

Программно-аппаратный комплекс для беспроводных систем сбора и передачи данных ADUCRF101 + ADRadioNet. Часть I

В статье рассматриваются параметры и особенности микроконтроллера ADuCRF101 производства компании Analog Devices Inc., приведено описание радиочастотной части микросхемы, описание протокола ADRadioNet, прикладного программного обеспечения для оценки, разработки и программирования беспроводной сети передачи данных.

В первой части статьи представлен обзор новых микроконтроллеров компании Analog Devices Inc. на процессоре ARM Cortex-M3, рассмотрены их основные особенности и характеристики. Во второй части статьи будет рассказано об аппаратных и программных средствах разработки для ADuCRF101, средствах программирования сети на основе протокола ADRadioNet и приведено подробное описание режимов работы с соответствующим энергопотреблением.

Михаил ВЬЮГИН
mikhail.vjugin@eltech.spb.ru,
Алексей КАТКОВ
alexey.katkov@eltech.spb.ru,
Кирилл КОВАЛЬ
kirill.koval@eltech.spb.ru

Компания Analog Devices Inc. предлагает на рынке несколько серий микроконтроллеров на ядре ARM Cortex-M3. Особенностью данных микроконтроллеров является высокая степень интеграции — наличие «на борту» аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, источников опорного напряжения с низким температурным дрейфом, генераторов тактового сигнала, малошумящих линейных стабилизаторов, источников тока для работы с RTD-датчиками и других блоков. Выбор ядра для нескольких микросхем с различной периферией, для разных классов радиоэлектронной аппаратуры был неслучаен, так как, помимо своей распространенности и освоенности, ядро ARM Cortex-M3 является одним из лучших по соотношению производительность/энергопотребление. Поскольку производитель позиционирует свои микроконтроллеры как микросхемы, содержащие прецизионные или высокопроизводительные аналого-цифровые преобразователи, не уступающие по своим параметрам специализированным микросхемам, которые оснащены микропроцессором с сопутствующими блоками для управления и вычисления, в описании и иной документации данные микроконтроллеры называются «аналоговые микроконтроллеры».

Первым микроконтроллером с ядром ARM Cortex-M3, анонсированным Analog Devices Inc., стал ADuCM360, чья структур-

ная схема приведена на рис. 1. Особенность ADuCM360 заключается в наличии прецизионного 24-разрядного сигма-дельта АЦП с мультиплексированным входом, позволяющим подключать до шести дифференциальных или 11 однополярных каналов. На входе АЦП имеется аналоговый буфер и программируемый усилитель с переменным коэффициентом усиления. Задачи вычислений и управления реализуются с помощью 32-разрядного ядра ARM Cortex-M3, работающего с тактовой частотой до 16 МГц, дополнительно содержится 12-канальный контроллер DMA и векторизованный контроллер вложенных прерываний, 8 кбайт оперативной и 128 кбайт EEPROM Flash-памяти. Коммуникация с внешней средой реализуют интерфейсы UART, SPI, I²C, два таймера общего назначения и шесть каналов ШИМ. Кроме того, микросхема имеет малошумящие линейные стабилизаторы для питания аналоговой и цифровой части, источник опорного напряжения, генератор тактового сигнала, 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь, позволяющий реализовать интерфейс «токовая петля 4–20 мА». Так как микросхема разрабатывалась для использования в распределенных системах сбора данных в качестве интеллектуальных датчиков, одной из ключевых задач в ее разработке было снижение энергопотребления. Ток потребления цифровой части микросхемы (процессор, память и ин-

терфейсы) равен 290 мкА/МГц, в режиме сна микросхема потребляет 4 мкА, а в режиме максимальной производительности (частота работы ядра 16 МГц) при всех задействованных элементах ток потребления равен 5,5 мА (напряжение питания 1,8–3,6 В). Микросхема выпускается в 48-выводном LFCSP-корпусе и работает в расширенном промышленном температурном диапазоне –40...+125 °С.

Следующим микроконтроллером, который Analog Devices Inc. анонсировал в мае 2014 года, был ADuCM320. Микросхема имеет высокопроизводительный процессор ARM Cortex-M3, работающий с частотой до 80 МГц, который осуществляет выполнение вычислений и обслуживание многочисленной и разнообразной периферии, в том числе обработку данных, поступающих с 14-разрядного АЦП последовательного приближения, действующего со скоростью 1 MSPS. Структурная схема микроконтроллера ADuCM320 представлена на рис. 2. Встроенный АЦП выполняет преобразование аналоговых сигналов, поступающих с 16 несимметричных мультиплексированных входов. Также с помощью АЦП можно измерить сигналы со встроенного датчика температуры, выходов встроенных ЦАП или напряжение цепей питания. Кроме АЦП, аналоговые интерфейсы представлены восемью ЦАП с выходом по напряжению 0–2,5 В или от 0 AVDD, четырьмя ЦАП с выходом тока в диапазоне 0–150 мА и компаратором напряжения.

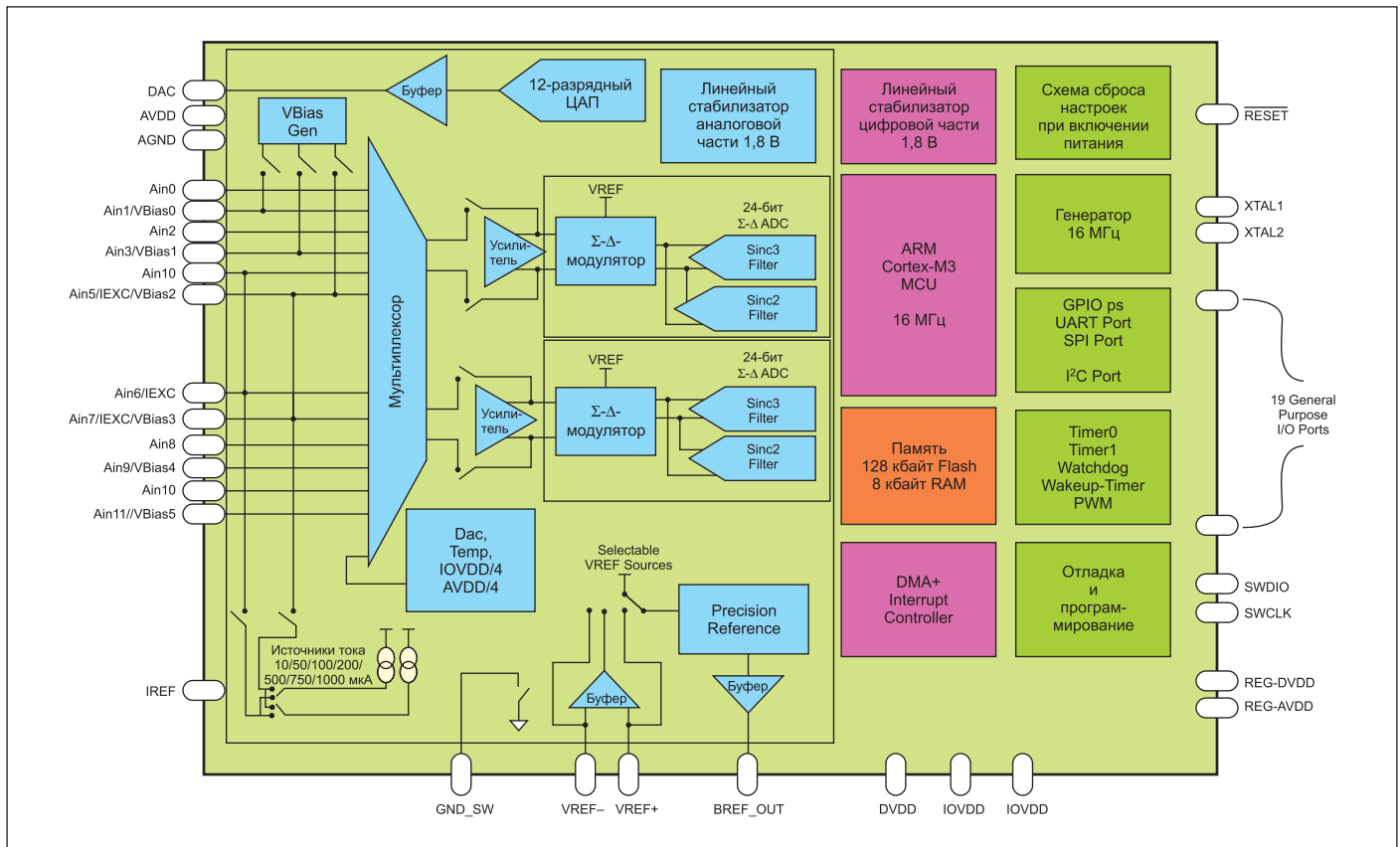


Рис. 1. Структурная схема микроконтроллера ADuCM360

Как уже было сказано, основу микросхемы составляет ядро ARM Cortex-M3 с 32-разрядной архитектурой RISC, оснащенное двумя независимыми блоками Flash-памяти объемом 128 кбайт (10 000 циклов запись/счи-

тывание) и оперативной памятью объемом 32 кбайт. Тактовый сигнал генерирует встроенный генератор с ФАПЧ, либо тактирование осуществляется с помощью внешнего источника.

Связь с внешним миром микросхема поддерживает посредством MDIO-интерфейса, двух портов SPI, двух портов I²C, порта UART и семи каналов ШИМ, управляемых 16-разрядным контроллером. Дополнительные возможности ADuCM320 предоставляет наличие 32-элементной программируемой логической матрицы. Также в периферии микроконтроллера включены сторожевой таймер, таймер запуска и три таймера-счетчика общего назначения.

Микросхема работает от питающего напряжения ЦАП с токовым выходом 1,8–2,5 В) в промышленном температурном диапазоне –40...+85 °С, выпускается в 96-выводном CSP-BGA-корпусе. Микросхема предназначена для применения в распределенных системах сбора данных и портативном контрольно-измерительном оборудовании.

Спустя несколько недель после выхода на рынок ADuCM320 Analog Devices Inc. представила новый микроконтроллер, который с полным правом можно назвать системой на кристалле, специализированной для применения в медицинских приложениях. Периферийные модули и внутренняя структура микросхемы ADuCM350 предназначены для использования в миниатюрных диагностических приборах и контроля основных показателей жизнедеятельности пациента, а также в приборах для контроля состояния человека во время занятий фитнесом.

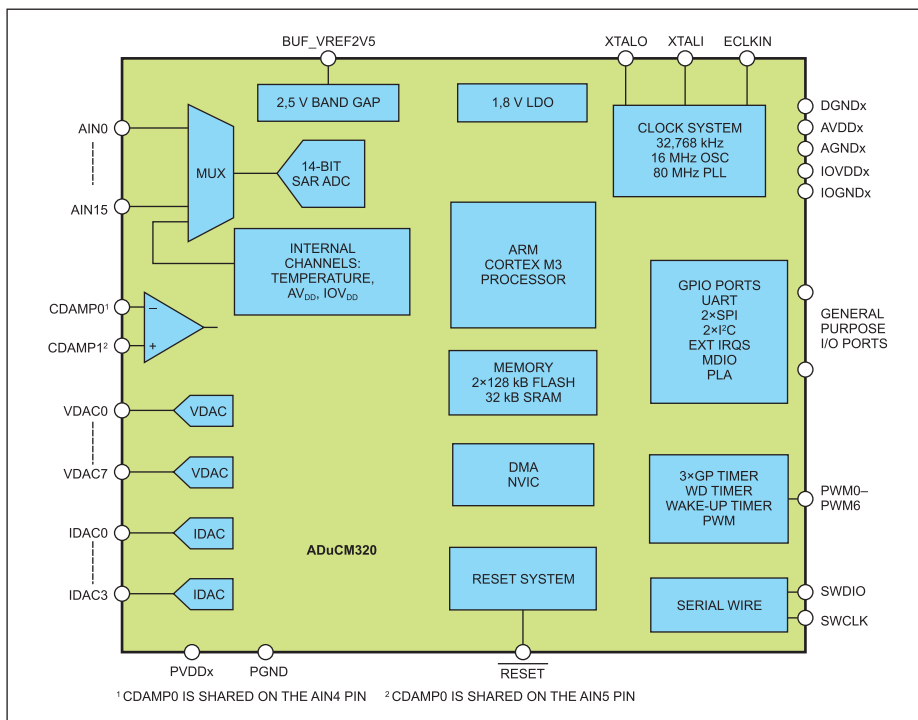


Рис. 2. Структурная схема микроконтроллера ADuCM320

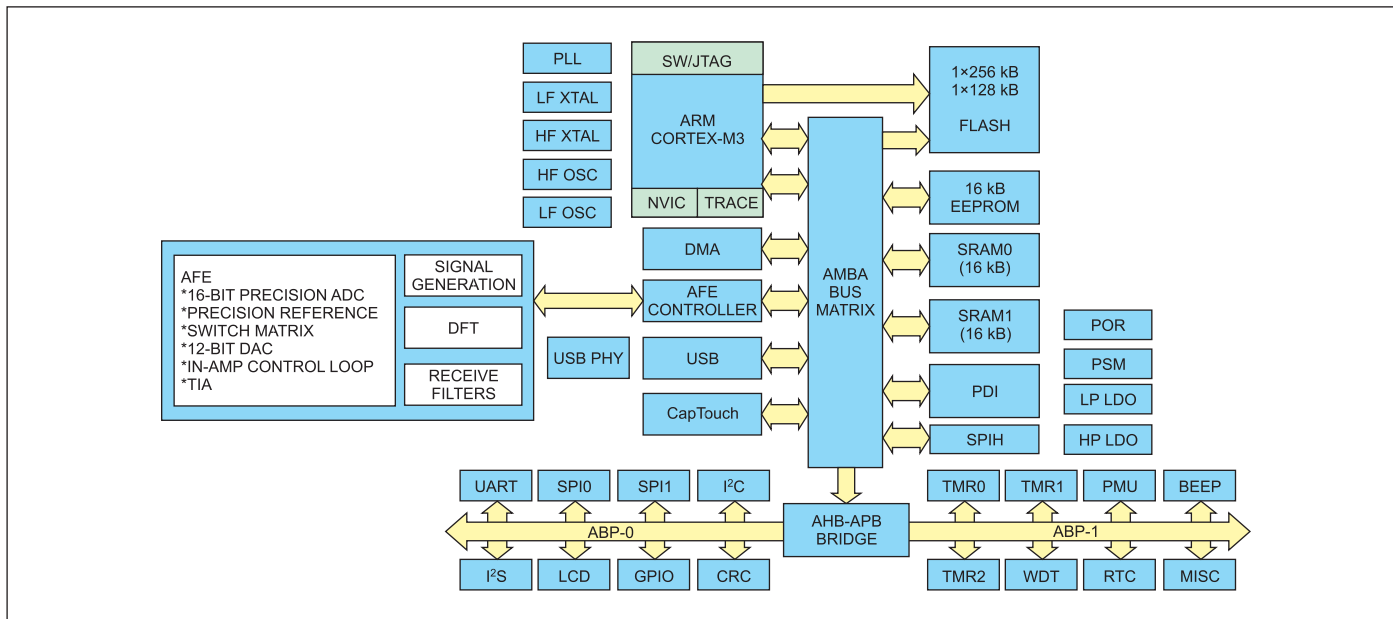


Рис. 3. Структурная схема микроконтроллера ADuCM350

Аналоговый интерфейс микросхемы, управляемый независимым контроллером, имеет каналы измерения тока (до восьми), напряжения (четыре канала измерения) и сопротивления, реализован на 16-разрядном АЦП последовательного приближения, преобразующим сигнал со скоростью 160 kSPS, 12-разрядном ЦАП и коммутационной матрице. Для работы преобразователей модуль интерфейса содержит прецизионный источник опорного напряжения и инструментальный усилитель.

Функции управления и вычисления исполняет микропроцессор ARM Cortex-M3, работающий с максимальной частотой 16 МГц, оснащенный встроенной Flash-памятью емкостью 384 кбайт, 16 кбайт конфигурируемой EEPROM и оперативной памятью емкостью 32 кбайт. Интерфейсы ввода/вывода позволяют создавать портативные измерительные приборы с дисплеем, интерфейсом USB и поддержкой активных датчиков. Микросхема выпускается в 120-выводном CSP-BGA-корпусе и работает в температурном диапазоне -40...+85 °C (рис. 3).

Микроконтроллер с интегрированным трансивером

Прежде чем перейти к описанию микроконтроллера со встроенным трансивером, следует кратко описать задачи, для решения которых он создавался, приложения, в которых предполагается его применение, и особенности работы этих устройств. За последнее время все большую популярность приобретает создание беспроводных систем сбора и передачи данных различного назначения, работающих в нескольких диапазонах частоты менее 1 ГГц либо в более высокочастотных диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц. Подобные решения в настоящее

время наиболее часто встречаются в системах управления, содержащих множество датчиков (в том числе интеллектуальных, осуществляющих не только оцифровку данных, но и их хранение и анализ, а также управление в автономном режиме своей работы) с автономным (батарейным) питанием, электронных системах безопасности и обнаружения вторжения, приборах промышленной автоматики и в инженерных системах зданий. Перспективным представляется использование технологии сбора и передачи данных посредством беспроводной сети в системах учета ресурсов.

Беспроводная сеть датчиков содержит требуемое количество элементов сети для подключения различных устройств сбора данных или управления, размещенных на определенной территории и соединенных посредством беспроводных линий связи. Также сеть содержит несколько промежуточных элементов, обеспечивающих маршрутизацию и интерфейс с внешней средой (иногда этот элемент называется шлюз).

Беспроводные сети датчиков создаются на основе аппаратуры миниатюрных приемопередатчиков, управляющих устройств — микропроцессоров, а также различных датчиков. В настоящее время компанией Analog Devices Inc. выпускается серия интегрированных трансиверов, работающих в нелицензируемых диапазонах, например ADF7023, ADF7024, позволяющих создать беспроводную сеть для сбора и передачи информации.

Рассмотрим несколько моментов, важных для оценки применения компонентов в беспроводной сети датчиков:

- Выбор устройства и его габаритов: в первую очередь должно быть проведено исследование представленных на рынке моделей бюджетных микроконтроллеров и приемопередатчиков (то есть аппарат-

ной части). Аппаратура сети должна иметь небольшие размеры, следовательно, предпочтительнее миниатюрные корпуса.

- Потребляемая мощность: потребляемая мощность устройств в беспроводной сети (микроконтроллеров и приемопередатчиков) должна быть очень небольшой для того, чтобы элементы могли работать долгое время (10–20 лет) от батареи питания или использовать технологии возобновляемых источников питания.
- Чувствительность приемника: чувствительность радиоприемника показывает, насколько слабый радиочастотный сигнал может быть принят. Уменьшение потребляемой мощности приемника проще выполнить, нежели улучшить чувствительность приемника. Следует помнить, что с увеличением скорости передачи данных чувствительность уменьшается, поскольку для поддержания высокой скорости получения данных требуется большая потребляемая мощность приемника.
- Энергия сигнала и ширина спектра: чувствительность обратно пропорциональна ширине спектра сигнала. Другими словами, уменьшение ширины спектра сигнала увеличивает чувствительность приемника.
- Маршрутизация с множественными участками ретрансляции сигнала: передача сигнала на короткие расстояния требует гораздо меньшей энергии, нежели передача более мощных сигналов на большие расстояния.
- Надежность: это наиболее важный пункт. Надежность данных — основное требование в промышленных и медицинских системах.
- Самовосстановление: наиболее приемлемый способ борьбы с неисправностями в сети и выходом из строя отдельных ее элементов.

- Масштабируемость: сеть должна быть рассчитана на дальнейший рост без дополнительных накладных расходов.
- Скорость реагирования: время обнаружения сети и повторное обнаружение после потери связи должно быть достаточно малым, особенно в случаях, когда узловые датчики перемещаются в пространстве, например в медицинских системах мониторинга состояния пациентов.
- Двухнаправленная связь: сеть должна давать возможность передавать сигналы с управляющего узла сети для настройки рабочих параметров аппаратуры узлов сбора данных, так же как и осуществлять передачу данных с датчиков.

Рассмотрим необходимые компоненты беспроводной сети датчиков:

- Конечные точки (End Point) — это устройства, которые получают данные непосредственно с датчиков, оцифровывают, осуществляют первичную цифровую обработку и отправляют их по сети. Большую часть времени они работают в спящем режиме и «просыпаются» в случае необходимости (при наступлении какого-либо события или с определенным периодом).
- Маршрутизаторы (R) — это устройства, увеличивающие зону покрытия сети за счет передачи данных от маршрутизатора к маршрутизатору (многоскачковая маршрутизация) и позволяющие формировать альтернативные маршруты в случае перегрузки сети или отказа одного из ее узлов. Маршрутизаторы могут также работать как конечные точки.
- Центральный шлюз (CP): данные от нескольких устройств собираются в этом шлюзе. Он может быть подключен к порту компьютера для мониторинга и управления сетью. Если есть Ethernet на устройстве центрального шлюза, то локальная сеть может быть подключена к Интернету.

Комплект программного обеспечения для беспроводной сети датчиков, как правило, состоит из сетевого протокола и набора приложений для конфигурации сети и настройки работы отдельных устройств.

Беспроводные системы субгигагерцевого диапазона

К этим беспроводным системам относят устройства любого назначения (неспециализированные), реализующие связь между собой в частотных диапазонах так называемых открытых частот, определенных Государственным комитетом по радиочастотам. К ним относятся частотные диапазоны 433,075–434,79 МГц (ограничение по мощности в 10 мВт), 864–865 МГц (ограничение по мощности в 25 мВт при рабочем цикле 0,1%), 868,7–869,2 МГц (ограничение по мощности в 25 мВт). Часто такие системы называют ISM-системами, то есть они представляют собой оборудование для

радиосетей, применяемых в промышленных системах, системах безопасности и медицинских приложениях. Также есть частоты 864–885 МГц, выделенные для использования устройствами радиочастотной идентификации (RFID-метки), для чего требуется назначение частот определенным каналам. Основное преимущество данных диапазонов частот — возможность создания устройств радиосвязи, энергопотребление которых гораздо ниже, чем устройств, действующих в диапазонах 2,4 ГГц и выше, при сопоставимой дальности связи.

Субгигагерцевые радиосистемы, работающие с узкополосным сигналом, могут иметь дальность связи свыше километра. В некоторых случаях это позволяет узлам в беспроводной сети взаимодействовать напрямую без участия промежуточных звеньев, в отличие от 2,4-ГГц систем.

Также необходимо обозначить следующую особенность работы в субгигагерцевом диапазоне частот. При прохождении радиоволн сквозь стены или другие препятствия сигнал затухает. С увеличением частоты величина затухания тоже увеличивается, поэтому на частоте 2,4 ГГц сигнал ослабевает быстрее, чем в субгигагерцевых диапазонах.

Замирание радиоволн на частоте 2,4 ГГц происходит гораздо быстрее, нежели на частотах менее одного гигагерца, вследствие отражения от твердых поверхностей.

Существенным недостатком систем субгигагерцевого диапазона является меньшая скорость передачи данных, чем у более высокочастотных систем.

Размеры антенны обратно пропорциональны частоте, поэтому в приемопередатчиках субгигагерцевых диапазонов используются антенны большего размера, нежели в аппаратуре для 2,4-ГГц сетей. Если размеры узла сети являются важным параметром, то лучше использовать более высокие частоты субгигагерцевого диапазона (868–950 МГц), в этом случае размеры антенны будут меньше, чем у систем на 433 МГц.

Стандартные протоколы и специализированные разработки

Создание беспроводной сети связано не только с выбором диапазона частот, оптимизацией энергопотребления и определением требуемой скорости передачи данных, но и со стеком протоколов, объемом работ и стоимостью, которые потребуются для его написания и тестирования.

Сетевой протокол должен быть выбран в соответствии с требованиями, предъявляемыми как ко всей системе, так и непосредственно к каждой ячейке сети. Сетевой протокол обеспечивает поддержку топологии сети и управляет маршрутизацией данных. Для того чтобы построить оптимальную сеть беспроводных датчиков, основной протокол должен соответствовать всем основным требованиям.

Помимо конструктивных особенностей и технологических компромиссов, подбор правильной топологии позволит успешно развернуть сеть датчиков, которая будет оптимально настроена для удовлетворения требований конкретной задачи.

Для 2,4-ГГц и субгигагерцевых диапазонов существует значительное количество протоколов, описывающих физический уровень (PHY), адресацию и формат кадров (MAC) и уровень стека. В радиочастотных устройствах диапазона 2,4 ГГц широко используются стандарты 802.15.4 (PHY/MAC), ZigBee, Bluetooth, WirelessHART, 6LoWPAN, Wi-Fi и RF4CE; в то время как в субгигагерцевом диапазоне применяются также ZigBee, 6LoWPAN, Wireless M-Bus и множество авторских вариантов.

Микроконтроллер ADuCRF101

Микроконтроллер ADuCRF101 представляет собой функционально законченный модуль сбора данных для беспроводных систем. Особенностью микросхемы является удовлетворение требованиям сверхмалого энерго-

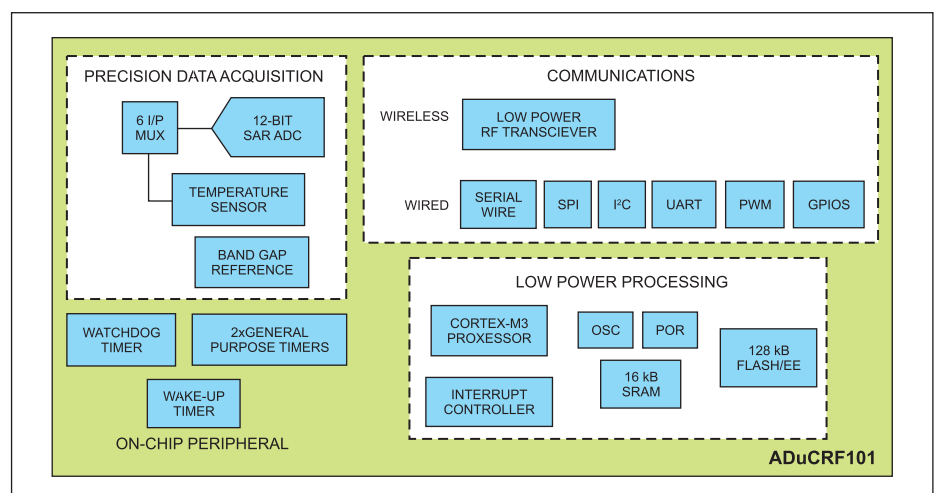


Рис. 4. Внутренняя структура ADuCRF101

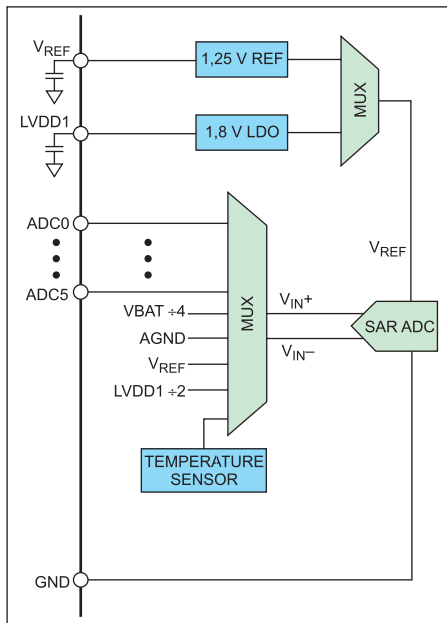


Рис. 5. Схема аналоговых входов AduCRF101

потребления. Структурная схема микроконтроллера показана на рис. 4.

Как упоминалось выше, управляющим центром AduCRF101 является микроконтроллерное ядро ARM Cortex M3, обеспечивающее максимальную производительность в 1,25 DMIPS/МГц. Работа процессора поддерживается 128 кбайт EEPROM/Flash-памятью и оперативной памятью емкостью 16 кбайт. Процессор также имеет программируемый контроллер DMA, обслуживающий 14 каналов прямого доступа к памяти устройств периферии. Связь с внешними устройствами реализуется через цифровые интерфейсы SPI, I²C, UART и цифровые выходы общего назначения. Также микросхема содержит ШИМ-контроллер, реализующий до восьми каналов выхода сигналов с ШИМ. Кроме того, AduCRF101 содержит контроллер вложенных векторных прерываний.

Работу системы обеспечивает встроенный 16-МГц системный тактовый генератор. При режимах со сниженным энергопотреблением частота тактового сигнала уменьшается с помощью программируемых встроенных делителей. Для работы таймеров (общего назначения, запуска, сторожевого) предусмотрен отдельный встроенный 32-кГц генератор. Таймеры общего назначения могут также работать от системного тактового генератора. В случае потребности более точного тактирования возможно подключение внешнего низкочастотного генератора (32 кГц). Для тактирования радиочастотного модуля используется внешний резонатор, генерирующий сигнал 26 МГц.

Для ввода аналоговых сигналов микросхема AduCRF101 содержит 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения, который с помощью мультиплексора может производить оцифровку сигнала с шести внешних входов и пяти вну-

тренних источников. Отношение сигнал/шум равно 68 дБ при максимальной скорости выборки. Схема входной цепи аналого-цифрового преобразователя показана на рис. 5.

Для работы используется встроенный источник опорного напряжения номиналом 1,25 В с температурным дрейфом ± 40 ppm/°C.

В асимметричном режиме диапазон входного сигнала может составлять от 0 В до V_{REF} . В дифференциальном режиме амплитуда входного сигнала должна находиться в диапазоне от $-V_{REF}$ до $+V_{REF}$. Максимальное значение сигнала на входе 2,1 В. Допустимо применение внешнего источника опорного напряжения с номиналом до 1,8 В.

Данный АЦП также имеет возможность измерять внутреннюю температуру микроконтроллера, поскольку встроенный температурный датчик имеет выход, данные с которого подаются на один из внутренних входов мультиплексора. Входы АЦП имеют защиту от электростатического разряда.

Схема питания микроконтроллера и режимы энергопотребления

Схема питания микросхемы представлена малошумящими и микропотребляющими линейными стабилизаторами, схемой сброса (Power-on-Reset) и блоком мониторинга питающего напряжения. Напряжение питания микросхемы 2,2–3,6 В позволяет работать непосредственно от батареи. Поскольку AduCRF101 создавался для применения в беспроводных сетях и обработки данных с датчиков, которые работают с автономными источниками питания, микроконтроллер имеет несколько режимов пониженного энергопотребления: режим гибкого потребления, режим глубокого сна (hibernate mode), спящий режим (shutdown mode).

Всего AduCRF101 имеет четыре режима энергосбережения и всегда запускается в активном режиме, а также переходит в активный режим после пробуждения или при выходе из энергосберегающего режима. Опишем все режимы подробнее.

Active mode

Функционирует МК и часть периферии. В данном режиме процессор потребляет <210 мкА/МГц. Частота тактового сигнала по умолчанию составляет 16 МГц. Энергопотребление может быть минимизировано путем деления частоты тактового сигнала или отключением тактирования периферии, которая не используется в данный момент.

Flexi Mode

В этом режиме процессорное ядро Cortex-M3 находится в режиме легкого сна, а периферийные устройства находятся в активном режиме. Пользователь имеет возможность отключать периферию, включая DMA и память, приостанавливая тактирование периферии, используя регистр CLKPD.

Любое прерывание выводит микроконтроллер в активный режим. Время пробуждения составляет 3–5 тактов.

Hibernate Mode

Ядро Cortex-M3 находится в режиме глубокого сна, тактирование остановлено полностью. Микропотребляющий генератор тактового сигнала и сторожевой таймер активны, порты ввода/вывода общего назначения сохраняют свое состояние. Используется внешний источник тактового сигнала, и активация процессора происходит с помощью таймера запуска. В оперативной памяти сохраняется часть данных (используется 16 кбайт SRAM). Дальнейшее уменьшение энергопотребления можно реализовать, сохранив только половину содержимого SRAM (8 кбайт), снимая бит RETAIN в регистре SRAMRET. Только внешние прерывания, таймер запуска и сторожевой таймер могут вывести микроконтроллер из спящего режима. В этом режиме задействованы микропотребляющие встроенные линейные стабилизаторы. Время пробуждения в этом случае составляет 10–13 мкс.

Shutdown Mode

В этом режиме работы хранятся данные в портах ввода/вывода. Остальная периферия отключена, встроенные линейные стабилизаторы выключены, поэтому содержимое SRAM не сохраняется. Выход из спящего режима эквивалентен включению питания, исполнение программы запускает RESET. Микроконтроллер включается примерно за 48 мс. Энергопотребление микросхемы в данном режиме составляет около 280 нА.

Радиочастотный модуль AduCRF101 (рис. 6) представляет собой приемопередатчик, реализованный на супергетеродинной схеме с однократным преобразованием частоты. Передатчик излучает сигнал мощностью от -20 до $+12$ дБм и поддерживает скорость передачи данных от 1 до 300 кбит/с. Трансивер поддерживает четыре типа модуляции: 2FSK, GFSK, MSK, GMSK. Радиомодуль предназначен для работы в нелицензируемых диапазонах частот 431–464 и 862–928 МГц.

Синтезатор частоты трансивера содержит генератор, управляемый напряжением, и малошумящую схему ФАПЧ с дробным делителем частоты, обеспечивающую разрешение по частоте 400 Гц. Диапазоны частот приема и передачи синтезатор устанавливает автоматически таким образом, чтобы получить наилучшие значения фазового шума, качества модуляции и времени установки. Встроенный усилитель обеспечивает уровень сигнала $-20 \dots +13,5$ дБм, с автоматической регулировкой усиления, что позволяет уменьшить уровень побочных составляющих. Допускается внешнее подключение усилителя мощности, как однополярное, так и дифференциальное.

Особенностью приемника является новая высокоскоростная схема автоматической регулировки частоты, позволяющая схеме

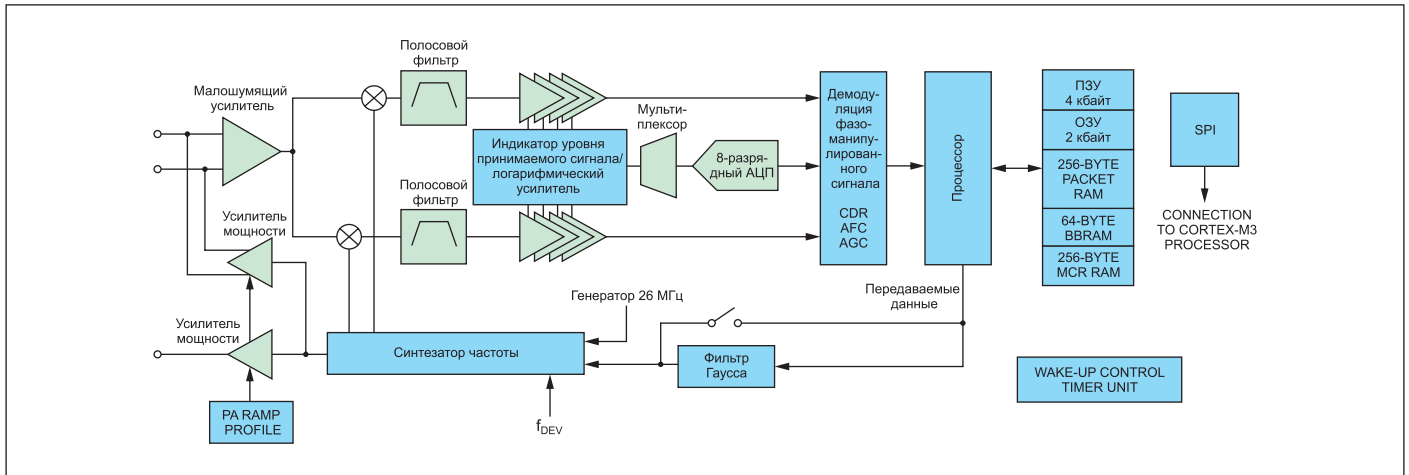


Рис. 6. Радиочастотный модуль микроконтроллера ADuCRF101

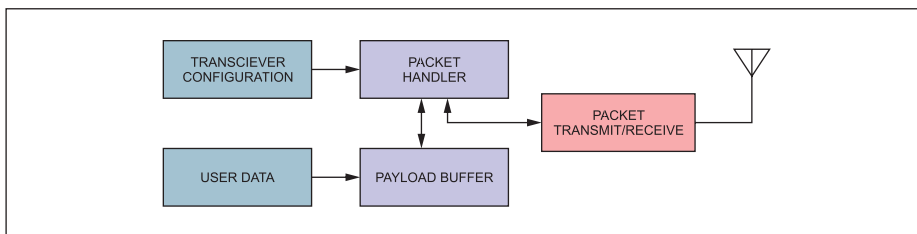


Рис. 7. Схема формирования пакетов

изводства Analog Devices Inc., описаны их основные параметры и рекомендуемые области применения. Также приведены основные параметры микроконтроллера со встроенным приемопередатчиком ADuCRF101 и описание его основных узлов, рассказано об особенностях построения сети беспроводных датчиков.

Литература

1. ARM Cortex M3 processor. www.analog.com/en/products/processors-dsp/analog-microcontrollers/arm-cortex-m3-processor.html
2. Low power precision analog microcontroller, ARM cortex M3 with dual sigma-delta ADCs. www.analog.com/en/products/processors-dsp/analog-microcontrollers/arm-cortex-m3-processor/aducm360.html
3. Precision Analog Microcontroller, 14-Bit Analog I/O with MDIO Interface, ARM Cortex-M3. www.analog.com/en/products/processors-dsp/analog-microcontrollers/arm-cortex-m3-processor/aducm320.html
4. 16-Bit Precision, Low Power Meter on a Chip with Cortex-M3 and Connectivity. www.analog.com/en/products/processors-dsp/analog-microcontrollers/arm-cortex-m3-processor/aducm350.html
5. Precision Analog Microcontroller ARM Cortex M3 with RF Transceiver. www.analog.com/en/products/processors-dsp/analog-microcontrollers/arm-cortex-m3-processor/aducrf101.html
6. Precision Analog Microcontroller ARM Cortex M3 with RF Transceiver, Data Sheet www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuCRF101.pdf
7. UG-231: ADuCRF101 User Guide. www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/ADUCRF101_UG-231.pdf
8. ADWSN: ADRadioNet. Technology Guide. www.sdk.analog.com/dw/sdks.aspx?file=AMEDK01-V2
9. Коваль К., Редькин П. Прецизионные аналоговые микроконтроллеры ADuCM36x — быстрый старт // Компоненты и технологии. 2013. № 7.

ФАПЧ находить и восстанавливать нежелательные изменения частоты в принятом пакете. Для улучшения параметров схемы доступен специализированный программный модуль калибровки подавления внеполосных составляющих, улучшающий коэффициент подавления. Данный программный модуль загружается в оперативную память контроллера. Модуль позволяет отказаться от внешних фильтров и не требует дополнительных ручных настроек (после установки), результаты калибровки задействуются при каждом включении микросхемы.

Настройки конфигурации трансивера, переведенного в режим сверхмалого энергопотребления (сна), хранятся в оперативной памяти с батарейным питанием.

Основой трансивера является коммуникационный процессор, имеющий 8-разрядную RISC-архитектуру, который исполняет функции управления узлами приемопередатчика и осуществляет формирование пакетов передачи данных. Коммуникационный процессор выполняет задачи управления нижним уровнем протокола передачи данных, реализуя простой интерфейс с ядром микроконтроллера Cortex-M3.

Трансивер в ADuCRF101 использует пакетный формат передачи данных. В микросхеме передаваемые посредством радиоканала данные загружаются в специальный буфер (payload buffer) емкостью 240 байт, затем данные поступают в блок формирования пакетов (packet handler), где данные передаваемой пользователем информации формируются

в пакет, содержащий сведения с адресом передачи и служебную информацию. Также в пакет добавляются данные о режиме работы трансивера, настройках усилителя, блока автоматической коррекции частоты и конфигурации блоков восстановления тактового сигнала и сигнала данных. Сформированный пакет поступает в блок цифрового передатчика (рис. 7).

Для того чтобы сделать процесс конфигурирования трансивера более простым и удобным, определены три режима работы трансивера по умолчанию, отличающиеся скоростью передачи данных и, соответственно, девиацией частоты (как следствие, шириной канала). Параметры передачи данных, приведенные в таблице, оптимизированы по соотношению скорости передачи данных в канале и энергопотреблению.

Заключение

В первой части статьи перечислены все микроконтроллеры на ядре ARM Cortex-M3 про-

Таблица. Энергопотребление блока трансивера в различных режимах работы

Состояние трансивера (868/915 МГц)	Выходная мощность, дБмВт	Ток потребления, тип., мА
Усилитель мощности с однополярным включением, режим передачи	-10	10,3
	0	13,3
	10	24,1
	13	32,1
Усилитель мощности с дифференциальным включением, режим передачи	-10	9,3
	0	12
	10	28
Режим приема	—	12,8