

БЕСПРОВОДНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

ГЕОРГИЙ ВОРОНЦОВ, инженер

В статье рассматриваются беспроводные микроконтроллеры компаний NXP, Renesas и SiLabs. Учитывая специализацию микроконтроллеров, основное внимание уделено режимам энергопотребления и радиомодулям и кратко упоминаются специализированные периферийные модули этих микроконтроллеров.

ВВЕДЕНИЕ

Нельзя не отдать должное журналу «Электронные компоненты» – в нем с завидной регулярностью и довольно оперативно публикуются статьи, посвященные беспроводным микроконтроллерам [1–6]. По указанной в библиографии подборке статей за последние четыре года можно составить достаточно полное представление о беспроводных микроконтроллерах (МК), выпущенных за эти годы. В настоящей статье мы продолжим эту традицию и расскажем о беспроводных МК, появившихся в этом, 2020 г.

Как и во всех предыдущих случаях, новые МК не поражают воображение вычислительной мощностью, обилием коммуникационных интерфейсов или какой-либо другой специализированной периферией. Их основной функциональной частью является радиомодуль. Как правило, беспроводные МК предназначены для приложений с батарейным питанием, и их разработчики решают задачу как можно в большей мере снизить энергопотребление МК.

Словарь

- AHB** – многоуровневая матричная шина
- APB** – периферийная шина
- AGC** – автоматическая регулировка усиления
- BUFC** – буферный контроллер радиомодуля
- CTSU** – модуль сенсорной клавиатуры
- DMIC** – модуль работы с одно- и двухканальными цифровыми микрофонами
- FGH** – контроллер кадра
- MPU** – модуль защиты памяти
- NFC** – коммуникация ближнего поля
- NTAG** – NFC-модуль
- HWVAD** – детектор голосовой активности
- PDM** – импульсно-плотностная модуляция
- PMC** – контроллер управления питанием
- RAC** – радиоконтроллер
- RFP** – радиоконтроллер
- RSSI** – индикатор уровня принимаемого сигнала
- SLCADC** – контроллер сегментного ЖКД

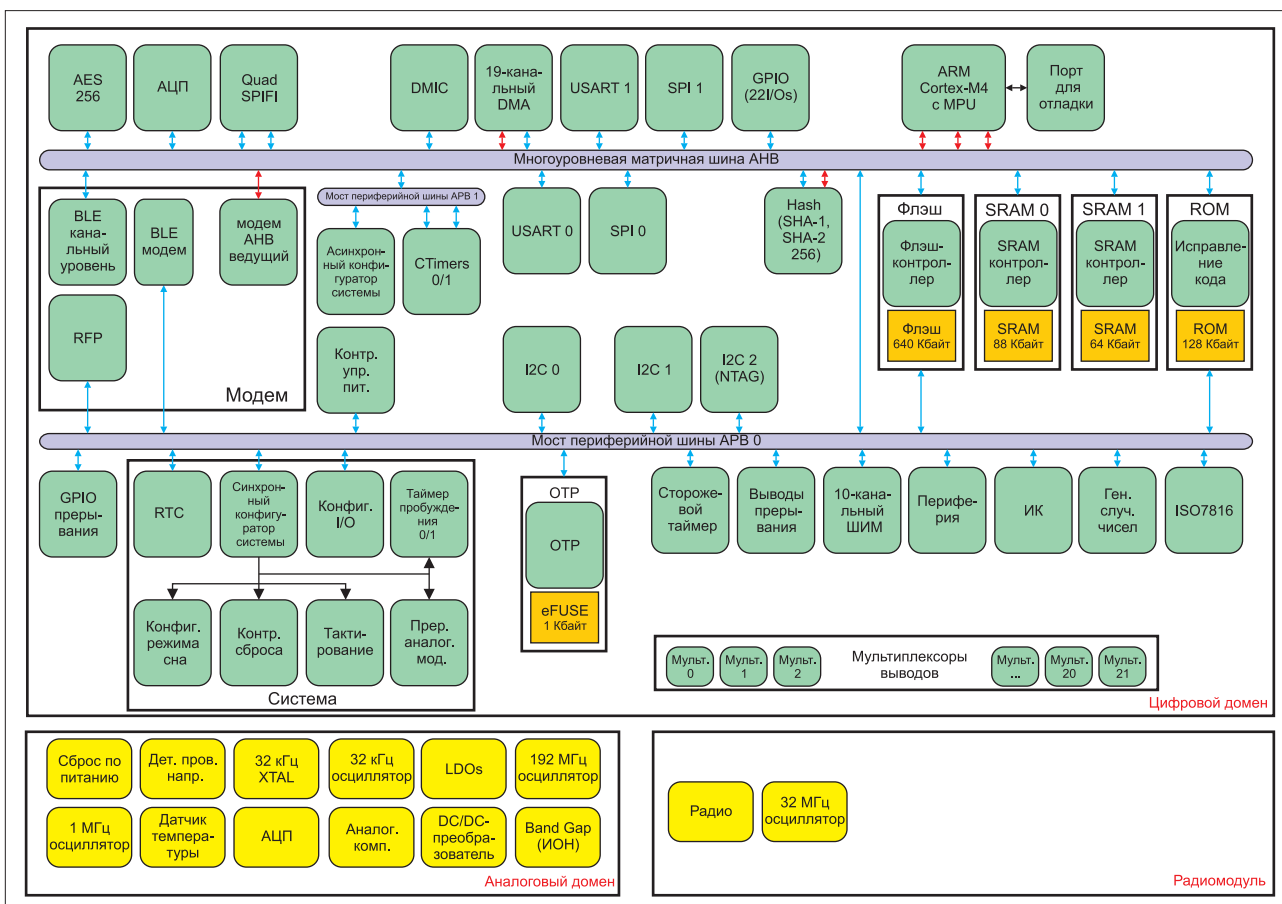


Рис. 1. Структурная схема МК QN9030 и QN9090 компании NXP

Исходя из этого требования, мы, прежде всего, рассмотрим особенности радиомодулей и модулей управления питанием, и лишь кратко остановимся на специализированной периферии, если таковая имеется. Остальные узлы беспроводных МК хорошо известны пользователям, и мы не станем утомлять читателей ненужными подробностями.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ QN9030 И QN9090 КОМПАНИИ NXP

Беспроводные МК QN9030 и QN9090 компании NXP базируются на хорошо известном процессорном ядре ARM Cortex-M4 с модулем защиты памяти (MPU). МК поддерживают стандарт Bluetooth Low Energy 5.0. Их структурная схема приведена на рисунке 1. Отличия модификаций МК показаны в таблице. Напряжение питания МК: 1,9–3,6 В; диапазон рабочей температуры: –40...125°C.

В МК предусмотрены пять режимов энергопотребления:

- активный режим;
- режим сна (Sleep mode);
- режим глубокого сна (Deep-sleep mode);
- режим пониженного энергопотребления (Power-down mode);
- глубокий режим пониженного энергопотребления (Deep power-down mode).

В активный режим МК переходит сразу после сброса, вызванного включением питания. В этом режиме все модули МК активны. В режиме сна процессорное ядро не активно – оно пробуждается по прерыванию или событию, а все

Таблица. Модификации МК QN9030 и QN9090

Параметр	QN9030HN	QN9030THN	QN9030HN	QN9030THN
Объем флэш-памяти, Кбайт	320	320	640	640
Объем SRAM, Кбайт	88	88	152	152
NTAG	+	–	+	–
Корпус	HVQFN40 (6×6×0,85 мм)			

остальные модули активны. В режиме глубокого сна помимо процессорного ядра в неактивный режим переводятся некоторые модули МК. Максимальная частота тактирования снижается с 28 до 12 МГц; также запрещены все операции DMA. Время пробуждения из этого режима занимает больше циклов, чем при пробуждении из режима сна.

В режиме глубокого сна запрещен доступ к памяти SRAM. Она может находиться в одном из трех режимов: в нормальном состоянии, в состоянии пониженного энергопотребления с сохранением данных и в режиме «выключено». Могут быть отключены следующие модули: флэш-память, АЦП, аналоговый компаратор, датчики температуры и провала напряжения, некоторые осцилляторы. Отдельные периферийные модули могут оставаться активными при условии сохранения тактирования и неиспользовании каналов DMA. После пробуждения процессор начинает выполнять код с того места, где произошел переход в режим глубокого сна.

В режиме пониженного энергопотребления выключается основной цифровой домен, память SRAM выключена или

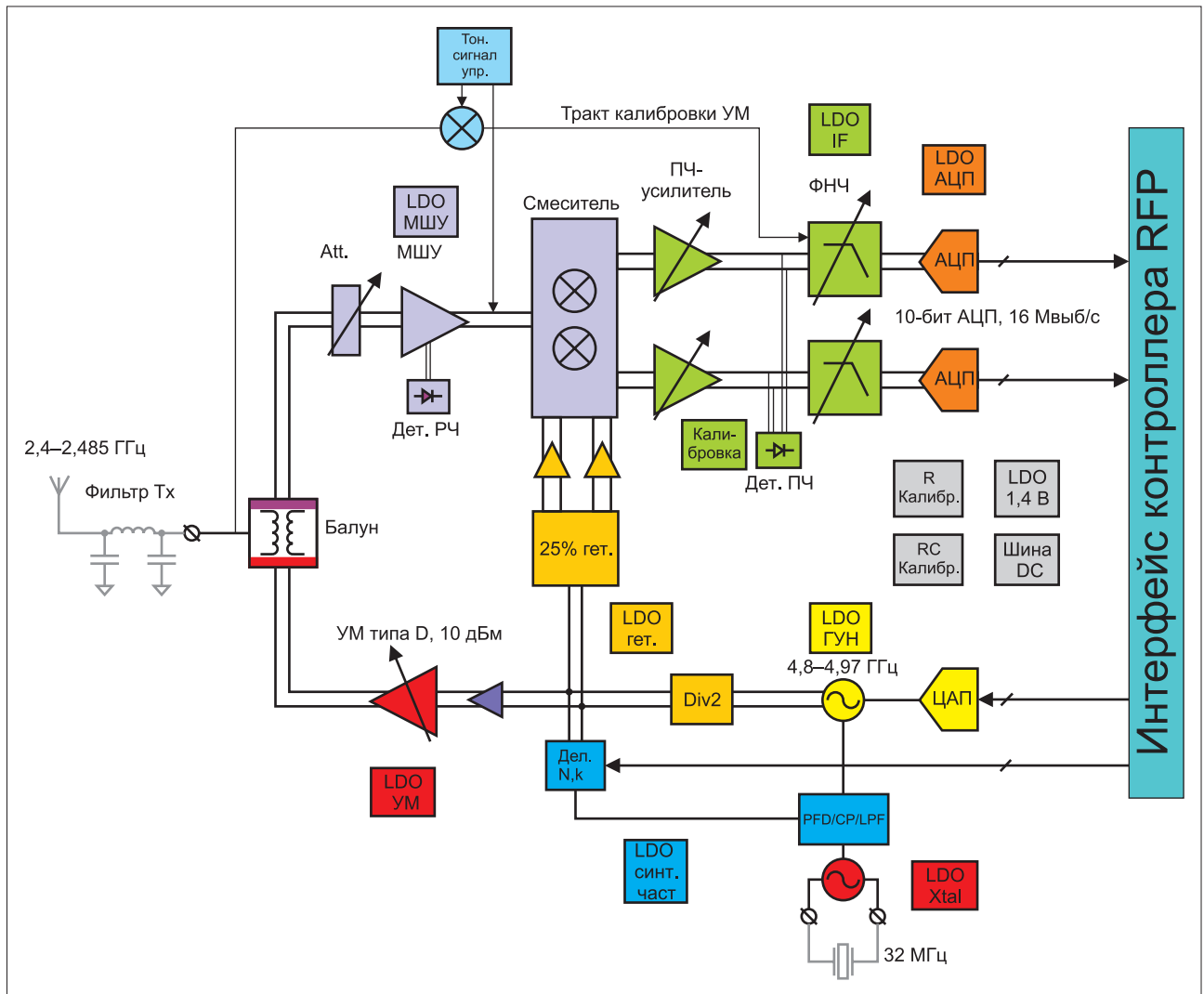


Рис. 2. Структурная схема радиомодуля МК QN9030 и QN9090

переведена в режим сохранения данных. Активными могут оставаться лишь каналы интерфейсов I2C0, USART0 и SPI0, но частота их тактирования уменьшается до 32 кГц. После пробуждения процессор стартует с загрузочного кода, чтобы определить порядок инициализации МК. В режиме глубокого пониженного энергопотребления выключены практически все модули и энергопотребление минимально. При пробуждении происходит полная перезагрузка МК.

Беспроводной приемопередатчик реализует протокол BTLE 5.0. Приведем некоторые основные параметры модуля:

- чувствительность приемного устройства при скорости передачи данных 1 Мбит/с: -97 дБм;
- чувствительность приемного устройства при скорости передачи данных 2 Мбит/с: -93 дБм;
- ток потребления в режиме приема: 4,3 мА;
- мощность передатчика (макс.): 11 дБм при диапазоне 46 дБ;
- ток потребления при выходной мощности сигнала 10 дБм: 20,3 мА;

- ток потребления при выходной мощности сигнала 3 дБм: 9,4 мА;
- ток потребления при выходной мощности сигнала 0 дБм: 7,4 мА;
- шифрование: AES-128 или AES-256.

Структурная схема радиомодуля представлена на рисунке 2. Его приемник основан на архитектуре с промежуточной частотой и состоит из малошумящего усилителя (МШУ), смесителя с понижающим преобразованием I/Q, последующим усилением и фильтрацией фильтрами низких частот (ФНЧ) с дальнейшим преобразованием с помощью 10-бит АЦП производительностью 16 Мвыб/с. Используется автоматическая регулировка усиления. Демодуляция сигнала происходит в цифровом домене. Индикатор уровня принимаемого сигнала RSSI «привязан» к принимаемому кадру и может контролироваться в течение всего времени приема.

Передатчик радиомодуля использует двухточечную модуляцию. Применяется частотная и фазовая модуляция передаваемого сигнала. Несмотря на довольно низкое энергопотребление

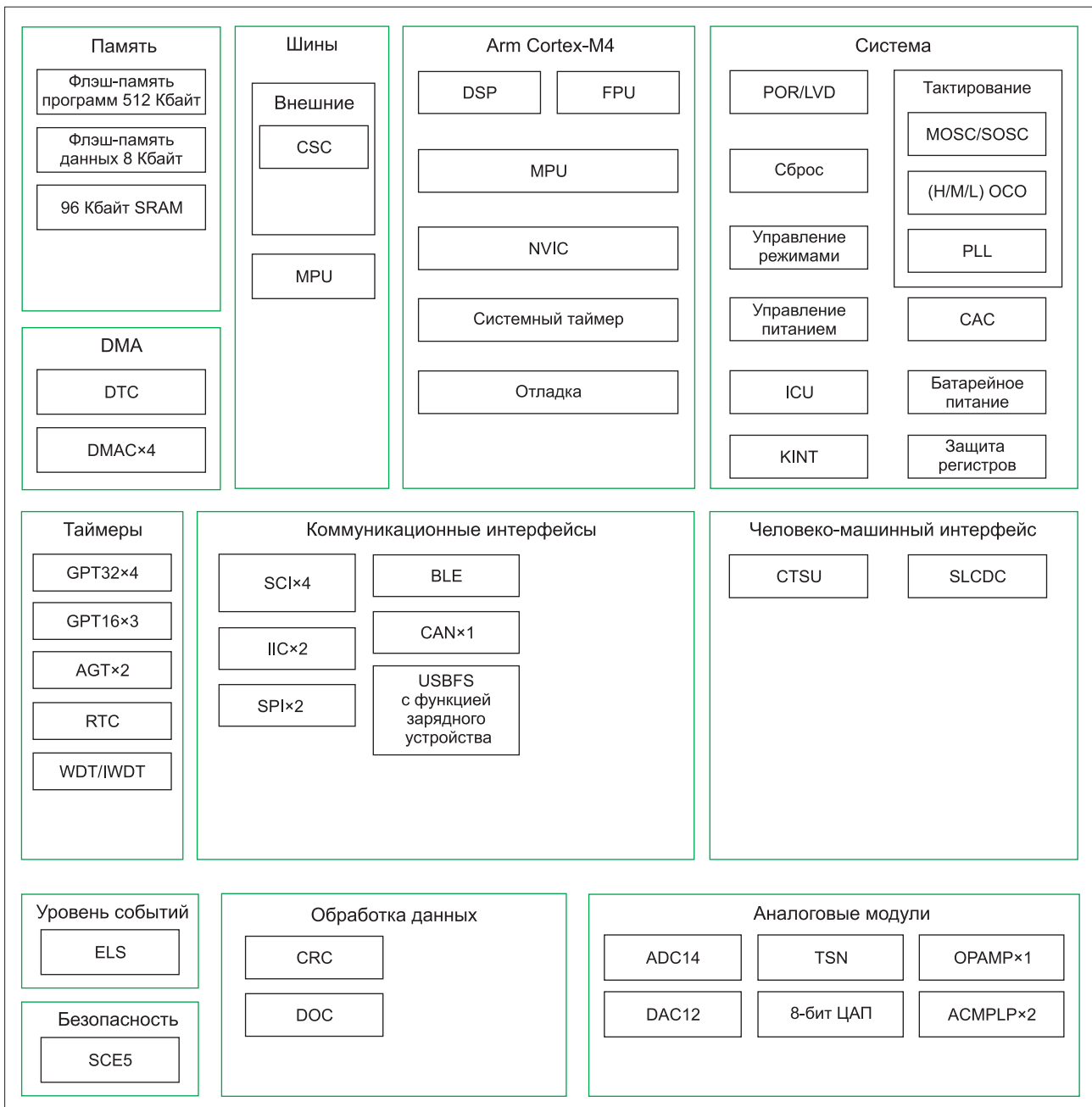


Рис. 3. Структурная схема МК RA4W1 компании Renesas

во время приема и передачи сигнала, приложениям с батарейным питанием, где на счету каждый микроватт, требуется как можно больше сократить мощность потребления. С этой целью в МК QN9030 и QN9090 в период ожидания сигнала используется выключение питания части узлов приемопередатчика, и предусмотрены таймеры с низким энергопотреблением для канального уровня. Они отвечают требованиям точности синхронизации стандарта Bluetooth Low Energy.

Предусмотрены также таймеры для пробуждения модуля, но поскольку они не отвечают требованиям стандарта точности синхронизации, их используют лишь в случае, когда соединение Bluetooth неактивно. В этом состоянии можно сохранять все данные калибровки в соответствующих регистрах; при этом немного увеличивается ток потребления, но зато сокращается время перехода в активный режим, и нет необходимости повторять процедуру калибровки.

Радиоконтроллер RFP управляет радиомодулем с помощью встроенного конечного автомата, формирующего последовательность приема и передачи данных. При передаче данных контроллер RFP обеспечивает включение ФАПЧ и выбор несущей частоты, активирует передающий тракт, управляет усилителем мощности. После окончания передачи данных контроллер RFP отключает усилитель мощности и выключает узлы тракта передачи. При приеме данных контроллер активирует приемный тракт, включает питание необходимых узлов, иницирует узел AGC для регулировки усиления при обнаружении пакета и управляет цифровой демодуляцией сигнала. После окончания приема контроллер отключает приемный тракт.

Вкратце остановимся на некоторых модулях, которые помогут инженерам составить более полное представление о данных МК. На наш взгляд, достоин упоминания 10-канальный ШИМ: все каналы независимы и содержат 16-бит регистр сравнения. Причем, возможен режим, когда один ведущий канал управляет остальными. Не у каждого МК можно найти модулятор инфракрасного сигнала, тогда как такой модулятор IRB имеется в МК QN9030 и QN9090. Он соответствует протоколам RC5, RC6, RCMM и SIRCS, но не поддерживает протокол IRDA.

Модуль NTAG предназначен для реализации интерфейса NFC. Передача сигнала осуществляется на несущей частоте 13,56 МГц. Скорость передачи данных составляет 100 Кбит/с, максимальное расстояние до метки составляет 100 мм. Модуль содержит 64-байт энергонезависимую память со сроком хранения данных 20 лет; износостойкость памяти составляет 200 тыс. циклов.

Модуль DMIC поддерживает одно- и двухканальные цифровые микрофоны с импульсно-плотностной моду-

ляцией PDM. Чтобы снизить энергопотребление модуля, в нем используется детектор голосовой активности HWVAD с настраиваемым уровнем обнаружения речи. Модуль DMIC оптимизирован под частоту выборки звукового сигнала 16 кГц. Для каждого канала предусмотрен буфер FIFO на 16 записей.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ RA4W1 КОМПАНИИ RENESAS

МК компании Renesas, как и рассмотренные выше МК QN9030 и QN9090 компании NXP, базируются на процессорном ядре ARM Cortex-M4 с модулем защиты памяти. Эти МК тактируются одинаковой частотой 48 МГц. На этом сходство не заканчивается: как и МК QN9030 и QN9090, микроконтроллеры RA4W1 поддерживают протокол Bluetooth Low Energy 5.0. За счет большего числа линий ввода/вывода МК RA4W1 производятся в 56-выводном корпусе QFN размером 7×7 мм, в отличие от своих собратьев QN9030 и QN9090, довольствующихся 40-выводным корпусом. Структурная схема МК RA4W1 приведена на рисунке 3. Напряжение питания МК находится в диапазоне 1,8–3,6 В, а диапазон рабочей температуры составляет –40...85°C.

Компания Renesas, как и NXP, не привнесла в свои беспроводные МК каких-либо новшеств, а использовала готовые, проверенные на прежних модификациях периферийные модули. В целом это разумный подход: компании выпустили экономичные МК, призванные стать скромными «рабочими лошадками» в мире беспроводных коммуникаций.

Однако помимо сходства между МК этих компаний у них немало и различий. Так, например, у МК RA4W1 Renesas – иной подход к реализации режимов пониженного энергопотребления. Всего насчитываются четыре режима энергопотребления:

- активный режим;
- режим сна (Sleep mode);
- программный режим останова (Software Standby mode);
- режим полусна (Snooze mode).

В режиме сна процессорное ядро не активно, содержимое регистров процессора сохраняется. Все остальные модули работают в обычном режиме, доступны все источники прерываний. Выход из режима сна осуществляется по любому прерыванию. В режиме полусна активна часть периферийных модулей, процессор остановлен. В режиме программного останова процессор и большинство периферийных модулей и часть осцилляторов остановлены, но содержание регистров и памяти сохраняется. Выход из этого режима производится по прерываниям. Кроме того, в МК предусмотрена возможность независимого выключения любого периферийного модуля (module-stop function).

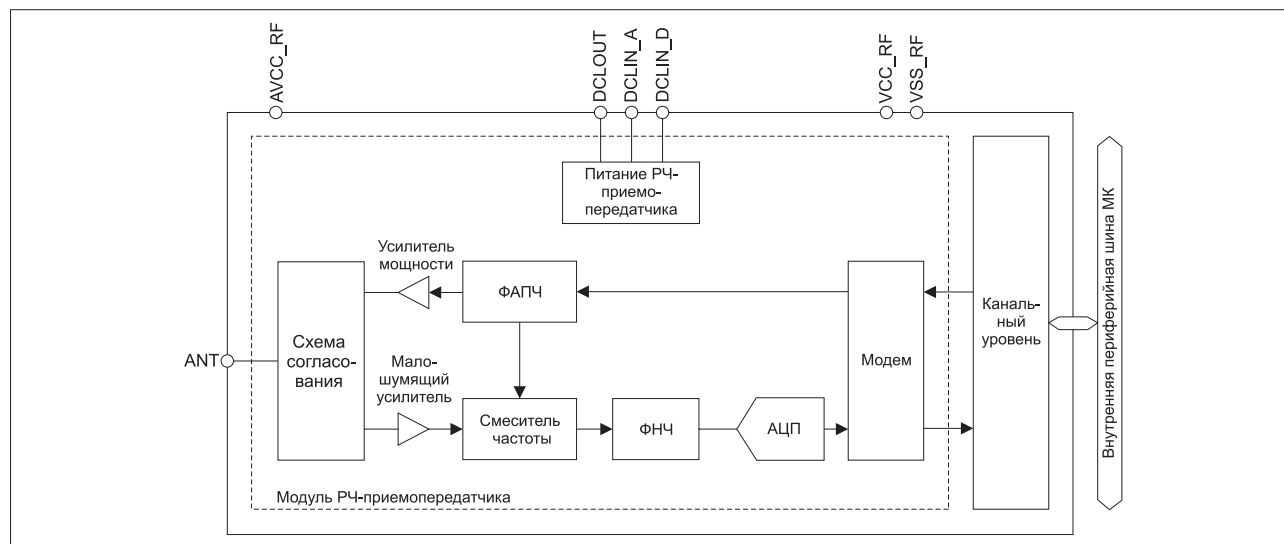


Рис. 4. Структурная схема модуля Bluetooth Low Energy 5.0 МК RA4W1

Однако в каждом из этих режимов, кроме режима программного останова, можно выбрать пять опций:

- высокоскоростной режим работы;
- режим средней скорости выполнения кода;
- низкоскоростной режим;
- режим пониженного напряжения;
- субосцилляторный режим.

Перечисленные опции реализуются посредством изменения системной частоты тактирования, а также частоты тактирования периферийных модулей и флэш-памяти. В высокоскоростном режиме системная частота составляет 48 МГц, флэш-память тактируется частотой 32 МГц, напряжения питания находится в пределах 2,4–3,6 В. В режиме средней скорости напряжение питания меняется в диапазоне 1,8–3,6 В, флэш-память и периферия тактируются частотой 12 МГц, но при напряжении питания 1,8–2,4 В эти частоты уменьшаются до 8 МГц.

В режим пониженного напряжения МК переходит после сброса. В этом режиме напряжение питания находится в пределах 1,8–3,6 В, флэш-память и периферия тактируются частотой 1–4 МГц. И, наконец, в субосцилляторном режиме тактирование осуществляется частотой 37,6832 кГц, а напряжение питания составляет 1,8–3,6 В.

Структурная схема модуля Bluetooth Low Energy 5.0 показана на рисунке 4. Ниже приведены некоторые основные параметры модуля:

- чувствительность приемного устройства при скорости передачи данных 125 Кбит/с: -105 дБм;
- чувствительность приемного устройства при скорости передачи данных 500 Кбит/с: -100 дБм;
- чувствительность приемного устройства при скорости передачи данных 1 Мбит/с: -95 дБм;
- чувствительность приемного устройства при скорости передачи данных 2 Мбит/с: -92 дБм;
- мощность передатчика (макс.): 0–4 дБм;
- шифрование: AES-128.

Для того чтобы подробнее описать МК, отметим несколько периферийных модулей. Выделим относительно широкий набор аналоговой периферии. Нечасто в МК встретишь 14-бит АЦП – обычно производители ограничиваются 12- или 10-бит АЦП. К тому же, типовая абсолютная погрешность этого АЦП

составляет всего лишь $\pm 1,25$ МЗР. В состав аналоговой периферии входят также 12- и 8-бит ЦАП, аналоговый компаратор и операционный усилитель.

Периферийный 11-канальный модуль сенсорной клавиатуры (CTSU) и контроллер сегментного ЖКД (SLCDC) позволяют реализовать простой человеко-машинный интерфейс. Контроллер SLCDC имеет девять выводов для управления сегментами и четыре общих вывода.

МК EFR32BG22, EFR32FG22 СЕМЕЙСТВА WIRELESS GECKO КОМПАНИИ SILABS

В отличие от компаний Renesas и NXP, в SiLabs предпочитают задействовать более новое процессорное ядро ARM Cortex-M33 на архитектуре Armv8-M с использованием проприетарной технологии безопасности ARM TrustZone. У ядра Cortex-M33 – большие функциональные возможности, чем у Cortex-M4; выше и его производительность. Относительно подробно различие этих ядер показано в [4]. Кроме того, в МК EFR32BG22 это ядро тактируется более высокой частотой 76,8 МГц, чем МК от Renesas и NXP, рассмотренные выше. У МК EFR32FG22 частота тактирования ниже – 38,4 МГц.

Основное различие МК EFR32BG22 и EFR32FG22 заключается в том, что последний поддерживает только проприетарный 2,4-ГГц беспроводной протокол, а первый еще и протоколы Zigbee и Bluetooth Low Energy 5.2. МК производятся в корпусах QFN32 (4x4x0,85 мм) или QFN40 (5x5x0,85 мм). Структурная схема МК приведена на рисунке 5. Напряжение питания МК: 1,71–3,6 В; диапазон рабочей температуры: -40...125°C.

Предусмотрены шесть режимов энергопотребления:

1. EM0. Активный режим, все модули МК доступны.
2. EM1. Процессорное ядро Cortex-M33 неактивно, все остальные модули доступны.
3. EM1 P. Частный случай режима EM1, процессорное ядро и высокоскоростные периферийные модули выключены, радиомодуль активен.
4. EM2. Процессорное ядро неактивно, большинство высокоскоростных периферийных модулей выключены или их функциональные возможности ограничены, высокоскоростные осцилляторы выключены, радиомодуль неактивен. Содержимое памяти и регистров сохраняется.

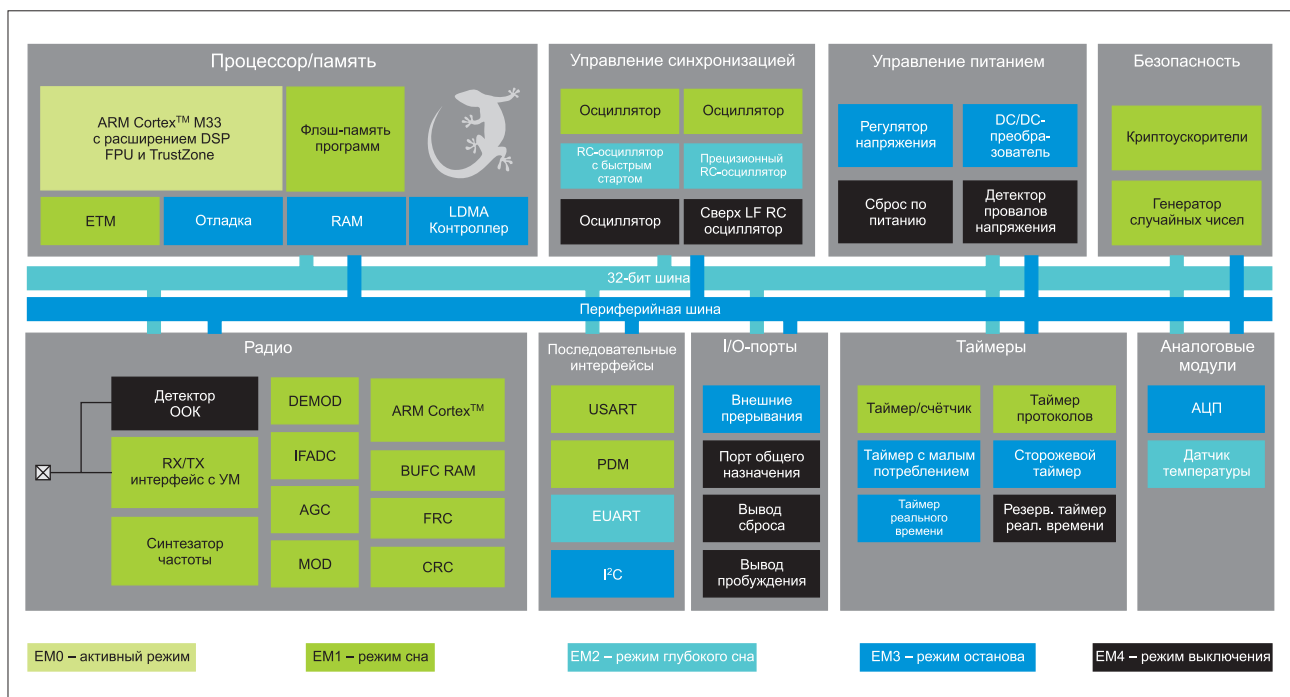


Рис. 5. Структурная схема МК EFR32BG22 и EFR32FG22 компании SiLabs

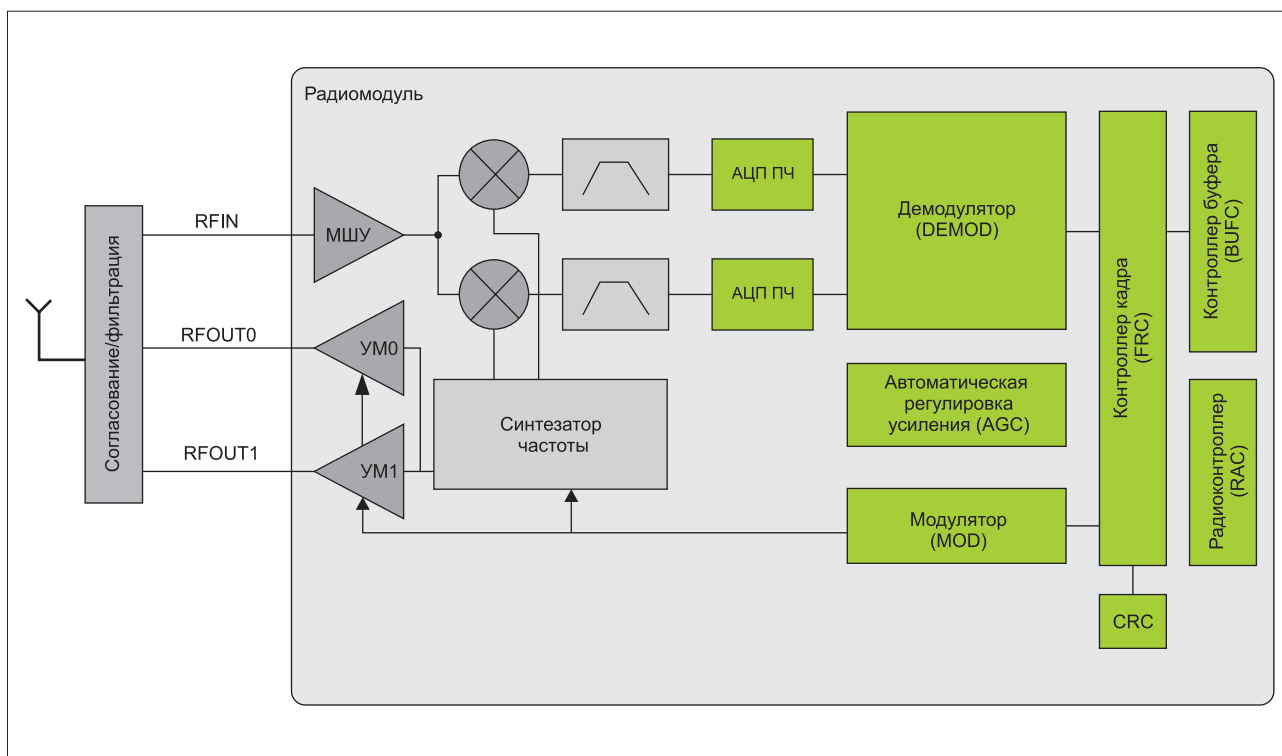


Рис. 6. Структурная схема радиомодуля МК EFR32BG22 и EFR32FG22

5. EM3. Выключены низко- и высокоскоростные осцилляторы, большинство периферийных модулей также выключены. Содержимое памяти и регистров сохраняется.

6. EM4. В этом режиме – самое низкое энергопотребление. Содержимое памяти и регистров не сохраняется. Для пробуждения МК требуются сброс и перезагрузка.

В режимах EM0–EM3 для уменьшения энергопотребления возможно изменение (масштабирование) напряжения питания цифрового домена МК. Изменение напряжения происходит за счет управления встроенным LDO-регулятором. Предусмотрены следующие три напряжения питания.

1. VSCALE0. Напряжение питания 1,1 В, используется в режимах энергопотребления EM0–EM3.
2. VSCALE1. Напряжение питания 1,0 В, используется в режимах энергопотребления EM0 и EM1 при частоте тактирования не более 40 МГц и в режимах EM2 и EM3.
3. VSCALE2. Напряжение питания 0,9 В, используется в режимах энергопотребления EM2 и EM3.

В отличие от рассмотренных выше МК, радиомодуль МК EFR32BG22 является многопротокольным. Помимо проприетарного протокола компании, он поддерживает также стандартные протоколы Zigbee и Bluetooth Low Energy 5.2. В радиомодуль интегрирован процессор ARM Cortex-M 0+.

Перечислим некоторые его основные параметры:

- виды модуляции: 2-FSK, 2-GFSK, 4-FSK, MSK, GMSK, O-QPSK с полусинусоидой, ASK/OOK, DBPSK TX;
- поддерживается манчестерский код и NRZ;
- скорость передачи данных: 100 бод/с...2 Мбод/с (до 4 Мбит/с);
- ток потребления в режиме приема: 2,5 мА;
- чувствительность при 250 Кбит/с и модуляции O-QPSK DSSS: -102,3 дБм;
- чувствительность при 125 Кбит/с и модуляции GFSK: -106,7 дБм;
- чувствительность при 1 Мбит/с и модуляции GFSK: -98,9 дБм;
- чувствительность при 2 Мбит/с и модуляции GFSK: -96,2 дБм;

- выходная мощность передатчика (макс.): 6 дБм;
- ток потребления в режиме передачи при выходной мощности 0 дБм: 3,4 мА;
- ток потребления в режиме передачи при выходной мощности 6 дБм: 7,5 мА.

Структурная схема радиомодуля приведена на рисунке 6. Он поддерживает буферизованную и небуферизованную передачу и прием данных. В первом случае используется буферный контроллер BUFC. Для хранения данных он использует системное ОЗУ; при этом каждый буфер программируется отдельно: устанавливаются размеры буфера, условия формирования прерываний и переполнения, а также его расположение. При приеме данных после синхронизации кадров они из демодулятора перемещаются непосредственно в буфер. При передаче данных они перемещаются из буфера в демодулятор вслед за вставленной преамбулой и синхронизирующим словом.

В большинстве случаев рекомендуется использовать буферизованную передачу данных, но если по каким-либо причинам это нежелательно, возможна прямая небуферизованная передача. В этом случае используется двухвыводная схема, в которой битовый сигнал синхронизации передается через отдельный вывод.

Контроллер FRC радиомодуля реализует расширенную обработку кадров:

- формирование преамбулы и кадровой синхронизации для передаваемого кадра;
- полную синхронизацию принимаемого кадра;
- сопоставление адресов принятых кадров, дополнительную фильтрацию адресов и кадров;
- поддержку кадров переменной длины;
- расчет и проверку кода исправления ошибок (CRC);
- настройку порядка передачи битов.

Из специализированных периферийных устройств можно выделить только модуль импульсно-плотностной модуляции (PDM). Главным отличием МК EFR32BG22 и EFR32FG22 помимо радиомодуля является повышенный уровень безопасности за счет фирменной технологии ARM TrustZone.

Выводы

Мы рассмотрели беспроводные МК компаний NXP, Renesas и SiLabs. Все компании использовали, на взгляд автора, единый подход в разработке. Суть его заключается в создании экономичного МК. При этом основное внимание уделено режимам пониженного энергопотребления и радиомодулям. Все остальные решения, реализованные в новых МК, использовались и в предыдущих семействах МК этих компаний. Таким образом, рассмотренные МК не могут удивить специализированной периферией или вычислительной мощностью, но в то же время не вызывают нареканий по надежности и устойчивости работы.

Разработчики также не должны испытывать трудностей при использовании новых МК, если они уже применяли предыдущие модели микроконтроллеров этих компаний. ⇐

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Сенников. Микроконтроллеры беспроводной связи CC26x0 и CC13x0 семейства SimpleLink//Электронные компоненты. № 4. 2017.
2. В. Сенников. Беспроводные СМК семейств DRA7ххР от Texas Instruments//Электронные компоненты. № 7. 2018.
3. А. Чистохвалов. Беспроводной микроконтроллер AXM0F243 от ON Semiconductor//Электронные компоненты. № 4. 2019.
4. А. Чистохвалов. Беспроводные микроконтроллеры с процессорным ядром Cortex-M33//Электронные компоненты. № 6. 2019.
5. Г. Воронцов. Беспроводные микроконтроллеры семейства STM32WB5хх от STMicroelectronics//Электронные компоненты. № 4. 2019.
6. Г. Воронцов. Беспроводные микроконтроллеры//Электронные компоненты. № 2. 2020.

КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА



Андрей Лебедев, руководитель направления полупроводников, ООО «Сканти», laa@scanti.ru

При сравнении контроллеров с Bluetooth следует учитывать не только схожие базовые параметры (в т. ч. поступающие от разработчика ядер МК), но и характеристики, отличающие одно семейство от другого.

Эти мелкие, на первый взгляд, детали могут определять области применения контроллеров. Например, RA4W1 – наиболее интегрированный вариант для устройств Bluetooth «среднего класса», использующихся в человеко-машинных интерфейсах для контроля и изменения режимов работы устройства. Остальные описанные в статье контроллеры предназначены для более бюджетных устройств, не требующих ручного управления.

Перечислим отличия BLE-микроконтроллеров Renesas от аналогов NXP и SiLabs:

- 1) поддержка всех функций стандарта Bluetooth 5.0, включая LE 1M, 2M, Coded PHY (long range), LE Advertising Extension, программная поддержка ячеистых сетей;
- 2) наиболее полный набор интерфейсов ввода/вывода и аналоговой периферии, к которым относятся контроллеры сенсорного ввода (11 каналов) и сегментного ЖКИ-дисплея, (9x4), CAN, USB, UART, SPI/I2C, АЦП 14-бит, ЦАП 12-бит, ОУ, компаратор и датчик температуры;
- 3) чувствительность BLE-приемника: до –105 дБ (при скорости 125 Кбит/с и мощности сигнала 4 дБм);
- 4) потребление радиоблока в режиме приема и передачи, соответственно: до 3,2 мА; до 4,5 мА;
- 5) не требуется внешняя согласующая ВЧ-схема.

