БЕСПРОВОДНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ С ПРОЦЕССОРНЫМ ЯДРОМ CORTEX-M33

АНДРЕЙ ЧИСТОХВАЛОВ, инженер-разработчик

В статье кратко описано процессорное ядро ARM Cortex-M33, и рассмотрены беспроводные микроконтроллеры производства компаний Dialog Semiconductors, Nordic Semiconductor и SiLabs на основе этого ядра. В следующих статьях этого цикла планируется рассмотреть микроконтроллеры других компаний, тоже созданные на основе этого ядра.

ВВЕДЕНИЕ

В 2016 г. компания ARM заявила о создании нового процессорного ядра Cortex-M33 на архитектуре Armv8-M с использованием проприетарной технологии ARMTrustZone, суть которой заключается в использовании модулей безопасности (Security Extensions). Новинка пришлась очень кстати, т. к. проблемы защиты данных и безопасность в настоящее время весьма актуальны.

Словарь

ACMP – аналоговый компаратор
AHB – многоуровневая матричная шина
AU – модуль обработки аудиосигналов
BUFC – контроллер буферизацией данных РЧ-модуля
C-AHB – шина команд AHB
CMAC – контроллер доступа к медиасреде (MAC)
D-AHB – шина AHB для отладки
DPPI – программируемая распределенная система коммутации периферии
DPPIC – контроллер DPPI
E-AHB – шина AHB периферийных устройств
EGU – блок формирования событий
EMU – блок управления энергопотреблением
ETM – встроенная макроячейка трассировки
ITM – макроячейка инструментальной трассировки
KMU – блок управления ключами
LDMA – связной контроллер прямого доступа к памяти
NVMC – контроллер флэш-памяти
FPU – модуль операций с числами с плавающей запятой
GPIOTE – модуль задач портов ввода вывода
MPU – модуль защиты памяти
MSC – контроллер системной памяти
NVMC – контроллер флэш-памяти
PCM – кодово-импульсная модуляция
PDN – импульсно-плотностная модуляция
PCN – импульсно-кодовая модуляция
PPI – программируемые периферийные соединения
PRS – периферийная быстродействующая система коммуникации
RAC – радиоконтроллер RAC
RFIO – радиоинтерфейс
S-AHB – системная шина AHB
SNS – контроллер сенсорных узлов
VMC – контроллер ОЗУ
UICR – регистры конфигурации пользовательской информации

Спустя некоторое время многие компании стали выпускать микроконтроллеры, построенные на этом ядре. Мы попытаемся сделать небольшой обзор только беспроводных МК с ядром Cortex-M33 ы. Еще одна очень важная особенность заключается в наличии сопроцессорного интерфейса, обеспечивающего подключение к ядру аппаратных ускорителей. И, разумеется, отличная, лучшая в отрасли энергоэффективность. Три этих кита, наверное, и позволяют завоевывать рынок Cortex-M33.

Для многих пользователей важным является наличие инструкций и соответствующих аппаратных модулей SIMD/DSP, но этими возможностями располагал и предшественник Cortex-M4. В Cortex-M33 модуль защиты памяти MPU может защищать до 16 областей адресного пространства; напомним, что в Cortex-M4 таковых было только 8. Причем, защищаемые области могут располагаться и в доверенном, и в недоверенном адресном пространстве.

Для связи ядра с внешними устройствами используются четыре шины AHB: C-AHB; D-AHB; E-AHB; S-AHB.

Поскольку мы рассматриваем, в основном, «железо», не будем подробно останавливаться на особенно-

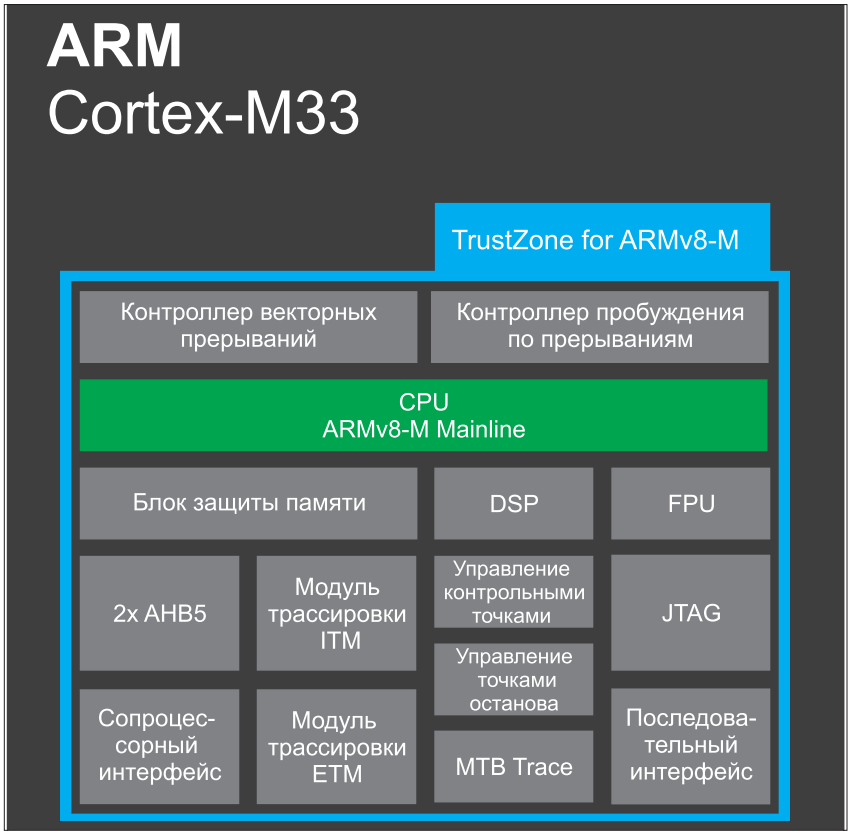

Рис. 1. **Структурная схема ядра Cortex-M33**

стях защиты с помощью ARMTrustZone. Однако нельзя не сказать несколько слов об этой технологии, говоря о МК, созданных на ядрах Cortex-M33, тем более что во всех рассмотренных ниже МК используется эта технология.

Напомним, что в ARMTrustZone для архитектуры Armv8-M коды, данные и аппаратные модули разделяются на доверенные (защищенные) и недоверенные (незащищенные). В документации ARM для обозначения этих областей используются термины secure world и non-secure world, соответственно.

Из незащищенной области нельзя напрямую попасть в защищенную, тогда как перемещение в обратном направлении не возбраняется и не ограничивается. Таким образом, загрузка ПО всегда происходит в защищенной зоне. Если загрузка ПО произойдет в незащищенную зону, то станет невозможно попасть в доверенную область.

Каждый адрес адресного пространства «привязан» к защищенной или незащищенной зоне. При обращении со стороны процессора новый модуль атрибуции безопасности определяет принадлежность запрашиваемого адреса к конкретной области. Этот процесс показан на рисунке 3. После прохождения модуля атрибуции безопасности адрес проверяется также модулем защиты памяти, если таковой используется.

В ARMTrustZone для архитектуры Armv8-M, в отличие от предыдущей архитектуры Armv7, оба режима работы (привилегированный и непривилегированный) могут использоваться в защищенном и незащищенном режимах, что порождает четыре варианта работы ЦП. При работе в защищенной области памяти ЦП тоже автоматически переходит в защищенный режим. Соответственно, при работе в незащищенном адресном пространстве и ЦП работает в незащищенном режиме. Для защищенного и незащищенного режимов имеется отдельный набор стеков и указателей стека.

При работе в режиме реального времени необходим детерминизм, для выполнения которого предусмотрена возможность вызова функции из защищенной области со стороны функции незащищенной области. Такой вызов может осуществляться при соблюдении ряда правил. Вызов может выполняться через предварительно определенные точки входа в защищенную область.

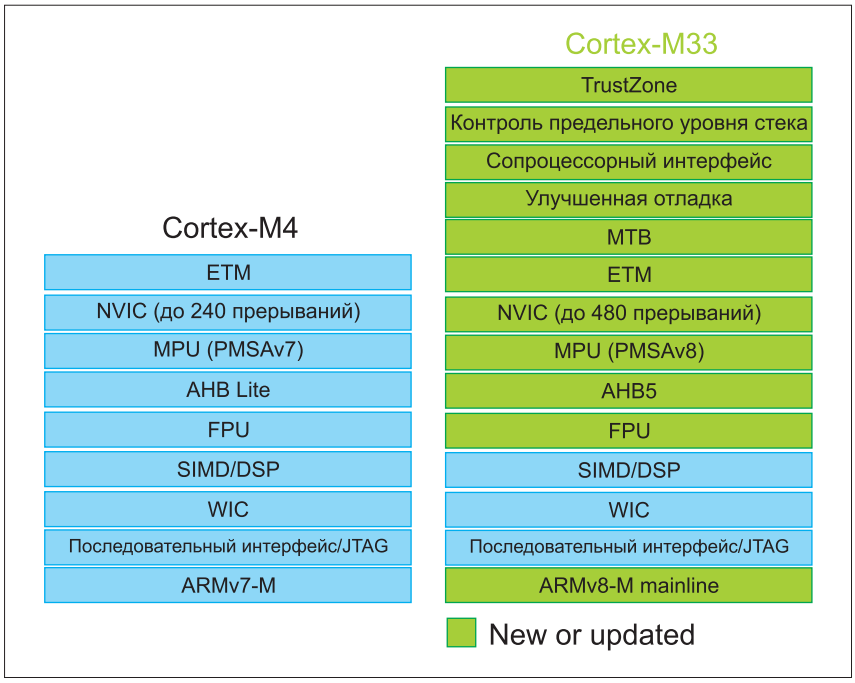

Рис. 2. **Различия между ядрами Cortex-M33 и Cortex-M4**

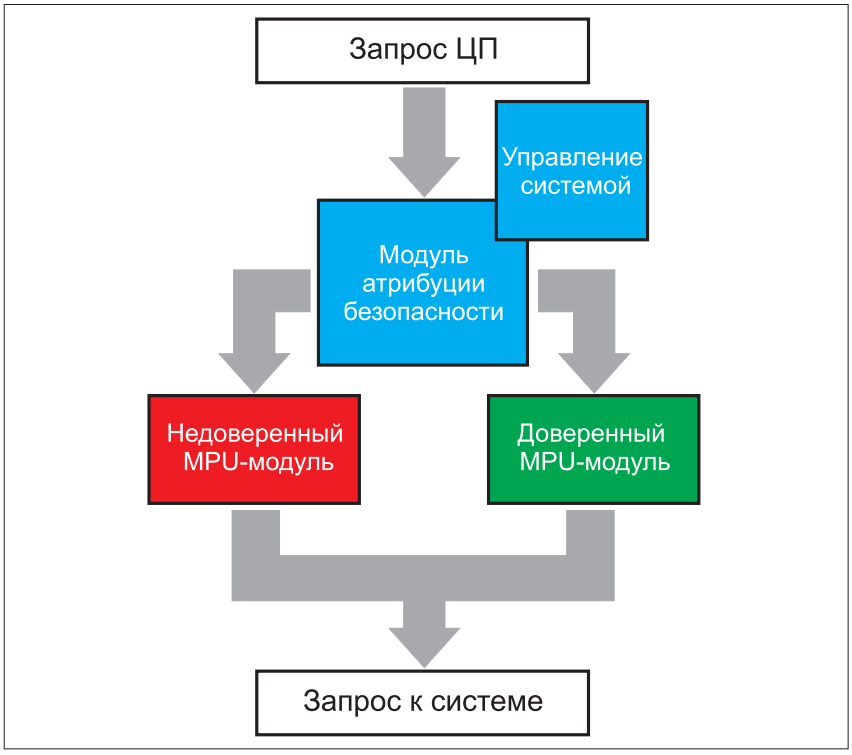

Рис. 3. **Прохождение запроса ЦП через модуль атрибуции безопасности**

БЕСПРОВОДНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ DA1469X ОТ DIALOG SEMICONDUCTORS

В МК семейства DA1469x встроен РЧ-модуль, реализующий протокол Bluetooth 5.1 low energy (BLE 5.1). В ядре используется 8-канальный модуль защиты памяти и модуль операций с числами с плавающей запятой FPU; тактовая частота ядра достигает 100 МГц. Структурная схема МК приведена на рисунке 4. В таблице 1 указаны основные различия между МК семейства DA1469x.

Программный код записывается либо во встроенное ОЗУ, либо хранится во внешней флэш-памяти, связанной с МК через интерфейс QSPI. При этом используется контроллер 4-входного ассоциативного кэша. Объем ОЗУ составляет 512 Кбайт. В МК встроены аппаратные криптоускорители AES-256, SHA-1, SHA-256, SHA-512 и FIPS 140–2.

Кратко рассмотрим некоторые основные узлы МК. Коммуникационные интерфейсы содержат три канала UART с максимальной скоростью передачи данных 1 Мбит/с, два канала SPI, два канала I2C, USB 1.1 и до восьми каналов I2S/PCM. Контроллер управления шаговым двигателем использует до четырех внешних выводов.

По питанию МК разделен на семь доменов, которые могут выключать-

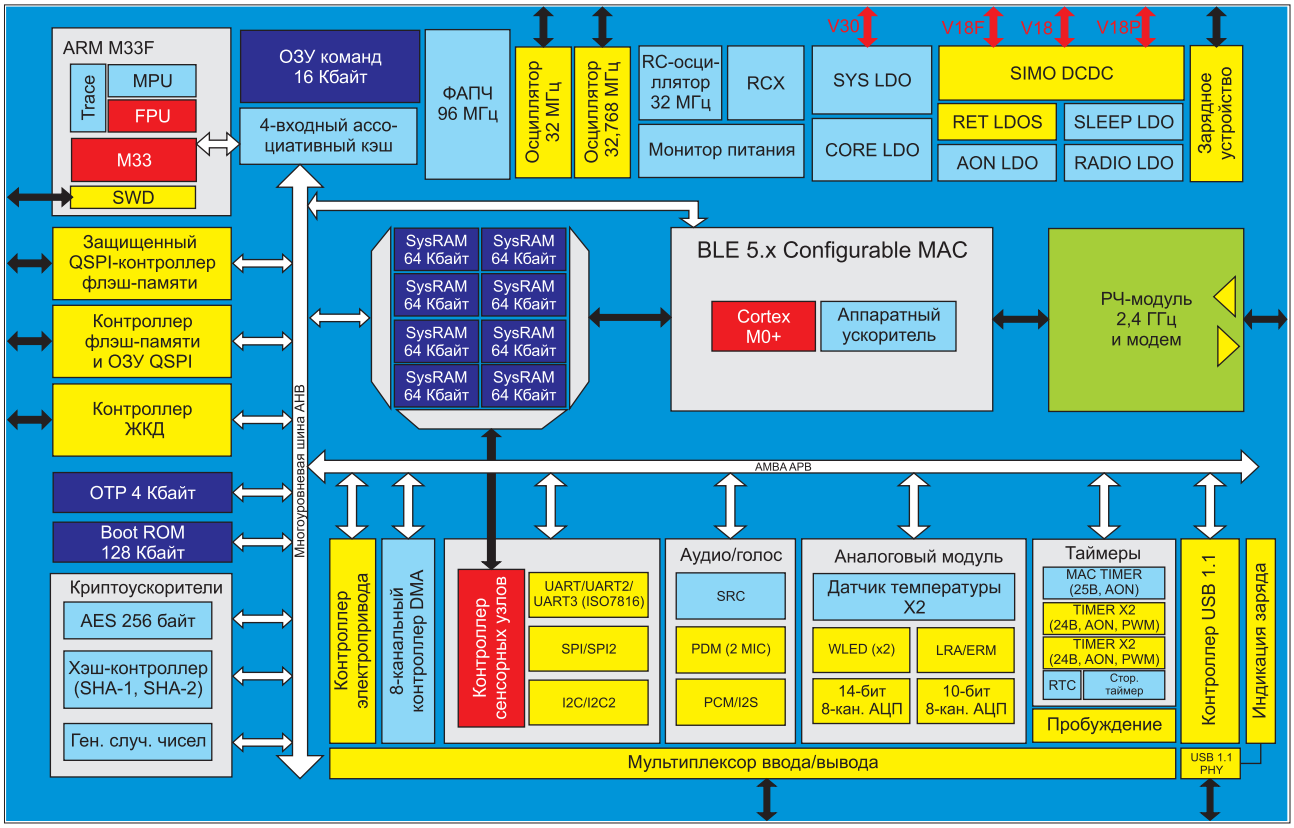

Рис. 4. **Структурная схема МК семейства DA1469x от Dialog Semiconductors**

ся/включаться независимо друг от друга, что позволяет уменьшить энергопотребление за счет отключения не используемых в конкретном приложении доменов. Кроме того, в МК предусмотрены следующие режимы пониженного энергопотребления.

- Гибернация. В этом режиме данные в ОЗУ не сохраняются, тактирование отключается, в т. ч. отключаются часы реального времени; все домены также отключаются. Выход из этого режима возможен с помощью аппаратного сброса.
- Глубокий сон. В отличие от режима гибернации, в режиме глубокого сна продолжают работать часы реального времени, поэтому выход из этого режима возможен не только с помощью аппаратного сброса, но и за счет события, формируемого RTC.
- Расширенный режим сна. В данном случае может сохраняться содержание ОЗУ, а также осуществляется тактирование некоторых областей. Выход из этого режима происходит с помощью аппаратного сброса, а также по событиям, формируемым таймерами.
- Режим ожидания. В нем отключается питание неиспользуемых доменов, а остальные домены работают в активном режиме. Заметим, что содержимое конфигурационных регистров отключенных доменов не запоминается. Следовательно, если требуется, чтобы при пробуждении домены продолжили работу в прежнем режиме, содержание регистров необходимо сохранить в ОЗУ.

Таблица 1. **Микроконтроллеры семейства DA1469x**

Параметр	DA14691	DA14695	DA14697	DA14699
Емкость ОЗУ, Кбайт	384	512	512	512
Заряд батареи	–	+	+	+
Контроллер ЖКД	–	+	+	+
Контроллер сенсорных узлов	–	–	+	+
Драйверы светодиодов	–	–	+	+
Интерфейс QSPI	–	+	+	+
Управление электроприводом	–	–	+	+
Корпус	VFBGA86	VFBGA86	VFBGA100	VFBGA100

Выход из режимов пониженного энергопотребления осуществляется с помощью контроллера пробуждения. Он отслеживает состояние всех линий ввода/вывода и программируется для формирования сигнала пробуждения по внешнему событию.

Контроллер сенсорных узлов SNS представляет собой конечный автомат с ограниченным набором команд, достаточным для управления внешними простыми контроллерами и конфигурирования сенсорных узлов. Контроллер SNS является ведущим устройством на шине AHB и имеет прямое соединение с системным ОЗУ. Для управления также используются четыре 24-бит таймеров.

Контроллер ЖКД поддерживает параллельный последовательный интерфейс (SPI3/4) с дисплеями и имеет выделенный канал DMA. Конфигурирование контроллера для разных дисплеев осуществляется путем записи данных во встроенный регистровый файл. Поддерживается только один уровень изображения.

В состав аналоговой периферии входит 8-канальный 10-бит АЦП последовательного приближения и 8-канальный 14-бит сигма-дельта АЦП. Производительность 10-бит АЦП достигает 3,4 Мвыб/с, причем его энергопотребление при 100 Квыб/с составляет всего 13 мкА. Производительность сигма-дельта АЦП составляет 1 Квыб/с.

Модуль обработки аудиоданных AU имеет два цифровых интерфейса: с импульсно-плотностной модуляцией (PDM) и кодово-импульсной модуляци-

ей (PCM). Интерфейс PDM обеспечивает передачу стереоданных или поддержку двух моноканалов. Интерфейс PCM реализует передачу данных с частотой 192 кГц.

Конфигурируемый контроллер доступа к медиасреде CMAC, базирующийся на хорошо известном ядре Cortex-M0+, поддерживает несколько беспроводных протоколов. ПО для CMAC хранится во встроенном ОЗУ; обращение к ОЗУ происходит без дополнительных циклов ожидания. Контроллер также имеет прямой доступ ко всей периферии через шину APB. РЧ-модуль поддерживает выходную мощность передаваемого сигнала и регулируется в диапазоне –18…6 дБм. Чувствительность модуля составляет –97 дБм. Модуль связи RFIO с внешней антенной согласован с 50-Ом линией.

БЕСПРОВОДНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ NRF9160 ОТ NORDIC SEMICONDUCTOR

В МК nRF9160 встроен модем LTE, совместимый со стандартами и спецификациями 3GPP LTE release 13 Cat-M1, Cat-NB1 и 3GPP LTE release 14, Cat-NB1 и Cat-NB2. В ядре используется технология ARMTrustZone и модуль защиты памяти. Производительность МК составляет 243 EEMBC CoreMark. Структурная схема МК приведена на рисунке 5. МК выпускается в корпусе LGA размером 10×16×1,2 мм.

В отличие от рассмотренных выше МК DA1469x, в nRF9160 встроена флэш-память емкостью 1 Мбайт и, как следствие, объем ОЗУ уменьшен до 256 Кбайт, что выглядит логично, т. к. в нем уже не требуется хранить ПО.

Для управления флэш-памятью используется контроллер NVMC. Помимо записи и стирания памяти, он управляет конфигурационными регистрами. Флэш-память находится в защищенной области МК. Таким образом, даже когда флэш-память не объявляется защищенной, только ее отдельные регистры доступны из незащищенной зоны. Износостойкость флэш-памяти составляет 10 тыс. циклов. В состав контроллера NVMC входит блок управления ключами (KMU). Для хранения ключей он использует подмножество флэш-памяти, обозначаемое как регистры конфигурации пользовательской информации (UICR).

Контроллер VMC управляет разделенным на блоки ОЗУ. Каждый блок может включаться/выключаться независимо. Блоки можно разделить на секции. Для ускорения выполнения кода предусмотрен кэш команд; при попадании в кэш не требуется вводить дополнительные циклы ожидания.

В состав МК включены следующие коммуникационные интерфейсы:
- четыре модуля SPI;
- четыре модуля I2C;
- четыре модуля UART.

Программируемая распределенная система коммутации периферии DPPI обеспечивает синхронизацию периферийных устройств, позволяя им устанавливать соединение друг с другом в зависимости от задач или событий без вмешательства ЦП. В состав этой системы входит несколько периферийных шин, подключенных к каналам DPPI и контроллера DPPIC, который управляет системой DPPI.

Блок формирования событий EGU обеспечивает связь между уровнями управления, а также единый быстрый запуск ЦП и периферии через периферийную шину. Причиной формирования событий может служить не только программное обеспечение, но и аппаратное событие в периферийном устройстве. Эту функцию можно использовать, например, для запуска задачи с более низким приоритетом при выполнении задачи с более высоким приоритетом.

Модуль задач GPIOTE портов ввода-вывода предоставляет функциональную возможность доступа к выводам портов ввода-вывода. Он позволяет этим портам формировать события при изменении их состояния через систему программируемых периферийных соединений (PPI). Упомянем еще 4-канальный модуль ШИМ. Аналоговая периферия представлена 12-бит модулем АЦП последовательного приближения, который для увеличения производительности работает в режимах 8-, 10- и 12-бит преобразования. Производительность АЦП составляет 200 Квыб/с. Возможно подключение к АЦП до восьми аналоговых каналов. В состав модуля АЦП входит усилитель с программируемым коэффициентом усиления.

Приемник GPS поддерживает спецификацию GPS L1C/A. Работа модулей GPS и LTE мультиплексирована по времени с модулем LTE. Чувствительность приемника составляет –144 дБм при холодном старте и –147 дБм при горячем. Точность определения местоположения составляет 5 м. Возможно использование не только отдельной антенны, но и совместной с LTE.

В состав модуля LTE входят:
- РЧ-передатчик;
- модем основной полосы;
- встроенные ОЗУ и флэш-память;
- хост-процессор.

Модем и хост-процессор обеспечивают LTE L1, L2 и L3 (уровни 1, 2 и 3).

Основные параметры модема:
- рабочая полоса частот: 700–2200 МГц;
- чувствительность приемника при Cat-M1: –108 дБм;
- чувствительность приемника при Cat-NB1 и Cat-NB2: –114 дБм;
- диапазон мощности передатчика: –43…23 дБм;
- выходной импеданс: 50 Ом.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ EFR32BG21 И EFR32MG21 ОТ SiLabs

Компания выпустила сразу два беспроводных МК – EFR32BG21 семейства Blue Gecko и EFR32MG21 Mighty Gecko. В СнК EFR32BG21 встроен модуль Bluetooth 5, а в МК EFR32MG21 – многопротокольный РЧ-модуль для построения интернета вещей. В остальном между МК практически нет различий. В компании оба изделия называют не МК, а СнК. На рисунке 6 показана структурная схема МК EFR32MG21. В таблице 2 перечислены модификации МК. Оба МК выпускаются в корпусе QFN32 размером 4×4 мм.

Максимальная частота тактирования ядра составляет 80 МГц. Объем флэш-памяти достигает 1 Мбайт, а ОЗУ – 96 Кбайт. Контроллер системной памяти управляет флэш-памятью, доступ к которой имеют ЦП и DMA. Во флэш-памяти размещается информационный блок, где хранятся пользовательские данные. Через связной контроллер прямого доступа к памяти (LDMA) осуществляется доступ к памяти независимо от ПО. Такой подход позволяет реализовать достаточно сложные операции без участия ЦП.

В SiLabs подчеркивают низкое энергопотребление обоих МК и гибкое управление питанием. Блок управления энергопотреблением (EMU) управляет всеми режимами энергопотребления; всего насчитываются пять таких режимов EM0–EM4. Режим EM0 является активным. В нем доступны все без исключения ресурсы МК. В режиме EM1 процессорное ядро находится в состоянии сна, остальные ресурсы МК полностью доступны.

В режиме EM2 недоступно большинство периферийных модулей с высокой частотой тактирования. Недоступен РЧ-модуль, а также процессорное ядро в состоянии сна. В режиме EM3 доступны только низкочастотные осцилляторы и аналоговая периферия, но с ограничением функциональных возможностей. Содержимое ОЗУ сохраняется, но отдельные блоки ОЗУ могут быть отключены. Режим EM4 характеризуется минимальным энергопотреблением: в нем активные только три низкочастотных осциллятора.

Периферийная быстродействующая система (PRS) позволяет конфигури-

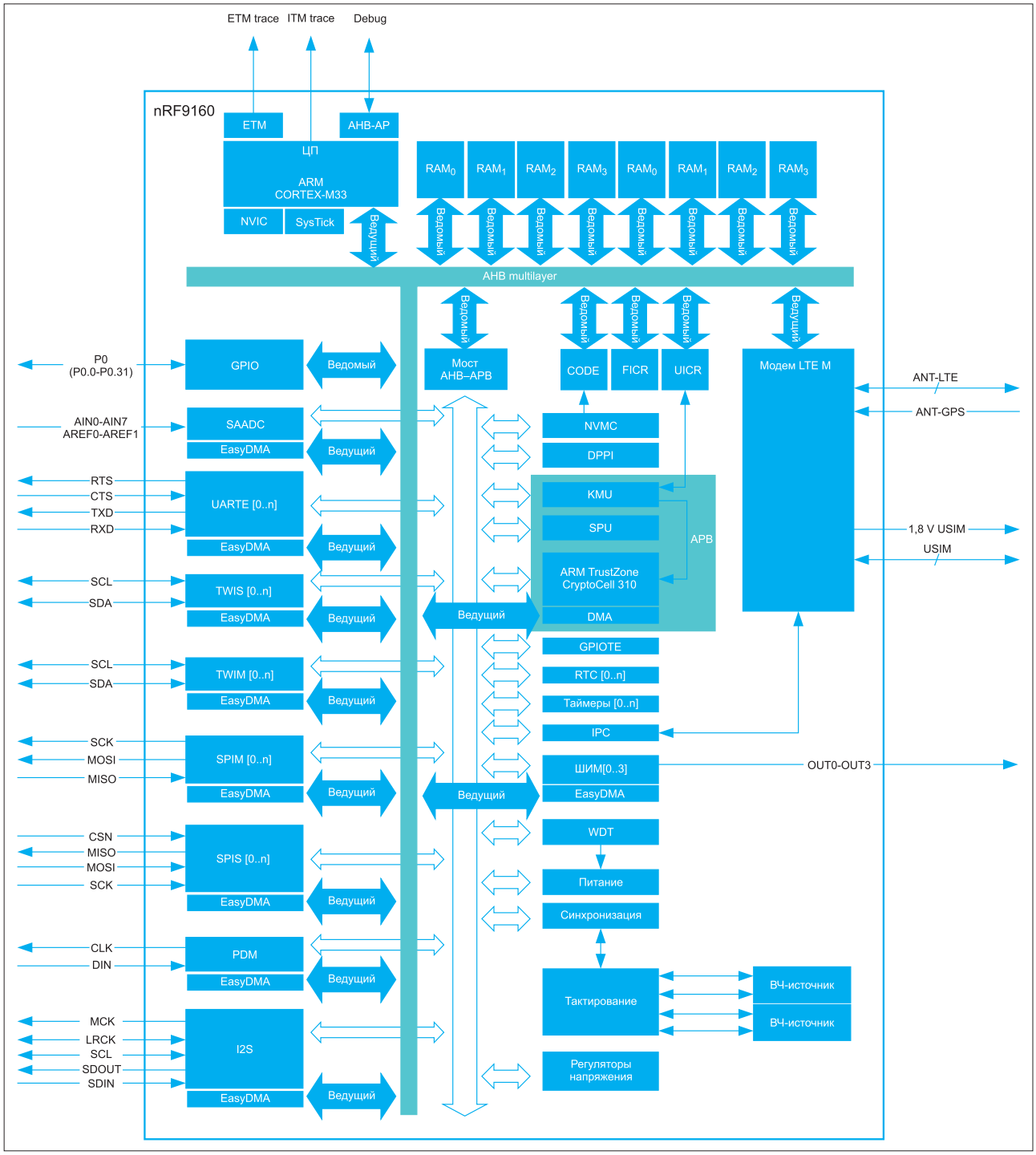

Рис. 5. **Структурная схема МК nRF9160 от Nordic Semiconductor**

ровать коммуникации между периферийными модулями без участия ЦП. В состав системы PRS входят 12 асинхронных каналов и четыре синхронных канала коммуникации. При этом асинхронные каналы могут подключаться к любому модулю, а синхронные каналы способны работать только с таймерами и АЦП.

В состав аналоговой периферии входят два аналоговых компаратора ACMP и 12-бит АЦП последовательного приближения. Оба модуля активны в режимах энергопотребления EM0–EM3. Компаратор может использоваться, например, для формирования сигналов прерывания. Производительность 12-бит АЦП достигает 1 Мвыб/с. В модуль АЦП встроен усилитель с программируемым коэффициентом усиления и буфер FIFO с четырьмя входами.

РЧ-модуль использует два вида модуляции: GFSK и OQPSK, а поддерживаемые им беспроводные протоколы перечислены в таблице 2. Приемник модуля настроен на низкую промежуточную частоту, значение которой находится в пределах 150–1371 кГц. Демодулятор приемника работает в полосе частот 100 Гц…2350 кГц. При плохих условиях приема радиосигнала применяется метод упреждающей коррекции ошибок и расширенный спектр с перестройкой частоты с использованием прямой последовательности (Direct Sequence Spread Spectrum). В зависимости от вида модуляции чувствительность приемника варьируется в пределах –94,4…104,9 дБм, а диапазон тока потребления составляет 8,8–9,4 мА. Эти значения указаны для скорости передачи принимаемых данных 125 Кбит/с…2 Мбит/с.

Передающий канал базируется на архитектуре с прямым преобразо-

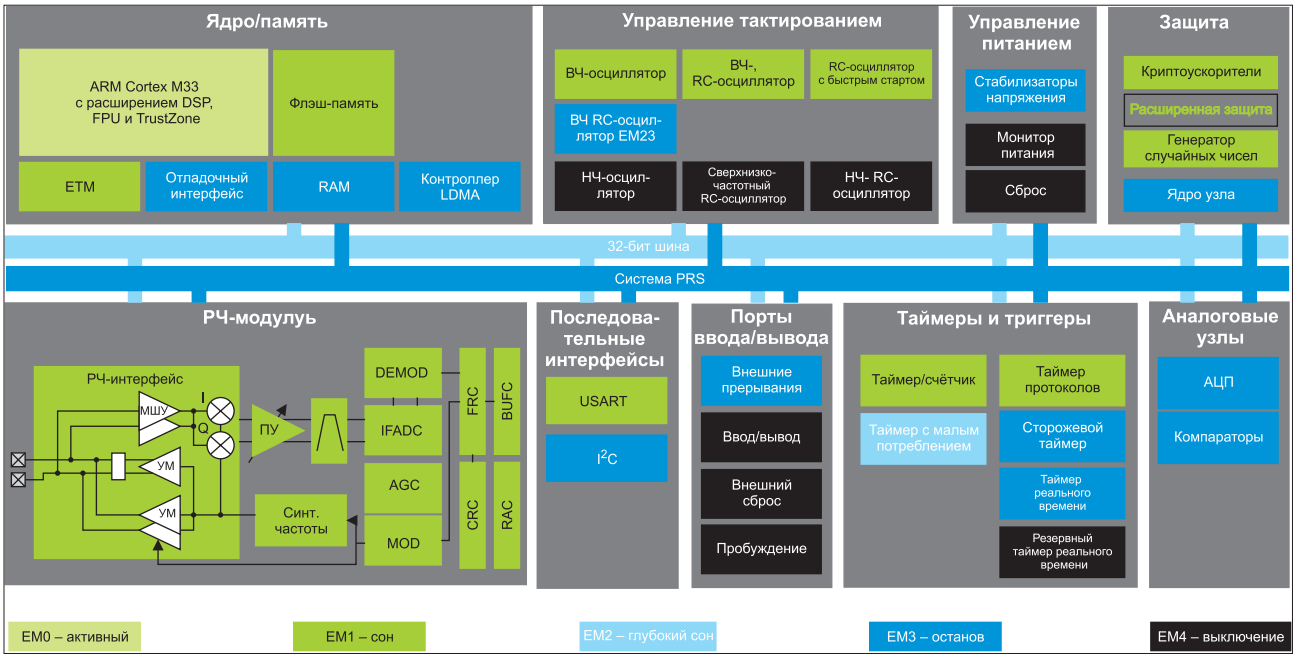

Рис. 6. **Структурная схема МК EFR32MG21 от SiLabs**

ванием. Формирующий спектр фильтр BT программируется пользователем и может быть запрограммирован, например, по закону приподнятого косинуса или по распределению Гаусса.

Буферизацией данных управляет контролер BUFC, который поддерживает до четырех буферов размером 64–4096 байт. Каждый из них используется и для передачи, и для приема данных. Все буферы размещены в ОЗУ. Радиоконтроллер RAC управляет состоянием верхнего уровня РЧ-модуля передачи, синхронизируя передачу кадров, а также включение/отключение узлов РЧ-модуля. Кроме того, этот радиоконтроллер обеспечивает калибровку приемника, передатчика и синтезатора частоты во время работы модуля.

Таблица 2. **Микроконтроллеры EFR32BG21 и EFR32MG21 от SiLabs**

Модификация	Стек протоколов	Выходная мощность передатчика (макс.), дБм	Объем флэш-памяти, Кбайт	Объем ОЗУ, Кбайт
EFR32MG21A010F1024IM32-B	Bluetooth 5, Zigbee Thread	10	1024	96
EFR32MG21A010F512IM32-B		10	512	64
EFR32MG21A010F768IM32-B		10	768	64
EFR32MG21A020F1024IM32-B		20	1024	96
EFR32MG21A020F512IM32-B		20	512	64
EFR32MG21A020F768IM32-B		20	768	64
EFR32BG21A010F1024IM32-B	Bluetooth 5	10	1024	96
EFR32BG21A010F512IM32-B		10	512	64
EFR32BG21A010F768IM32-B		10	768	64
EFR32BG21A020F1024IM32-B		20	1024	96
EFR32BG21A020F512IM32-B		20	512	64
EFR32BG21A020F768IM32-B		20	768	64