

БЕСПРОВОДНЫЕ ОДНОКРИСТАЛЬНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ. Часть 1

АЛЕКСАНДР КАЛАЧЕВ, доцент кафедры вычислительной техники и электроники, Алтайский государственный университет, kalachev@phys.asu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Для беспроводного обмена данными во всем мире предоставляются т.н. нелицензируемые радиочастотные диапазоны, или полосы ISM (Industrial, Scientific, Medical), отводящаяся для устройств систем автоматизации, научных приборов, сетей сбора данных, медицинского оборудования.

ISM-диапазоны используются в системах автоматизации и дистанционного управления для дома и офиса, контроля параметров удаленных объектов, управления производственными процессами, в системах коммерческого учета, в беспроводных датчиках систем охраны и безопасности, в системах освещения, бытовой электронике и радиоуправляемых устройствах.

В Российской Федерации на основании решений Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) для этих целей выделены частотные диапазоны 125—134 кГц, 13,56 МГц, 433,075—434,750 МГц, 868,0—868,2 МГц, 868,7—869,2 МГц, а также диапазон 2400—2483,5 МГц. Эти частоты могут использоваться без оформления соответствующего разрешения ГКРЧ при условии соблюдения требований по ширине полосы, излучаемой мощности (до 10 мВт для 434 МГц, до 25 мВт для 868 МГц и 100 мВт для 2,4 ГГц) и назначению готового изделия.

Беспроводные сети применяются для организации связи как в пределах здания, так и вне помещений, а также на подвижных объектах.

На программном уровне, на рынке беспроводных систем представлено несколько протоколов для сетей датчиков, обеспечивающих надежную связь, поддерживающих сети различных топологий и позволяющих сократить энергопотребление сетевых узлов.

Беспроводные решения могут использоваться для организации беспроводной связи с помощью пользовательских протоколов передачи данных либо для реализации решений, использующих стандартные сетевые стеки связи на основе спецификации IEEE 802.15.4 или решений фирм-производителей компонентов для беспроводных систем. Так, стандарт IEEE 802.15.4 является основой для таких

приложений как ZigBee RF4CE (бытовая электроника), поддерживающих профиль дистанционного управления (ZRC) или профиль устройств ввода (ZID). На базе стандарта IEEE 802.14.5 строятся стеки протоколов ZigBee, ZigBee PRO и других ZigBee PRO-совместимых беспроводных сетей, таких как сети автоматизации помещений (ZHA), автоматизации зданий (ZBA), управления освещением (ZLL) или интеллектуального распределения электроэнергии (ZSE). Стандарт IEEE 802.15.4 также используется для реализации коммуникационного уровня протокола IPv6/6LoWPAN для маломощных беспроводных систем.

ВЫЗОВЫ И ТРЕБОВАНИЯ РЫНКА

Появление и развитие стандартов постоянно расширяет сферу применения беспроводных технологий. Внедрение систем автоматики и автоматизации, несмотря на кажущуюся порой избыточность, показало свою эффективность. В основе этого лежат разветвленные сети датчиков, управляемых узлов и механизмов. Даже для небольшого автоматизированного объекта их количество может превышать несколько сотен. Более того, современные задачи автоматизации требуют прозрачного машинного взаимодействия, развитых сервисов, взаимодействия с базами данных и даже пользовательского интерфейса. Основными критериями разработчиков при выборе элементной базы становятся энергопотребление, радиочастотные характеристики (чувствительность приемника, выходная мощность передатчика) и объем памяти, доступный приложениям. Оптимизация стратегии энергопотребления с учетом особенностей приложения важна для систем с автономным питанием. Не последним требованием является и безопасность передаваемых данных.

Производители беспроводных компонентов предлагают и развивают три подхода к построению беспроводных узлов.

Подход первый — приемопередатчик совместно с управляющим микроконтроллером. В этом случае микроконтроллер отвечает за работу сетевого стека и прикладных задач. Приемопередатчик подключается к контроллеру через SPI или UART-интерфейс.

Вторым вариантом является применение систем-на-кристалле, содержащих в одном корпусе и приемопередатчик, и микроконтроллер. Процессорное ядро контроллера при этом также выполняет и стек протоколов, и приложения. Данное решение является более компактным, требует меньшего количества компонентов.

И в том, и в другом случаях при отладке приложения необходимо отслеживать работу и стека протоколов, и приложения. Кроме этого, некорректная работа приложения может привести к прекращению выполнения процедур стека протоколов, и, как следствие, выходу узла из сети, что в свою очередь может повредить выполнению распределенного приложения в целом. Аналогично, ошибки в работе стека протоколов могут привести к зависанию микроконтроллера или прекращению выполнения приложения. Узел, в таком случае, перестает выполнять свои функции.

Третьим вариантом является решение прикладной задачи и стека протоколов на разные микроконтроллеры: один из контроллеров выполняет прикладную задачу, а контроллер с интегрированным беспроводным интерфейсом, или т.н. сетевой процессор, выполняет сетевые задачи — подключение к сети, маршрутизация, передача данных. Данные решения предлагаются как для общепринятых стандартов (например, сети ZigBee, 6LoWPAN или Bluetooth), так и для проприетарных протоколов.

ОДНОКРИСТАЛЬНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

Многофункциональные однокристальные беспроводные решения обеспечивают возможность удовлетворения самых высоких требований потребителей при одновременном увеличении гибкости приложений, сокращении количества необходимых компонентов и занимаемого места на печатной плате. На сегодняшний день на рынке однокристальных беспроводных микроконтроллеров присутствуют несколько фирм: Atmel, Freescale Semiconductor, Microchip, Nordic, NXP,

Silicon Laboratories, ST Microelectronics, Texas Instruments. Условия достаточно сильной конкуренции вынуждают компании постоянно совершенствовать архитектуру систем-на-кристалле, оптимизировать параметры приемопередатчиков, режимы энергосбережения, развивать программное обеспечение, предлагая программные библиотеки, стеки протоколов, среды и средства разработки.

Аппаратные возможности микроконтроллеров беспроводных систем-на-кристалле отличаются друг от друга как по разрядности обрабатываемых данных, так и по максимальным рабочим частотам. Представлены 8-, 16-, и даже 32-бит процессорные ядра.

Достаточно часто в качестве управляющих микроконтроллеров, в беспроводных системах-на-кристалле встречаются общепринятые стандартные процессорные ядра, такие как 8-бит ядра архитектуры x51 и 32-разрядные ARM-ядра. В ряде случаев фирмами предлагаются законченные решения — беспроводные системы сбора данных, интегральные датчики физических величин.

ОДНОКРИСТАЛЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СУБГИГАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Для частот менее 1 ГГц разрешенные диапазоны в различных странах могут отличаться, и не всегда существует возможность использовать одну элементную базу, хотя предлага-

емые компаниями решения чаще всего являются достаточно универсальными в плане выбора частоты передачи. Преимущества субгигагерцового диапазона касаются лучшей дальности устойчивой работы по сравнению с частотами диапазона 2,4 ГГц при одинаковой выходной мощности передатчика, уменьшению влияния препятствий на прохождении сигнала, что особенно актуально для работы внутри зданий и офисных помещений.

Системы-на-кристалле для данного диапазона предлагаются фирмами Freescale Semiconductor, Microchip, Nordic Semiconductor, Silicon Laboratories, Texas Instruments.

FREESCALE SEMICONDUCTOR

Freescale Semiconductor [1] представлена СнК MC12311 (см. рис. 1) на базе 8-бит малопотребляющего контроллера HCS08, который соединен с приемопередатчиком, поддерживающим несколько типов модуляции сигнала, включая OOK, FSK, GFSK и MSK. Интегрированный приемопередатчик поддерживает широкий диапазон частот, включая 315, 433, 470, 868, 915, 928 и 960 МГц и скорости передачи данных 1,2—300 Кбит/с. Максимальная чувствительность в режиме приема при скорости передачи данных 1,2 Кбит/с составляет -120 дБм. Высокая селективность каналов обеспечивается КИХ-фильтром 16-го порядка. Поддерживается аппаратное вычисление контрольных сумм, шифрование данных (AES128), присутствует 66-байт FIFO-буфер.

Периферийные устройства включают в свой состав 10-канальный 12-бит АЦП, два аналоговых компаратора, генератор с частотой 243 КГц $\pm 0,2\%$ (погрешность при изменении напряжения в пределах $\pm 0,5\%$). Микроконтроллер системы-на-кристалле MC12311 сохраняет работоспособность при напряжениях питания в диапазоне 1,8...3,6 В при максимальных рабочих частотах от 20 (при напряжении питания 1,8...2,1 В) до 50 МГц (3,6 В). Примечательно, что производительность приемопередатчика не зависит от напряжения питания системы. Дополнительно присутствуют встроенный датчик температуры и индикатор разряда батареи.

Интегрированная однокорпусная система серии МРХУ8300 представляет собой датчик давления, ускорения и температуры, интегрированные с беспроводной системой-на-кристалле на базе 8-бит контроллера семейства S08 и передатчиком субгигагерцового диапазона.

МРХУ8300 включает в себя датчик давления, датчик температуры, датчики ускорения (оси X, Z), подключенные к 10-бит АЦП (см. рис. 2).

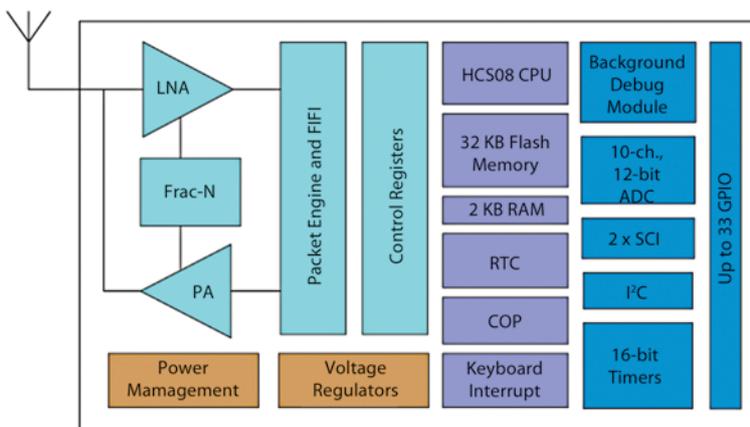


Рис. 1. Структурная схема MC12311

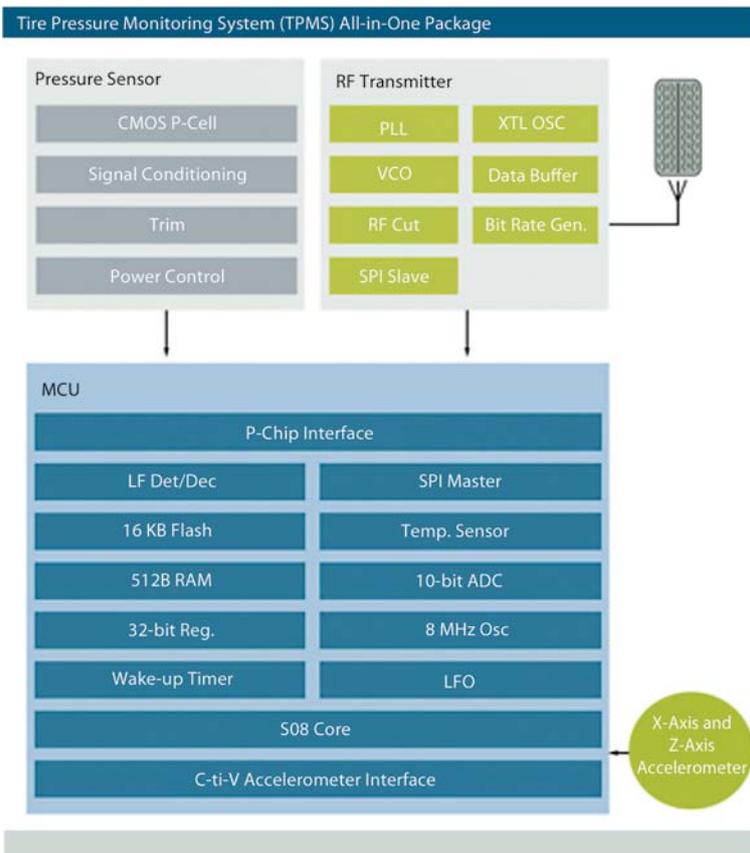


Рис. 2. Структурная схема датчика давления и ускорения МРХУ8300 с беспроводным интерфейсом

Передатчик MPXY8300 работает в диапазонах 315/434 МГц, поддерживает амплитудную и фазовую модуляции. Он предназначен, прежде всего, для систем мониторинга давления в реальном режиме времени, в частности, давления в шинах во время движения. Точность измерения давления составляет ± 10 КПа в диапазоне 100—800 кПа при температуре 0—70°C.

Для интеллектуальных энергосетей субгигагерцового диапазона Freescale Semiconductor предлагает беспроводной микроконтроллер Kinetis KW01. Он поддерживает работу в диапазонах 315, 433, 470, 868, 915, 928 и 960 МГц с модуляцией сигнала GFSK, MSK, GMSK и OOK.

В основе Kinetis KW01 (MKW01Z128) находится процессорное ядро ARM Cortex-M0+, работающее на тактовой частоте до 48 МГц при потреблении порядка 40 мкА/МГц (см. рис. 3). Этот микроконтроллер, оснащенный 128 Кбайт флэш-памяти и 16 Кбайт статической оперативной памяти, потребляет в режиме ожидания около 1,7 мкА (в режиме останова — менее 100 нА), а возвращение к активному режиму осуществляет за 4,3 мкс.

MKW01Z128 поддерживает работу в диапазонах частот 290—340, 424—510 и 862—1020 МГц, несколько режимов модуляции — FSK, GFSK, MSK, GMSK и OOK. Возможные скорости передачи данных: 1–600 Кбит/с (FSK-модуляция). Максимальная чувствительность приемника достигает –120 дБм (при скорости 1,2 Кбит/с), диапазон выходной мощности передатчика: –18...17 дБм.

К числу периферийных устройств Kinetis KW01 относятся 16-канальный 16-бит АЦП, высокоскоростной аналоговый компаратор с 6-бит АЦП, 12-бит ЦАП, 5 многоканальных таймеров, набор последовательных интерфейсов, 16-канальный датчик прикосновения.

Программное обеспечение для Kinetis KW01 включает в себя проприетарные и стандартные протоколы 6LoWPAN, WMBUS (EN13757-4), KNX и ECHONET. Беспроводной микроконтроллер KW01 может использоваться в качестве сетевого процессора, обрабатывающего младшие уровни сетевого протокола, а также в парной работе с контроллером, выполняющим прикладные задачи. Возможности процессорного ядра и встроенной памяти позволяют строить на базе Kinetis KW01 полнфункциональные автономные узлы сенсорных сетей, совмещающих в себе работу в сети, обработку внешних событий, работу с периферийным оборудованием.

MICROCHIP

Ассортимент беспроводных контроллеров компании Microchip на текущий момент представлен серия-

ми PIC12F529T***, PIC12LF1840T39A, rfPIC12F675*, PIC16LF1824T39A [2].

Серии PIC12F529T39, PIC12LF1840T39A и PIC12F529T48 обладают практически идентичными характеристиками за исключением рабочих диапазонов частот. Трансиверы PIC12F529T39 и PIC12LF1840T39A работают в диапазонах 310, 433, 868 и 915 МГц, PIC12F529T48 418, 433 и 868 МГц.

Микроконтроллер систем PIC12F529T *** обладает встроенным прецизионным генератором на 8 МГц ($\pm 1\%$), несколькими режимами энергосбережения, несколькими таймерами, линиями ввода-вывода. Встроенные трансиверы обеспечивают скорости передачи данных до 100 Кбит/с при FSK-модуляции и до 10 Кбит/с до в режиме модуляции OOK. Выходная мощность: 0 дБм или 10 дБм.

8-бит RISC-контроллер с 12-бит инструкциями обеспечивает высокую производительность (преимущественно, однократное исполнение команд) при высокой плотности кода (выигрыш порядка 2:1 по отношению к контроллерам с 8-бит командами). Средства разработки и поддержки беспроводных PIC-контроллеров диапазона включают макроассемблер, программный симулятор, программаторы.

Основными областями применения являются беспроводные системы управления персонального пользования, системы безопасности, низкочастотные удаленного управления.

Серии rfPIC12F675* отличает 8-рядный микроконтроллер семейства PIC, приемопередатчик на 290—350/380—450/850—930 МГц (литеры K, F, H, соответственно) обеспечивает поддержку модуляций ASK и FSK, имеет компактный 20-выводной корпус. Среди периферийных устройств —

4-канальный 10-бит АЦП, одноканальный аналоговый компаратор, 128-байт EEPROM. Трансивер поддерживает скорости передачи данных до 40 Кбит/с при выходной мощности до 10 дБм.

Системы серий PIC16LF1824T39A (см. рис. 4) на базе 8-разрядного RISC-микроконтроллера семейства PIC, приемопередатчик диапазонов 310, 434, 868, 815 МГц обеспечивает поддержку модуляций OOK и FSK, имеет компактный 20-выводной корпус. Периферийные устройства — 12-канальный 10-бит АЦП, два аналоговых компаратора, встроенный источник опорного напряжения (выходные напряжения 1,024, 2,048, 4,096 В), 5-бит ЦАП. Трансивер поддерживает скорости передачи данных до 100 Кбит/с (режим FSK; в режиме OOK — до 10 Кбит/с) при выходной мощности 0 или 10 дБм.

NORDIC SEMICONDUCTOR

Система-на-кристалле nRF9E5 компании Nordic Semiconductor [3] предназначена для работы в диапазонах 433/868/915 МГц, включает в себя приемопередатчик, 8-бит микроконтроллер на базе ядра x51 с 256 байт оперативной памяти, 512 байт ПЗУ с предпрошитым загрузчиком, 4 Кбайт памяти программ, выполненной по технологии оперативной памяти (см. рис. 5). Выполняемая программа размещается во внешнем последовательном ПЗУ (SPI-флэш) и при старте загружается во внутреннюю память. Набор периферийных устройств содержит последовательные интерфейсы (SPI, UART), 4-канальный 10-бит АЦП, набор таймеров, ШИМ-контроллер.

Трансивер nRF9E5 поддерживает все возможности приемопередатчика nRF905, включая технологию ShockBurst с автоматической поддержкой распознавания преамбу-

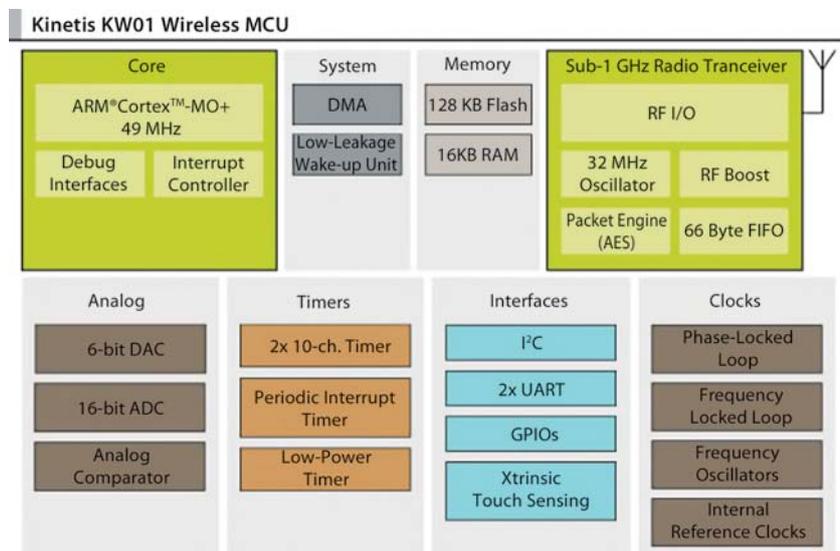


Рис. 3. Структурная схема беспроводных контроллеров семейства Kinetis KW01

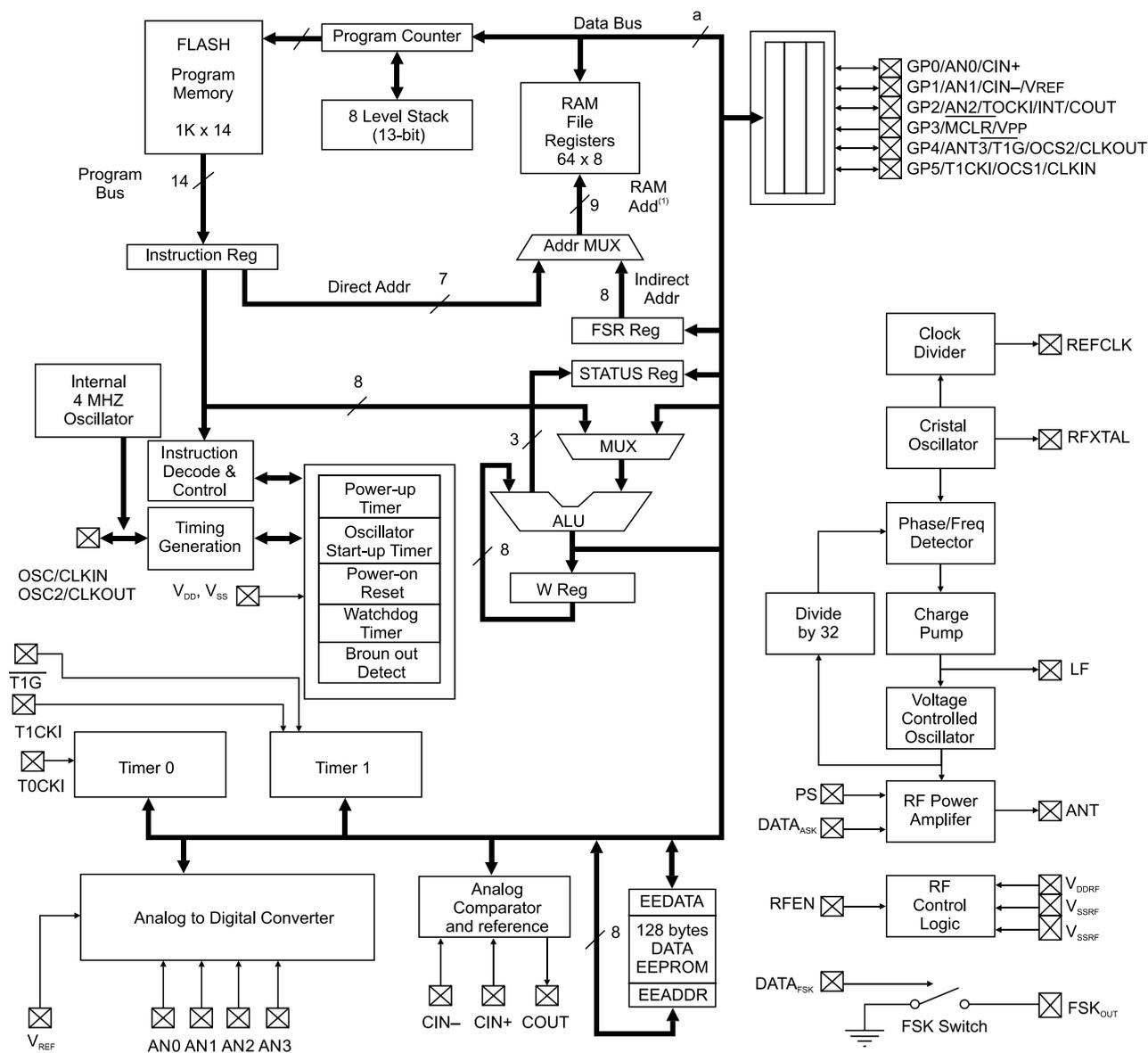


Рис. 4. Структурно-функциональная схема PIC16LF1824T39A

лы, адреса, вычисления контрольной суммы. nRF9E5 содержит встроенный стабилизатор напряжения, повышающий устойчивость системы к шумам и обеспечивающий стабильную работу в диапазоне напряжений 1,9...3,6 В. Четыре возможных варианта выходной мощности передатчика: -10, -2, 6 и 10 дБм, чувствительность приемника порядка -100 дБм, скорость передачи данных — до 50 Кбит/с.

SILICON LABORATORIES

Silicon Laboratories располагает одним из наиболее обширных assortиментов однокристальных беспроводных систем субгигагерцового диапазона. Предлагаются серии Si4010, Si100x, Si101x [4]. Все они в качестве управляющего содержат ядро контроллера архитектуры x51.

Схема включения Si4010 из внешних компонентов предполагает наличие только развязывающего конденсато-

ра, антенны, средств взаимодействия с пользователем (например, кнопки).

Внутренний генератор, основанный на генераторе Si500, который не требует внешних резонаторов и времязадающих цепей, обеспечивает точность ± 150 ppm в коммерческом диапазоне температур и ± 250 ppm — в промышленном, что является достаточным для большинства областей применения. Трансивер с управляемым усилителем (с выходной мощностью до 10 дБм) способен работать в диапазоне частот 27–960 МГц.

Микроконтроллер Si4010 (см. рис. 6) содержит 512 байт внутренней памяти данных, 4 Кбайт оперативной памяти, 8 Кбайт однократно программируемого ПЗУ, 128 бит EEPROM, 12-Кбайт библиотеку ПЗУ-функций и аппаратный ускоритель шифрования (AES-128).

Контроллеры беспроводных систем серий Si100x, Si101x (см. рис. 7) располагают 32 или 64 Кбайт флэш-памяти,

выходная мощность трансиверов достигает 13/20 дБм. Серии Si1004/Si1005, Si1014/Si1015 содержат встроенный повышающий импульсный преобразователь (DC/DC, эффективность до 90%), позволяющий полностью использовать ресурсы автономного источника питания. Выходная мощность встроенного преобразователя достигает 250 мВт, что позволяет питать не только микроконтроллер, но и другие внешние компоненты.

Однокристальные решения серии Si102x/3x совмещают в себе функции энергосбережения микроконтроллеров F96x и приемопередатчик субгигагерцового диапазона EZRadioPRO, ориентированные на применения во встраиваемых системах с батарейным питанием.

В микросхеме интегрирован малопотребляющий счетчик импульсов, способный работать в спящем режиме без использования ресурсов процессор-

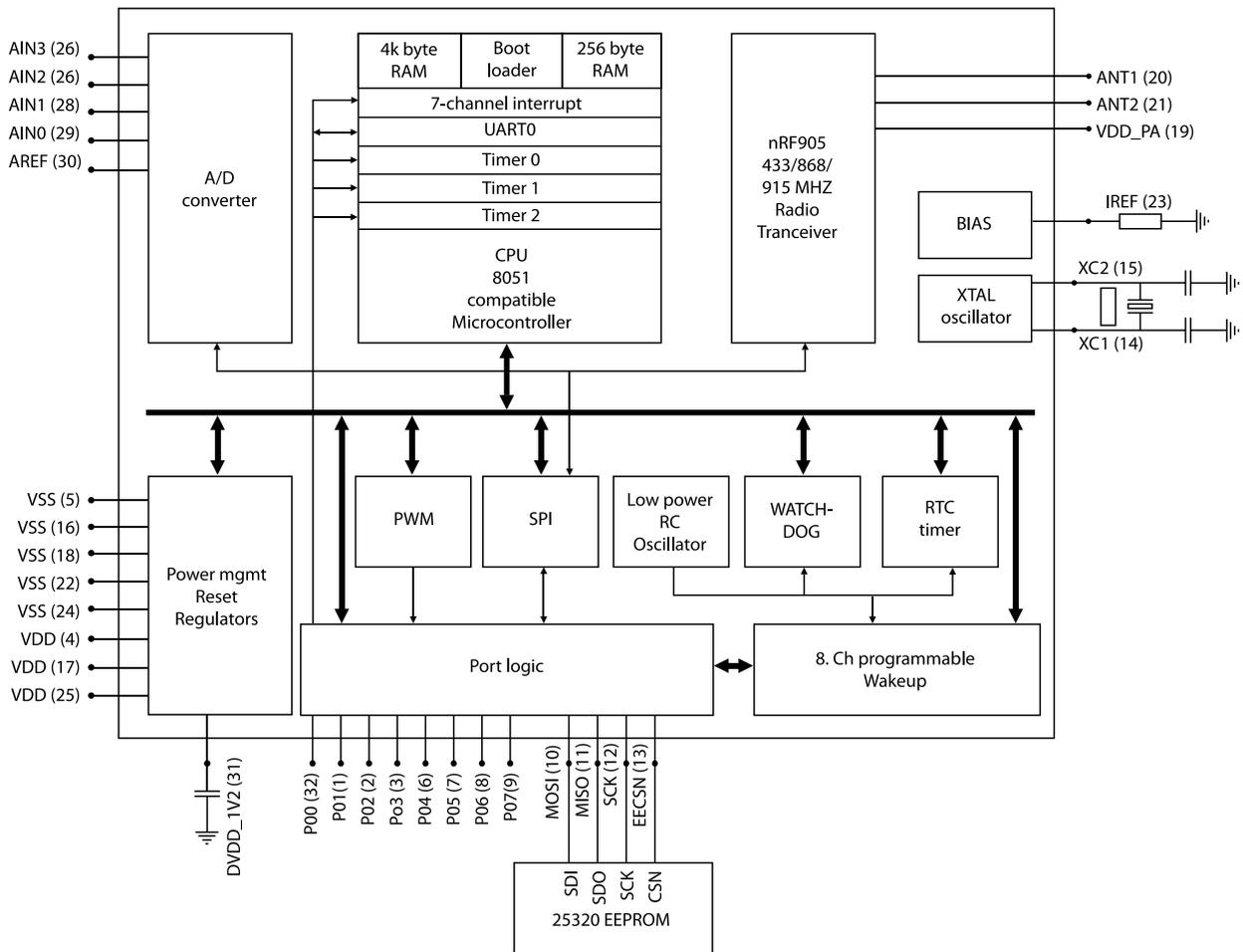


Рис. 5. Структурная схема системы-на-кристалле nRF9E5 компании Nordic Semiconductor

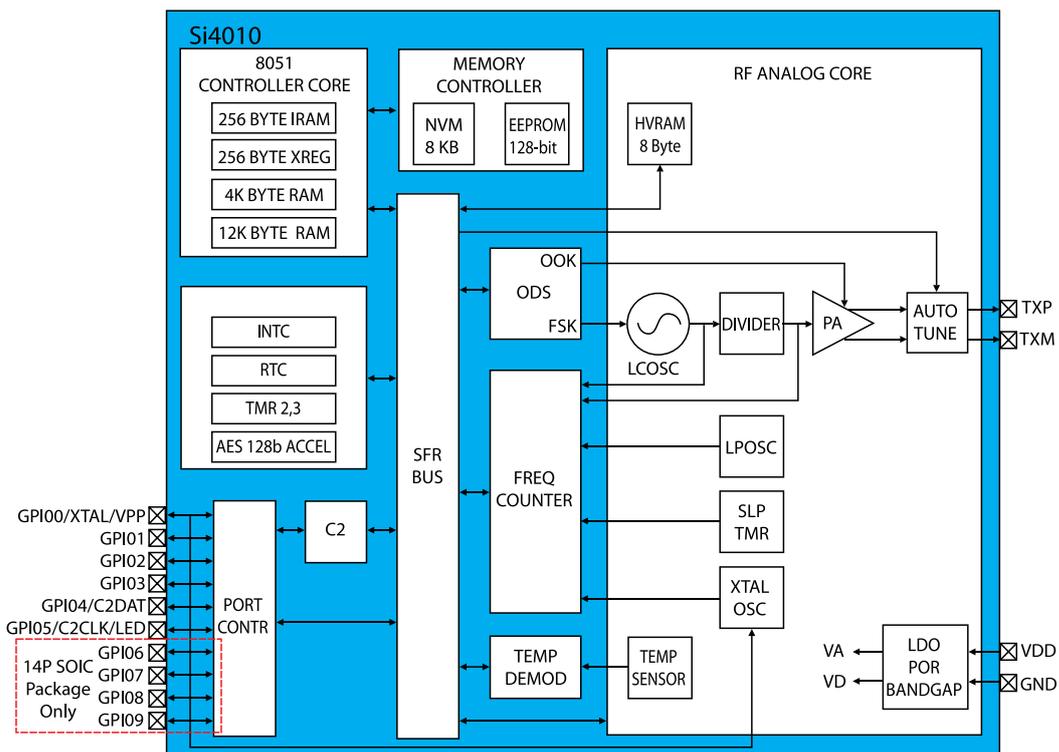


Рис. 6. Структурная схема SiC серии Si4010

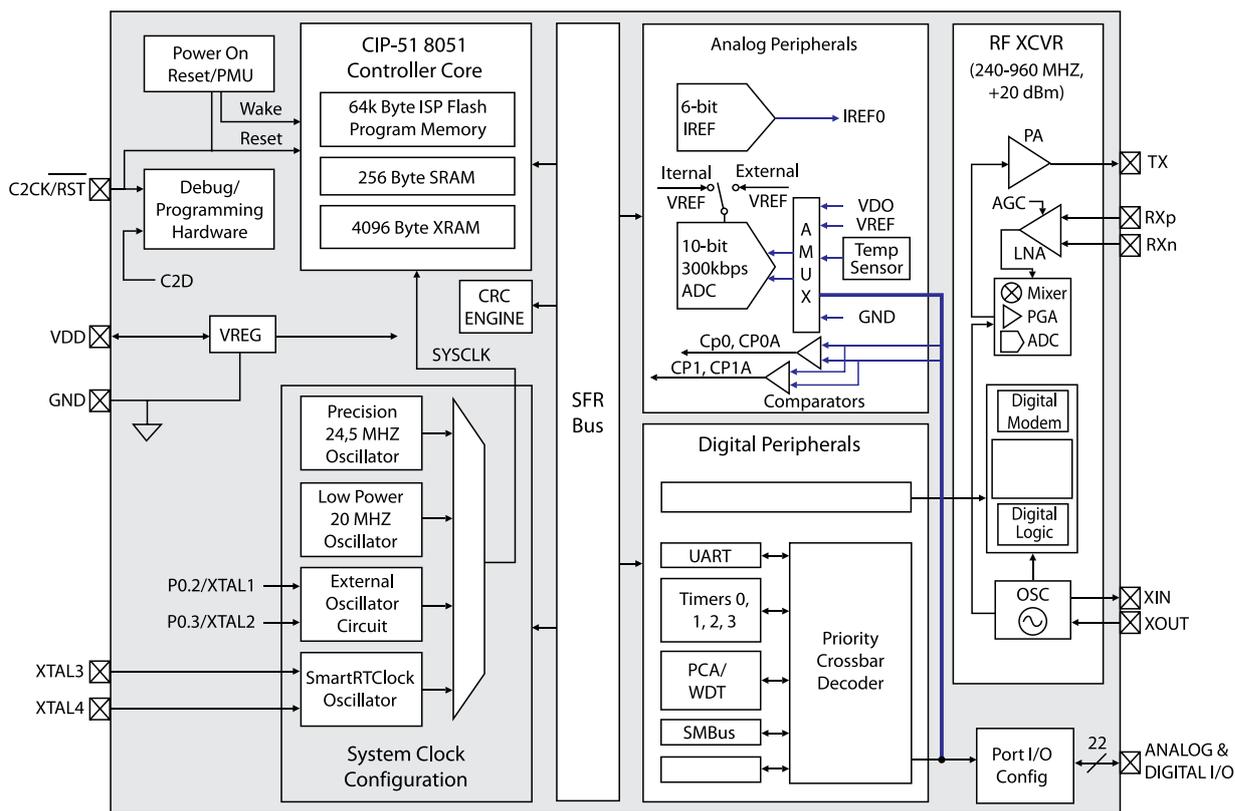


Рис. 7. Структурно-функциональная схема беспроводных контроллеров серий Si100x, Si101x

ного ядра. Данное решение позволяет эффективно сократить энергопотребление в устройствах автоматического снятия показаний со счетчиков расхода энергоресурсов (электроэнергии, воды, тепла, газа), имеющих импульсный выход.

Основные характеристики трансиверов:

- программируемая мощность выходного сигнала: до +20 дБм;
- чувствительность приемника: -121 дБм;
- скорость передачи данных: 0,1—256 Кбит/с;
- модуляция: FSK, OOK, GFSK;
- поддержка скачкообразной перестройки частоты;
- модуль ФАПЧ;
- поддержка работы с пространственно-разнесенными антеннами;
- буферы FIFO на прием и передачу (по 64 байт);
- встроенный процессор аппаратной обработки пакетов (DPPE), включающий в себя блоки AES, DMA, CRC.

TEXAS INSTRUMENTS

CC430 является комбинацией малопотребляющего микроконтроллера MSP430 и радиочастотного трансивера CC1101 [5]. Семейство приборов CC430 состоит из нескольких компонентов с различным набором периферийных устройств, предназначенных для создания широкого спектра электронных приборов. Архитектура поддержи-

вает пять режимов работы, что обеспечивает превосходные энергетические показатели для портативных устройств с батарейным питанием. Вычислительное ядро системы составляет 16-бит RISC-микроконтроллер MSP430 с 16-бит регистрами и гене-

раторами значений констант, позволяющими реализовать максимальную эффективность программного кода.

Приборы семейства CC430 (см. рис. 8) отличаются глубокой интеграцией микроконтроллерного ядра, его периферийных устройств и радио-

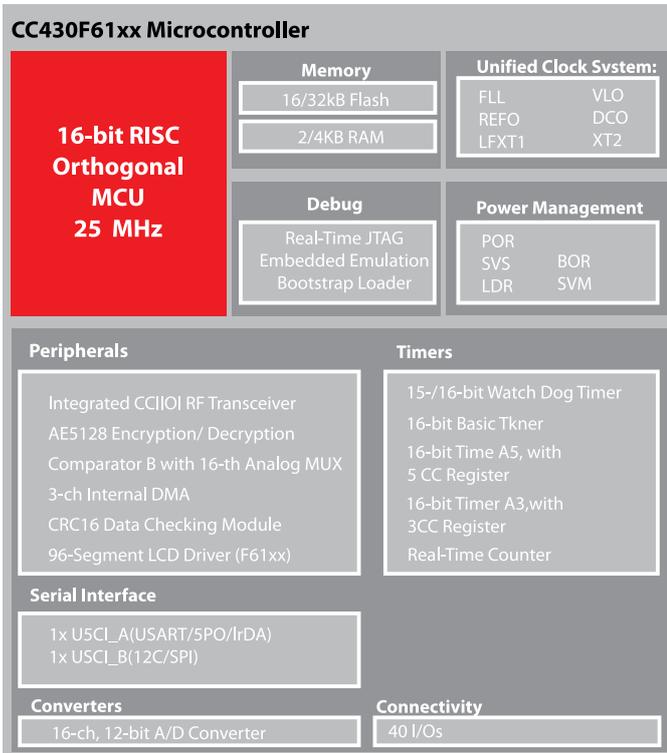


Рис. 8. Структурная схема приборов семейства CC430F*

частотного трансивера, что совместно с поставляемыми производителем драйверами и библиотеками превращает его в очень простое решение для создания многофункциональных устройств.

Основные характеристики:

- интегрированный трансивер серии CC1101;
- потребление тока 1,7 мкА в спящем режиме с работающим генератором тактовой частоты и порядка 180 мкА/МГц — в активном режиме;
- аппаратный модуль шифрования AES-128;
- совместимость кода с приборами большого семейства контроллеров MSP430 и бесплатное программное обеспечение для радиочастотной части системы;
- интегрированный 16-канальный 12-бит АЦП.

Семейство беспроводных контроллеров CC1110Fх (CC1110F8/F16/F32) состоит из трех приборов, предназначенных для создания маломощных низковольтных беспроводных систем связи в диапазонах 315/433/868/915 МГц. Устройства являются комбинацией радиочастотного трансивера, микроконтроллера с ядром x51, блока флэш-памяти (8/16/32 Кбайт) и набора периферийных устройств. Основные характеристики семейства:

- высокопроизводительное микроконтроллерное ядро класса 8051 с восьмикратной производительностью по сравнению с классическими контроллерами 8051;

скорости по сравнению с классическими контроллерами 8051;

- скорость передачи данных: 1,2—500 Кбит/с;
- потребление тока в спящем режиме: 200 нА;
- аппаратная поддержка функций «самосинхронизации», проверки адреса, подстраиваемой длины пакета и контроля CRC;
- независимые 64-бит буферы для данных приемника и передатчика для поддержки пакетной передачи данных;
- удовлетворяет требованиям стандартов EN 300 200 (Европа) и FCC CFR Part 15 (США);
- позволяет создавать конечный продукт быстро и без высоких затрат;
- гибкая оптимизация мощности излучения;
- позволяет использовать недорогой микроконтроллер для основных задач приложения;
- функция гибкого подбора канала для совместной работы с другими беспроводными системами;
- компактные размеры.

Семейство CC1111 (CC1111F8/F16/F32) представляет собой однокристалльные системы с интегрированным контроллером USB для создания маломощных низковольтных беспроводных систем связи в диапазонах 315/433/868/915 МГц. Приборы являются комбинацией радиочастотного трансивера, микро-

контроллера с ядром x51, контроллера USB 2.0, блока флэш-памяти (8/16/32 Кбайт), памяти RAM на 4 Кбайт, блока аппаратного шифрования AES с ключом длиной 128 бит и ряда следующих устройств:

- контроллер Full-Speed USB (12 Мбит/с) 2.0 с 1-Кбайт буфером данных FIFO;
- радиочастотный трансивер CC1101 со скоростью передачи данных 1,2–500 Кбит/с и с поддержкой модуляций FSK, MSK, GFSK, OOK/ASK;
- потребление тока в спящем режиме: 0,3 мкА;
- 8/16/32 Кбайт встроенной флэш-памяти;
- 1/2/4 Кбайт памяти SRAM с возможностью доступа в любом режиме работы;
- высокая чувствительность и помехоустойчивость приемника;
- аппаратная поддержка шифрования AES-128;
- 8-канальный АЦП (8–14-бит).

Сетевой процессор CC1180 является системой-на-кристалле CC1110F32, которая поставляется с прошитым стеком протоколов NanoStack 2.0 Lite компании Sensinode для сетей 6LoWPAN. CC1180 выполняет все критически важные и ресурсоемкие процессы, связанные с работой сетевых протоколов, экономит ресурсы внешнего микроконтроллера для решения прикладных задач. Взаимодействие с внешним

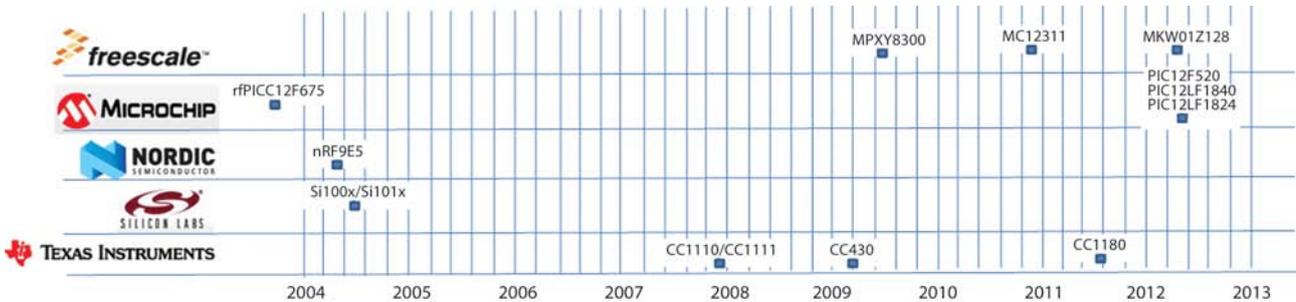


Рис. 9. Временная диаграмма выхода на рынок беспроводных систем-на-кристалле для диапазона < 1ГГц

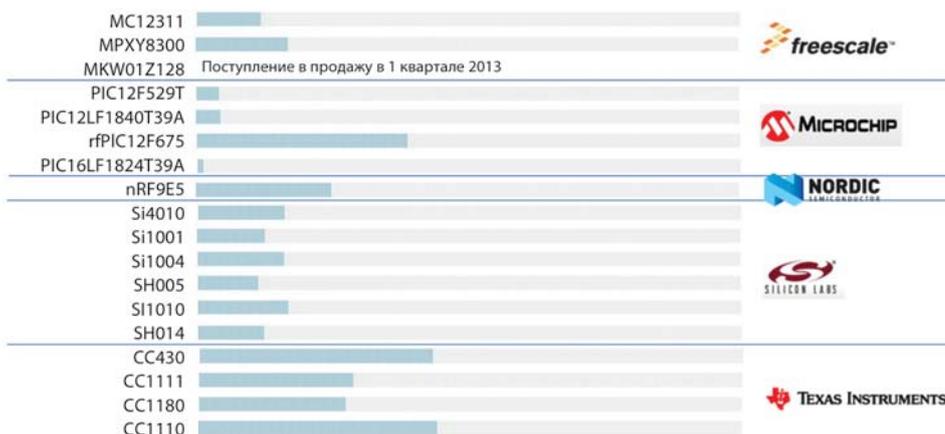


Рис. 10. Оценка доступности (возможности заказа) беспроводных контроллеров субгигагерцового диапазона в России

Таблица 1. Основные характеристики микроконтроллеров беспроводных систем-на-кристалле

Наименование	Тип процессорного ядра	Максимальные рабочие частоты контроллера, МГц	Объем встроенной памяти, байт ОЗУ/флэш	Напряжение питания, В	Тип корпуса
MC12311	HCS08, 8 бит (9S08QE32)	50,33 ($U_{пит} = 2,4-3,6$ В); 40 ($U_{пит} = 1,2-2,4$ В); 20 ($U_{пит} = 1,8-2,1$ В)	2 К/32 К	1,8...3,6	LGA60
MPXY8300	HCS08, 8 бит (M68HC08)	10	512/8 К (+8 К прошивки)	1,8...3,6	SOIC20
MKW01Z128	ARM Cortex-M0+, 32 бит	48	16 К/128 К	1,8...3,6	LGA60
PIC12F529T	RISC, 8 бит	8	201/1536 + 64 (для данных)	1,8...3,6	TSSOP14
PIC12LF1840T39A	RISC, 8 бит	32	256/4 К(+ 256 EEPROM)	1,8...3,6	TSSOP14
rfPIC12F675	RISC, 8 бит	20	64/1024×14	2,0...5,5	TSSOP14
PIC16LF1824T39A	RISC, 8 бит	32	256/4 К(+ 256 EEPROM)	1,8...3,6	TSSOP20
nRF9E5	8051, 8 бит	4—20	256/512 + 4 К ОЗУ	1,9...3,6	QFN32L
Si4010	8051, 8 бит	24	256 + 4 К/12 К	1,8...3,6	MSOP10, SOIC14
Si100x	8051, 8 бит	25	256 + 4 К/32 К или 64 К	0,9...3,6	QFN42, LGA42
Si101x	8051, 8 бит	25	768/16 К или 8 К	0,9...3,6	QFN42
CC430	MSP430, 16 бит	25	2—4 К/8—32 К	2...3,6	VQFN48, VQFN64
CC111x	8051, 8 бит	26	1—4 К/8—32 К	2...3,6	QFN36

контроллером (часто называемым прикладным контроллером или контроллером приложений) осуществляется по интерфейсу UART с протоколом обмена NAR. Например, возможно использование микроконтроллеров серии MSP430 или любых других. Сетевой процессор позволяет легко расширить функциональность создаваемой или существующей системы за счет подключения к сети 6LoWPAN.

Ключевые особенности:

- простая интеграция в сеть 6LoWPAN;
- распространенный UART-интерфейс;
- простой и функциональный протокол взаимодействия;
- обновление прошивки через радиоканал;
- большой выбор возможных диапазонов частот: 315/433/868/915 МГц;
- выходная мощность радиосигнала: –30...10 дБм;
- скорости передачи данных: 50, 100, 150, 200 Кбит/с;
- AES-шифрование в пределах подсети;
- диапазон напряжений питания: 2...3,6 В;
- компактные размеры — корпус QFN36 размерами 6×6 мм.

НЕМНОГО СТАТИСТИКИ

Сводные характеристики процессорных ядер систем-на-кристалле диапазона менее 1 ГГц представлены в таблице 1, а основные характеристики радиочастотного тракта и энергопотребления — в таблице 2.

На рисунке 9 показано примерное время выхода на рынок наиболее заметных серий и беспроводных систем-на-кристалле.

Диаграмма на рисунке 10 дает приблизительную оценку доступности (возможности заказа) беспроводных

Таблица 2. Основные характеристики радиочастотного тракта беспроводных систем-на-кристалле

Наименование	Чувствительность приемника, дБм	Выходная мощность передатчика, дБм	Максимальные скорости передачи данных, Кбит/с	Поддерживаемые виды модуляции сигнала	Потребляемый ток Передача/прием, мА (режимы пониженного потребления, мкА)	Частотные диапазоны, МГц
MC12311	–120	–18...17 (с шагом 1 дБм)	300	FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK	16...95/16 (0,1...1,25)	290—1020
MPXY8300	–	–	–	ASK, FSK	6...13	315/433
MKW01Z128	–120	–18...17	600	FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK	16...95/16 (0,1...1,25)	290—340, 424—510, 862—1020
PIC12F529T	0, 10	0, 10	100	OOK, FSK	9,7, 16,7/9,7 (0,25...170)	418, 434, 868
PIC12LF1840T39A	0, 10	0, 10	100	OOK, FSK	9,7, 16,7/9,7 (0,17...350)	310, 434, 868, 915
rfPIC12F675	–12...10	–12...10	40	ASK, FSK	4...14/4 (9...800)	290—350, 380—450, 850—930
PIC16LF1824T39A	0, 10	0, 10	100	OOK, FSK	9, 16,5/9 (0,17)	310, 434, 868, 915
nRF9E5	–100	–10, –2, 6, 10	50	GFSK	9/12 (2,5)	430—928
Si4010	–	–13...10	100	OOK, FSK	11...20/10 (0,7)	27—960
Si100x	–121	–1...20 (Si1000/1); –8...13 (Si1002/3/4)	0,123—256	FSK, GFSK, OOK	18...85/18 (1)	240—960
Si101x	–121	–1...20 (Si1010/1); –8...13 (Si1012/3/4)	0,123—256	FSK, GFSK, OOK	18...85/18 (1)	240—960
CC430	–117...111	< 13	500	2-FSK, GFSK, MSK, OOK, ASK	17...36/15 (1)	300—348, 387—464, 779—928
CC111x	–112	–30...10	500	2-FSK, GFSK, MSK, OOK, ASK	–	–

контроллеров субгигагерцового диапазона в России (отображено количество фирм-поставщиков, предлагающих указанные контроллеры со склада или на заказ по данным сервиса efind.ru).

Безусловно, остается возможность заказа интересующих контроллеров у ближайших официальных дистрибьюторов за пределами страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. UHF (Sub-1 GHz) Transceivers and Wireless MCUs//www.freescale.com.
2. rfPIC ICs – MCUs with transmitters Products//www.microchip.com.
3. Low power sub 1-GHz RF ICs/solutions//www.nordicsemi.com.
4. Wireless and RF IC Solutions//www.silabs.com.
5. Wireless Connectivity//www.ti.com.