом размер элементов матрицы зависел от вырабатываемого напряжения – 1 В для питания цифровых схем и АЦП, 2 В для аналоговых схем приемника и 3,8 В для CCR. Выход батареи при ярком солнечном свете составил 1 мВт/мм² (1 Дж/день/мм²) и 1 мкВт/мм² при ярком комнатном освещении. Эффективность батареи – 10–12%. Для питания узла использовался лазер на длину волны 810 нм, для передачи сообщений и данных – лазер на 660 нм. Чтобы блокировать питающее излучение при передаче, поверх фотодиода приемника монтировался высокочастотный фильтр.

Разработчики сообщили о новом КНИ/КМОП-процессе, который позволит формировать элементы узла на двух кристаллах и создать крошку объемом 6,6 мм³.

НАЧИНКА "КРОШЕК"

Как бы многообещающе ни звучала технология smart dust сетей, производителям датчиков и микросхем будет нелегко получить прибыль на рынке, уже "породившем" ряд новых фирм, которые успешно разрабатывают содержимое "смарт пыли". Это, помимо уже упоминавшихся фирм Crossbow Technologies и Dust Networks, – компании Chipcon (Норвегия), Millennial Net, Ember (США). Кроме того, в узлах сенсорных сетей широко используются имеющиеся на рынке маломощные изделия крупных компаний-лидеров полупроводниковой и сенсорной техники – Honeywell, National Semiconductor, STMicroelectronics, Samsung, Texas Instruments, Analog Devices. По оценкам экспертов, около 30 изготовителей микросхем стремятся выйти на рынок устройств, отвечающих требованиям консорциума ZigBee и, следовательно, изготовителей беспроводных сенсорных сетей. Еще дюжина компаний производит датчики, работающие с радиоустройствами стандарта IEEE 802.815.4.

Пожалуй, сегодня самые универсальные приборы для беспроводных сенсорных сетей предоставляет компания Crossbow Technologies, частично инвестируемая фирмой Intel и проводящая разработки совместно с Калифорнийским университетом в Беркли. Компания выпустила уже третье поколение модулей семейства MICA – малогабаритной платформы для беспроводных сенсорных сетей. Плата процессора/ВЧ-трансивера MPR4x0CB

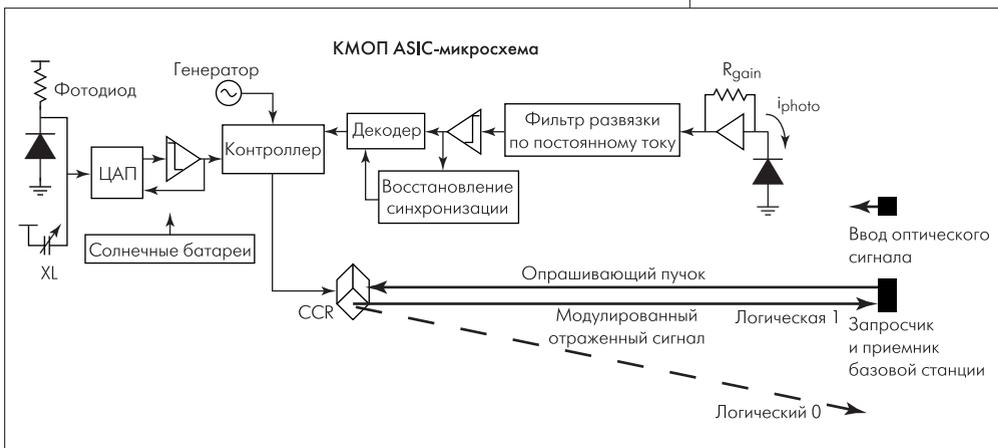


Рис.3. Блок-схема автономный узла сенсорной сети с питанием от солнечной батареи

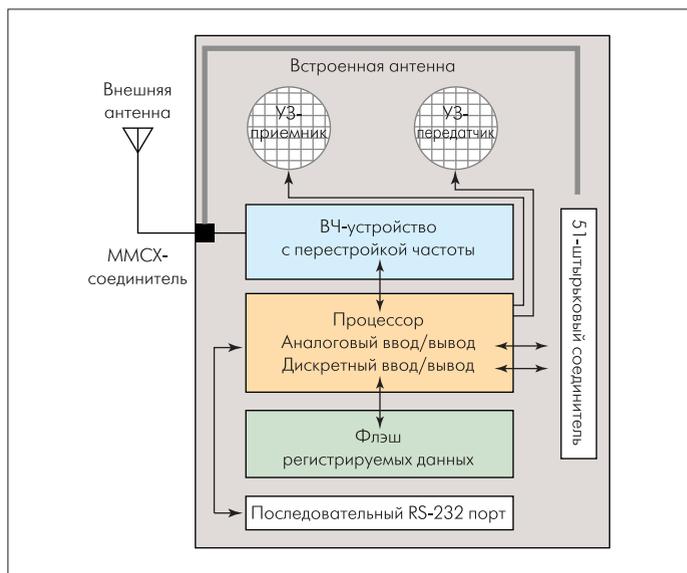


Рис.4. Блок-схема модуля MCS410CA

третьего поколения MICA2 выполнена на основе 8-бит микропроцессора ATmega128L компании Atmel, работающего с ОС TinyOS v.1, хранимой во флэш-памяти емкостью 128 Кбайт. Емкость флэш-памяти данных, способной хранить данные более 100 тыс. измерений, – 512 Кбайт, емкость ЭСРПЗУ – 4 Кбайт. Ток, потребляемый в рабочем режиме, равен 8 мА, в режиме ожидания – менее 15 мкА. Многоканальный трансивер платы может работать на частоте 868/916 (тип MPR400CB), 433 (тип MPR410CB) или 315 МГц (тип MPR420CB). Скорость передачи данных для всех моделей составляет 38,4 Кбод. Число программируемых каналов 4/50. Мощность на ВЧ от -20 до +10 дБм, чувствительность приема сигнала -98 и -101 дБм, дальность передачи вне помещения – более 150/300 м. Потребляемый ток при полной мощности передачи – 27–25 мА, в режиме приема – 10–8 мА и в режиме ожидания – менее 1 мкА. Работает модуль от двух батарей AA типа. Габариты – 58x32x7 мм, масса – 18 г (без батарей). 51-выводной соединитель, предназначенный для подключения различных плат датчиков и устройств сбора данных, также выпускаемых компанией, поддерживает аналоговые входы модуля, интерфейсы DIO, I²C, SPI, UART.

Последняя модель модуля узла-крошки MCS410CA, или Cricket Mote, представляет собой вариант модуля MICA2, содержащий помимо всех его аппаратных средств УЗ-передатчик и приемник (рис.4). Модуль может быть конфигурирован как "слушатель" и как "радиомаяк". В первом случае модуль крепится на мобильных объектах и принимает ВЧ-сигналы маяка, после чего ожидает соответствующего импульса УЗ-сигнала, на основе которого и определяет расстояние до соответствующего маяка. Алгоритмы корреляции ВЧ- и УЗ-отсчетов обеспечивают отличную точность определения расстояния.

Компания Crossbow выпускает и достаточно широкую номенклатуру сенсорных плат. В качестве примера можно привести разработанную в Берклиском университете плату сбора данных MDA300CA, содержащую датчик температуры/влажности. Благодаря многофункциональному прямому пользовательскому интерфейсу модуль предоставляет удобное и простое решение формирования узлов, используемых в сетях контроля состояния окружающей среды и естественной среды обитания. В модуле предусмотрены разнообразные средства связи и управления, в том числе семь несимметричных или три дифференциальных канала 12-бит АЦП, четыре прецизионных дифференциальных АЦП-канала, шесть кана-

лов цифрового ввода/вывода, 64-Кбит ЭСРПЗУ данных калибровки датчика, два релейных канала (один в обычном режиме закрыт, второй открыт) (рис.5). Плата совместима с модулями семейства MICA2, работа его поддерживается ОС TinyOS.

ВЧ-трансивер во многих разрабатываемых современных узлах сенсорных сетей выполнен на базе микросхемы компании Ember (www.ember.com), образованной в 2001 году при поддержке DARPA специалистами Массачусетского технологического института. Трансивер EM2420 с лицензируемым стеком построения сети с 16 каналами шириной 5 МГц работает в диапазоне 2,4 ГГц. Чувствительность при приеме пакета данных превышает -90 дБм при 1%-ной интенсивности появления ошибок. Выходная мощность составляет -32–0 дБм, скорость передачи данных -250 Кбит/с, мощность, потребляемая в рабочем режиме, – 30 мВт, в режиме ожидания – 1 мкВт, напряжение питания при использовании стабилизатора – 2–3,6 В, при использовании стабилизированного источника питания – 1,6–2 В. Расстояние прямой видимости равно 75 м. Микросхема также выполнена по 0,18-мкм КМОП технологии и монтируется в такой же корпус, как и CC2430.

Сигнал, принимаемый микросхемой, усиливается малошумящим усилителем и затем передается квадратурному преобразователю с понижением частоты до промежуточного значения. I/Q сигнал фильтруется, усиливается и преобразуется АЦП. Принятые данные хранятся в 128-байт FIFO-памяти приемника, считываются они через SPI-интерфейс. Передатчик микросхемы EM2420 выполняет функцию непосредственного преобразования с повышением частоты. Данные хранятся в 128-байт FIFO-памяти передатчика (выполненной отдельно от аналогичной памяти приемника). Цифровой сигнал преобразуется ЦАП и через ФНЧ поступает на квадратурный преобразователь с повышением частоты, усиливается усилителем мощности и поступает на антенну.

Микросхема EM2420 разработана совместно с норвежской компанией Chipcon (www.chipcon.com) – одним из ведущих производителей ВЧ-микросхем с высокими характеристиками и малой потребляемой мощностью, работающих с низкой скоростью передачи данных. В ноябре 2004 года компания объявила о создании первой системы-на-кристалле CC2430, соответствующей стандарту IEEE 802.15.4 и пригодной для применения в беспроводных системах Zigbee, в том числе и в сенсорных сетях, работающих в ISM-диапазоне. Микросхема сочетает отличные характеристики популярного трансивера CC2420 разработки 2003 года (малую потребляемую мощность, высокую чувствительность, высокую помехоустойчивость) с ядром популярного 8-бит микроконтроллера 8051,

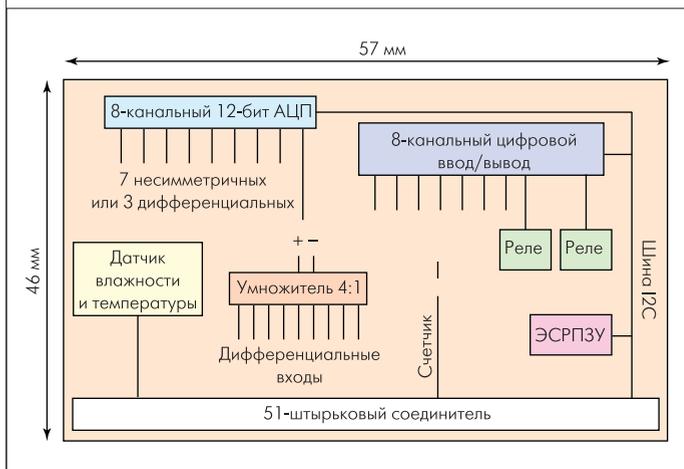


Рис.5. Блок-схема модуля сбора данных MDA300CA

флэш-памятью емкостью 128 Кбайт, 8-Кбайт ОЗУ и с множеством других полезных устройств, в том числе с АЦП, несколькими таймерами, сопроцессором кодирования в коде AES-128, UART-интерфейсом, сторожевым таймером, таймером режима ожидания с кристаллическим генератором на 32 кГц, 21 программируемым выводом входа/выхода. Ток потребления системы-на-кристалле в режимах передачи и приема не превышает 27 мА. Выполнена микросхема СС2430 по 0,18-мкм КМОП-технологии. Монтируется в 48-выводной корпус типа QLP размером 7x7 мм. Компания начнет поставки опытных образцов микросхемы во втором квартале 2005 года. Начальная цена при закупке миллионных партий составит не более 4 долларов.

Следует отметить, что для системы, состоящей из крошек малых размеров, традиционные источники питания могут оказаться неприемлемыми. Поэтому разработчики крошек изучают возможности применения специальных батарей: на основе конденсаторов, солнечных батарей и даже изотопов. Так, ученые Корнельского университета создали батарею объемом 1 мм³, способную служить источником энергии в течение десятилетий за счет извлечения энергии радиоактивных изотопов, например Ni⁶³.

Специалисты компании MicroStrain (www.microstrain.com) – ведущего разработчика и изготовителя узлов беспроводных сенсорных сетей – намерены использовать в качестве источника энергии сетевых крошек механические напряжения, изобилующие в зданиях, где, по-видимому, и будет реализовано большинство сенсорных сетей. Созданию таких источников способствуют достижения в области совершенствования пьезоэлектрических материалов, позволившие создать монокристаллические волокна с эффективностью преобразования энергии более 90%. Чтобы извлечь достаточ-

ную электрическую энергию из пьезоэлектрического материала площадью 17 см², укрепленного на перекладине, подвергающейся механическим нагрузкам, специалистами компании MicroStrain создано устройство управления возбуждаемой энергией, выполненное на основе конденсатора. Узел беспроводной сети отключен до тех пор, пока устройство не зарегистрирует пороговое напряжение конденсатора, равное 9,5 В, после чего передатчик начинает передачу кодированных ЧМ-сигналов на частоте 418 МГц. Ток, потребляемый при передаче данных на расстояние до 500 м, составляет 12 мА при напряжении 3 В. При регистрации снижения порогового напряжения система управления отключает передатчик. Для накопления заряда до требуемого порогового напряжения необходимо 20–80 с. Отмечается, что опытное устройство выполнено на имеющихся в продаже компонентах. Так, для регистрации уровня напряжения использовался маломощный компаратор компании Liner Technology.

О перспективности технологии smart dust говорит интерес, проявленный к ней компанией Intel, которая обычно не играет на рынках, где ключ к успеху – разработка и производство небольших, недорогих чипов. По мнению руководителя исследовательского отделения Intel Г. Мюллера, компанию, поставляющую полный комплект микросхем, датчиков и программного обеспечения, несомненно ждет успех на этом рынке. Правда, полностью сформируется этот рынок еще не скоро. Но, в конце концов, настанет время, когда высокоскоростные магистрали будут усыпаны крошками, предотвращающими столкновения, когда мосты будут посылать сообщения о сейсмических нагрузках, а сети видеокамер – выхватывать террориста из толпы. Но для достижения всего этого придется пройти еще большой путь. ○