

Однокристалльное BLE-решение для IoT:

BLE взамен RS-232:

Зажигая «звезды»:

беспроводной стек для CC1310 от Texas Instruments



№12 (158), 2016 г.

Информационно-технический
журнал

Учредитель — ООО «КОМПЭЛ»

Издается с 2005 г.

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-43993

Редактор:

Геннадий Каневский
vesti@compel.ru

Выпускающий редактор:

Снежана Холодова

Редакционная коллегия:

Андрей Агеноров
Евгений Звонарев
Александр Маргелов
Николай Паничкин
Борис Рудяк

Дизайн, графика, верстка:

Елена Георгадзе
Евгений Торочков

**Е-mail-рассылка
и продвижение:**

Снежана Холодова
Екатерина Железнова
Александра Гирина

Электронная подписка:

www.compel.ru/mail

Распространяется бесплатно
в электронном виде

Подписано к публикации:
20 декабря 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

■ БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- **BlueNRG-1 – однокристальное решение для BLE-датчиков Интернета вещей (STMicroelectronics)**
Виктор Чистяков 3
- **BLE взамен RS-232: SPP-профиль на устройствах Bluetooth Low Energy (STMicroelectronics)**
Виктор Чистяков 9
- **Новый модуль Quectel: независимая работа GSM и приемника GNSS**
Алексей Чечекин, Алексей Ширяев 13
- **Зажигая «звезды»: беспроводной стек протоколов 802.15.4e/g для CC1310 (Texas Instruments)**
Александр Калачев 17
- **Одна антенна – хорошо, а две – лучше (Texas Instruments)**
Виктор Чистяков 24
- **Действуя на расстоянии: микроконтроллеры TI с беспроводными модулями**
Вячеслав Гавриков 31



СКОРО: ВЫПУСК ЖУРНАЛА, ПОСВЯЩЕННЫЙ НОВИНКАМ STMICROELECTRONICS

Если вы хотите предложить интересную тему для статьи в следующий номер журнала – пишите на адрес vesti@compel.ru с пометкой «Тема в номер» или в рубрику «Я – автор» раздела «Разработчикам» сайта www.compel.ru.

ОТ РЕДАКТОРА



Уважаемые читатели!

Давайте накануне нового 2017 года традиционно побеседуем о том, что было, что будет, и чем сердце успокоится.

2016 год прошел под знаком Интернета вещей — остроактуальной технологии, предполагающей самостоятельный обмен данными между гаджетами, исполнительными устройствами и блоками внутри локальной беспроводной сети. Практически все крупнейшие производители полупроводников предложили в этом году новые изделия с добавленными функциями приема и передачи данных по беспроводному каналу. Кажется, мир находится в начале новой фазы информационной и промышленной революции. О последнем свидетельствует и вошедший в обиход термин Industry 4.0 (первыми тремя революционными этапами развития промышленности при этом считаются механизация производства и первые станки; внедрение конвейера и автоматизация производства; внедрение вычислительной техники). Именно поэтому в 2016 году мы посвятили беспроводной теме два номера журнала целиком: третий и двенадцатый. В других номерах также были материалы на эту тему.

В начале 2016 года вышло на широкий рынок первое в электронной отрасли семейство контроллеров на новом ARM-ядре Cortex-M7 — **STM32F7** производ-

ства **STMicroelectronics**. Горизонт быстродействия и производительности микроконтроллеров общего назначения в очередной раз значительно раздвинулся. За STMicro, естественно, тут же устремились и другие производители — похоже, новое ядро становится стандартом в микроконтроллерном премиум-сегменте.

Также в начале 2016 года завершился процесс поглощения компании **International Rectifier** компанией **Infineon Technologies**. В результате на рынке силовых полупроводников — транзисторов, диодов, транзисторных и выпрямительных модулей и сборок — появился новый лидер. А к середине года компания **КОМПЭЛ**, для которой дистрибьюторское соглашение с International Rectifier явилось когда-то первым в череде заключенных ею подобных договоров, стала официальным дистрибьютором продукции Infineon. Мы посвятили этому событию специальный августовский номер.

Что будет? Похоже, электронная отрасль после кризиса начала 2010-х чувствует себя год от года увереннее. По крайней мере, прогноз объема мирового рынка полупроводников, принадлежащий рейтинговым агентствам WSTS, IHS Markit, Gartner и IC Insight и составлявший в начале календарного года, по оптимистическому сценарию, 345 миллиардов долларов США, к концу года поднялся до 358 миллиардов.

Что же касается нашего журнала — в наступающем году и нас, и вас, уважаемые читатели, ждут изменения. Мы продолжим выходить в электронном виде и размещать наши номера на сайте **www.compel.ru**. Но, кажется, формат тематических номеров и номеров, целиком посвященных продукции того или иного производителя, практически исчерпал себя. Первый номер журнала в наступающем году еще будет выглядеть привычно, но уже со второго номера перестанут быть тематическими, и центральное место в каждом из них займут статьи практической направленности, интересные инженерам-разработчикам. Вы сможете оценивать качество статей, и в зависимости от этого редакция сделает вывод, насколько эксперимент по обновлению «Новостей электроники» оказался удачным.

От лица редакции журнала поздравляю всех наших нынешних и будущих читателей с наступающим 2017 годом, желаю вам и вашим семьям сохранять здоровье, оптимизм и не бояться перемен!

С уважением,
Геннадий Каневский

Виктор Чистяков (г. Малоярославец)

BLUENRG-1 – ОДНОКРИСТАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ BLE-ДАТЧИКОВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ



Беспроводной сетевой процессор BlueNRG-1 производства компании STMicroelectronics расширяет возможности известного сетевого процессора BlueNRG за счет использования встроенного ядра Cortex M0. Это позволяет загружать пользовательские приложения и применять полученное решение в составе Интернета вещей.

Стандарт Bluetooth зарекомендовал себя как удобная и надежная технология не только в сфере общения и развлечений, но и в системах сбора и передачи данных. Одним из перспективных направлений развития для беспроводного интерфейса Bluetooth сегодня является концепция Интернета вещей, которая объединяет в глобальную сеть датчики, бывшие ранее индивидуальными или работавшие лишь в составе локальной сети. Интеллектуальными способностями с выходом в Интернет сегодня наделяются и многие привычные домашние вещи.

Особенностью работы многих подключенных к сети устройств подобного типа является длительный период эксплуатации в спящем режиме с периодической кратковременной активностью. Учитывая удаленное расположение, затрудняющее замену элементов питания в этих компактных устройствах, одним из основных требований к ним является экономное расходование запасов электроэнергии.

В отношении энергозатрат традиционная технология Bluetooth уступала ряду других беспроводных интерфейсов, созданных позднее и во многом изначально ориентированных на пониженный расход электроэнергии. Однако, отвечая на запросы времени, ассоциация Bluetooth разработала новый вариант технологии — BLE (Bluetooth Low Energy).

Стандарт BLE и решения STMicroelectronics – BlueNRG и BlueNRG-MS

В модельном ряду компании STMicroelectronics уже не первый год представлены популярные, пользующиеся спросом микросхемы из семейства BlueNRG с поддержкой технологии BLE (рисунки 1).

С 2014 года выпускается беспроводной сетевой процессор BlueNRG с поддержкой стандарта BLE 4.0. В 2015 году был налажен выпуск процессоров BlueNRG-MS на основе BLE 4.1. В этом году появились новые чипы BlueNRG-1, обеспечивающие возможность загрузки пользовательского приложения.

BlueNRG-1 – развитие технологии BLE в изделиях STMicroelectronics

В действительности BlueNRG-1 расширяет возможности известного сетевого процессора BlueNRG за счет использования встроенного ядра Cortex M0 для решения ряда задач на уровне приложения (рисунок 2).

Областями применения BlueNRG-1 могут быть:

- промышленная и домашняя автоматизация;
- датчики контроля и охраны;

- системы освещения;
- автомобильные устройства;
- «умные» часы;
- приборы для занятий спортом и физическими упражнениями;
- бытовые медицинские приборы;
- приборы дистанционного управления;
- устройства для ухода за пожилыми людьми;
- периферийные устройства мобильной связи;
- компьютерная периферия.

BlueNRG-1, как и другие устройства класса Bluetooth Low Energy, отличается незначительным потреблением энергии от источника питания, при этом на одном кристалле размещены все узлы, необходимые для создания полноценной законченной системы с поддержкой спецификации BLE 4.2.

BlueNRG-1 включает 160 кбайт памяти Flash для программ, 24 кбайт памяти типа RAM (два банка по 12 кбайт) и стандартные интерфейсы SPI, UART и I²C для взаимодействия с внешними

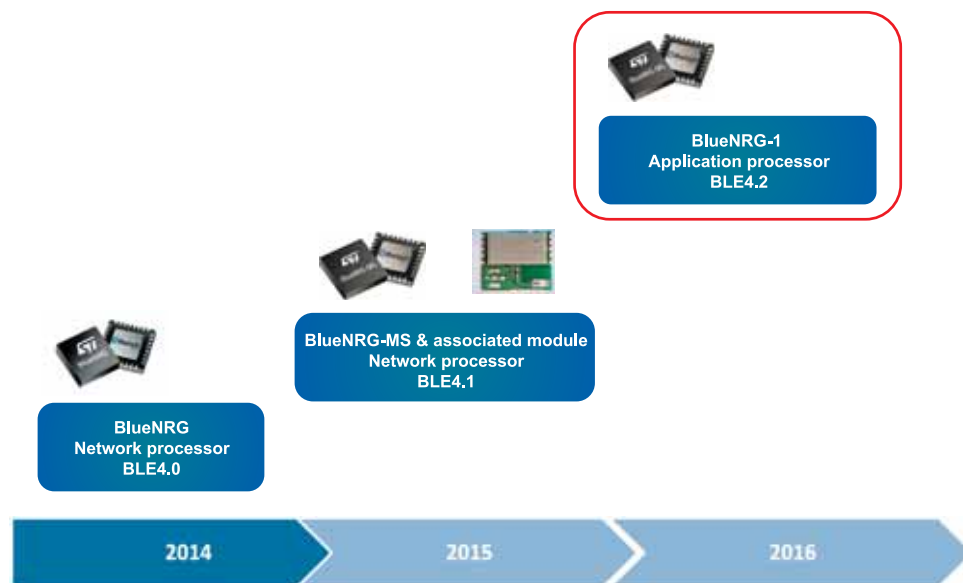
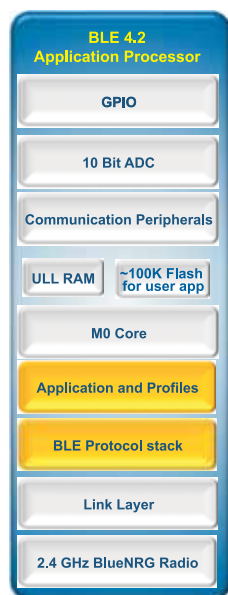


Рис. 1. Развитие семейства STMicroelectronics BlueNRG



BlueNRG-1 BLE 4.2 Application Processor



Flexible low - mid end BLE SOC



Beacon and Tags



Automotive grade



Рис. 2. Возможности BlueNRG-1

устройствами. В составе этой микросхемы имеются сторожевой и два многофункциональных таймера, а также часы реального времени (RTC) и контроллер DMA.

Встроенный АЦП пригодится для взаимодействия с аналоговыми датчиками и для чтения показаний встроенного

измерителя уровня напряжения батареи питания. Цифровой фильтр может быть использован для обработки потоков сигналов с модуляцией PDM.

BlueNRG-1 демонстрирует превосходные радиочастотные характеристики, при этом встроенный высокоэффективный DC/DC обеспечивает сверхнизкое

потребление энергии батареи. Незначительный расход энергии позволяет использовать микросхемы BlueNRG даже в устройствах с питанием от компактных литиевых батарей типа CR2032.

Внутренние цепи питания BlueNRG-1 включают линейный стабилизатор с низким падением напряжения (LDO), а также еще более эффективный понижающий конвертор DC/DC. Диапазон напряжений батареи питания - в пределах 1,7...3,6 В.

Основные характеристики BlueNRG-1:

- совместимая со спецификацией Bluetooth Low Energy однокристальная система с поддержкой режимов «ведущий/ведомый» и нескольких рабочих профилей;
- напряжение питания: 1,7...3,6 В;
- интегрированный линейный регулятор напряжения питания и понижающий конвертор DC/DC;
- высокопроизводительное энергоэкономичное ядро Cortex-M0 на базе 32-битной архитектуры;
- 160 кбайт программируемой памяти Flash;
- 24 кбайт RAM (два банка по 12 кбайт);
- интерфейсы: UART, SPI, I²C (2 шт.);
- 14 или 15 портов общего назначения;
- два многофункциональных таймера;
- 10-разрядный АЦП;
- сторожевой таймер и RTC;
- контроллер DMA;
- потоковый процессор PDM;
- кварцевый генератор на 16 или 32 МГц;
- встроенный генератор на 32 кГц;
- кольцевой генератор на 32 кГц;
- встроенный датчик температуры и контроль напряжения батареи питания;
- выходная мощность до +8 дБм (на разъеме антенны);
- энергетический баланс радиоканала до 96 дБ;
- калиброванный RSSI для контроля уровня принимаемого сигнала;
- потребление тока в режиме TX до 8,2 мА (0 дБм, 3 В);
- пониженный до 1 мкА ток питания с активным стеком BLE (спящий режим);
- соответствие радиочастотным нормам ETSI EN 300 328, EN 300 440, FCC CFR47 часть 15, ARIB STD-T66;
- предварительное программирование с помощью загрузчика через UART;
- корпус QFN32 и WCSP34;
- специальное исполнение в корпусе QFN для использования в автомобилях;
- рабочая температура -40...105°C.

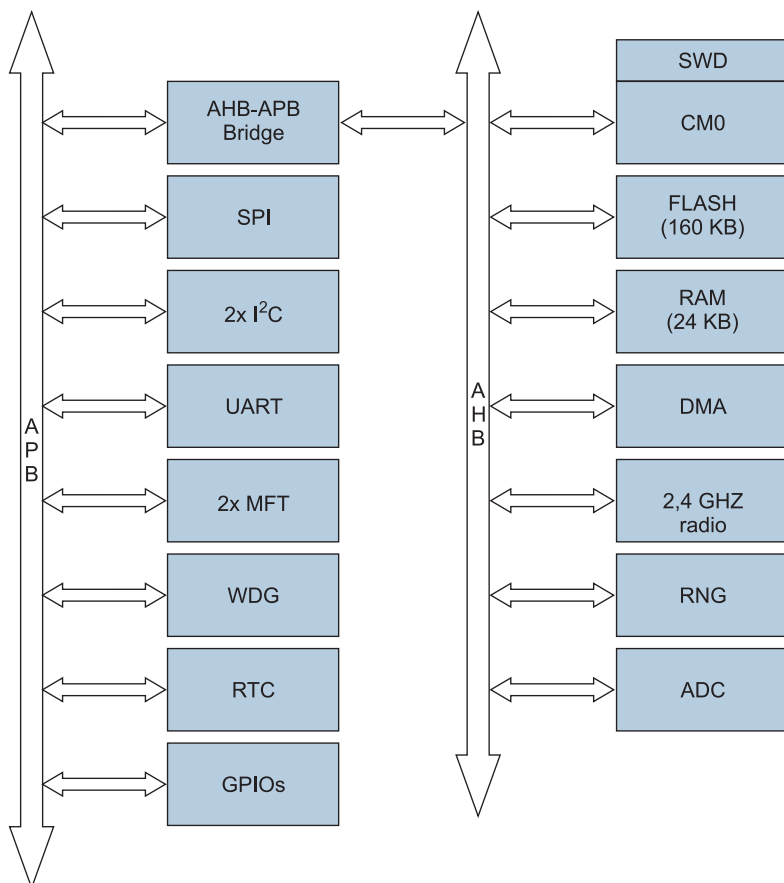


Рис. 3. Внутренняя архитектура BlueNRG-1

Таблица 1. Назначение выводов BlueNRG-1

Выводы		Обозначение	Функция	Описание
QFN32	WCSP34			
1	F1	DIO10	I/O	Цифровой ввод/вывод общего назначения (GPIO)
2	E1	DOI9	I/O	GPIO
3	D3	DIO8	I/O	GPIO
4	D2	DIO7/зарп.	I/O	Вход загрузчика/GPIO
5	D1	DOI06	I/O	GPIO
6	A3	VBAT3	I/O	Подключение батареи питания
7	C2	DIO5	I/O	GPIO
8	C3	DIO4	I/O	GPIO
9	B1	DIO3	I/O	GPIO
10	A1	DIO2	I/O	GPIO
11	B2	DIO1	I/O	GPIO
12	A2	DIO0	I/O	GPIO
13	A5	ANATEST0/DIO14	O	Аналоговый выход/GPIO
14	D4	ANATEST1	O	Аналоговый выход
15	B4	ADC1	I	АЦП, вход 1
16	D5	ADC2	I	АЦП, вход 2
17	A6	FXTAL1	I	Вывод для кварцевого резонатора 16/32 МГц
18	B5	FXTAL0	I	Вывод для кварцевого резонатора 16/32 МГц
19	—	VBAT2	VDD	Подключение батареи питания
20	C6	RF1	I/O	Подключение согласующей цепи антенны
21	D6	RF0	I/O	Подключение согласующей цепи антенны
22	E4	SXTAL1	I	Вывод для кварцевого резонатора 32 кГц
23	E5	SXTAL0	I	Вывод для кварцевого резонатора 32 кГц
24	E6	VBAT1	VDD	Подключение батареи питания
25	B3	RESETN	I	Системный сброс
26	F6	SMPSFILT1	I	Выход SMPS к внешнему фильтру
27	F4	SMPSFILT2	I/O	Выход SMPS к внешнему фильтру/контроль батареи питания
28	F3	VDD1V2	O	Вывод 1,2 В для цифрового ядра
29	—	DIO13	I/O	GPIO
30	F2	DIO12	I/O	GPIO
31	E3	TEST	I	Тестовый вывод подключается к GND
32	E2	DIO11	I/O	GPIO
—	A4	GND	GND	Общий вывод
—	B6	GND	GND	Общий вывод
—	C1	GND	GND	Общий вывод
—	F5	GND	GND	Общий вывод

Микросхемы BlueNRG-1 расширяют возможности сетевых процессоров предыдущего поколения BlueNRG, позволяют использовать встроенное ядро Cortex M0 как для управления блоком радиосвязи, так и для исполнения кода пользовательского приложения. Внутренняя структура BlueNRG-1 представлена на рисунке 3. К внутренней шине АНВ подключены: ядро СМО, программируемая Flash-память (160 кбайт), 24 кбайт быстрой статической памяти RAM, контроллер DMA, радиомодуль

на 2,4 ГГц, RNG (генератор случайных чисел) и АЦП.

Шина АНВ имеет через мост связь с шиной APB, к которой подключены цифровые выводы общего назначения для входа и выхода (GPIO), часы реального времени (RTC), сторожевой таймер (WDT) и два многофункциональных таймера (MFT), а также последовательные интерфейсы SPI, UART и I²C для соединения с внешней периферией.

Микросхемы BlueNRG-1 включают стек библиотек программного обеспе-

чения на языке C, которые обеспечивают:

- поддержку режимов «ведущий» и «ведомый»;
- профиль GAP: режим центрального, периферийного, наблюдающего или вещательного узла;
- профиль ATT/GATT: клиент и сервер;
- SM: приватность, аутентификация и авторизация;
- L2CAP (управление логическими связями и протокол адаптации);

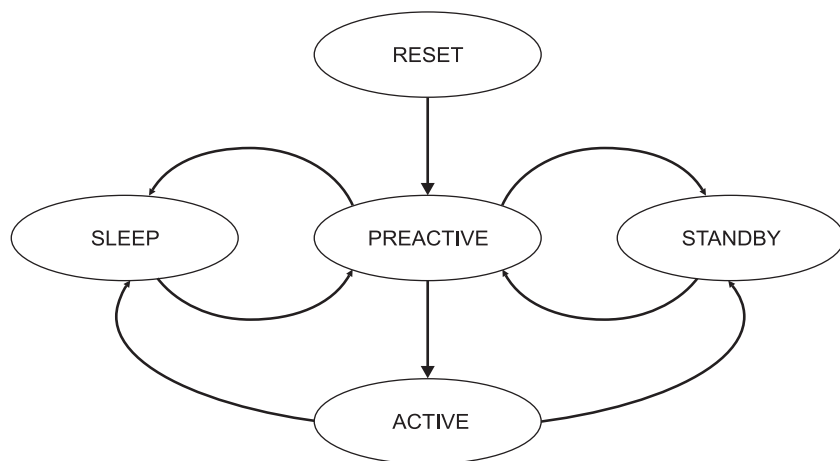


Рис. 4. Режимы работы STMicorelectronics BlueNRG-1

• слой Link Layer: шифрование и дешифрование AES128.

Упрощенная версия графа переходов между рабочими режимами BlueNRG-1 показана на рисунке 4. В состоянии Preactive микросхема оказывается после первоначальной подачи напряжения питания и сброса. В этом состоянии задействованы все цифровые цепи. Тактовые импульсы высокой частоты (16 МГц) генерируются с помощью встроенного RC-генератора. Другой встроенный RC-генератор обеспечивает синхри́мпульсы с частотой 32,768 кГц. При переходе

в активное состояние используется более точный кварцевый источник тактовой частоты 16 или 32 МГц.

В дежурном режиме (*Stanby*) питание необходимо лишь для памяти RAM. Переход в активное состояние возможен по прерыванию от выводов 9, 10, 11, 12 и 13, которые должны быть заранее запрограммированы соответствующим образом.

Встроенный контроллер DMA позволяет передавать различные комбинации данных между памятью и периферией без участия вычислительного ядра

микросхемы. В таблице 1 представлено назначение всех выводов микросхем BlueNRG-1 для исполнений в корпусах QFN32 и WCSP34, которые имеют цифровое или буквенно-цифровое обозначение.

На рисунке 5 представлен пример схемы беспроводного устройства на базе процессора BlueNRG-1, которое кроме микросхемы процессора включает лишь несколько конденсаторов и катушек индуктивности в цепях питания и фильтре согласования с антенной, а также два кварцевых резонатора XTAL1 и XTAL2.

Особенностью BlueNRG-1 является чрезвычайно простое подключение внешних датчиков различного типа, а наличие готовых программно-аппаратных решений и примеров еще более ускоряет процесс разработки.

BlueNRG-1 может быть сконфигурирован для поддержки приложения на базе однокристальной системы (рисунок 6) или как отдельный сетевой процессор в приложении, где пользовательский код выполняется на другом процессоре (рисунок 7).

В первой конфигурации BlueNRG-1 действует как единое устройство для управления стеком Bluetooth Low Energy и кодом приложения. При этом стек BLE представлен в виде файла еди-

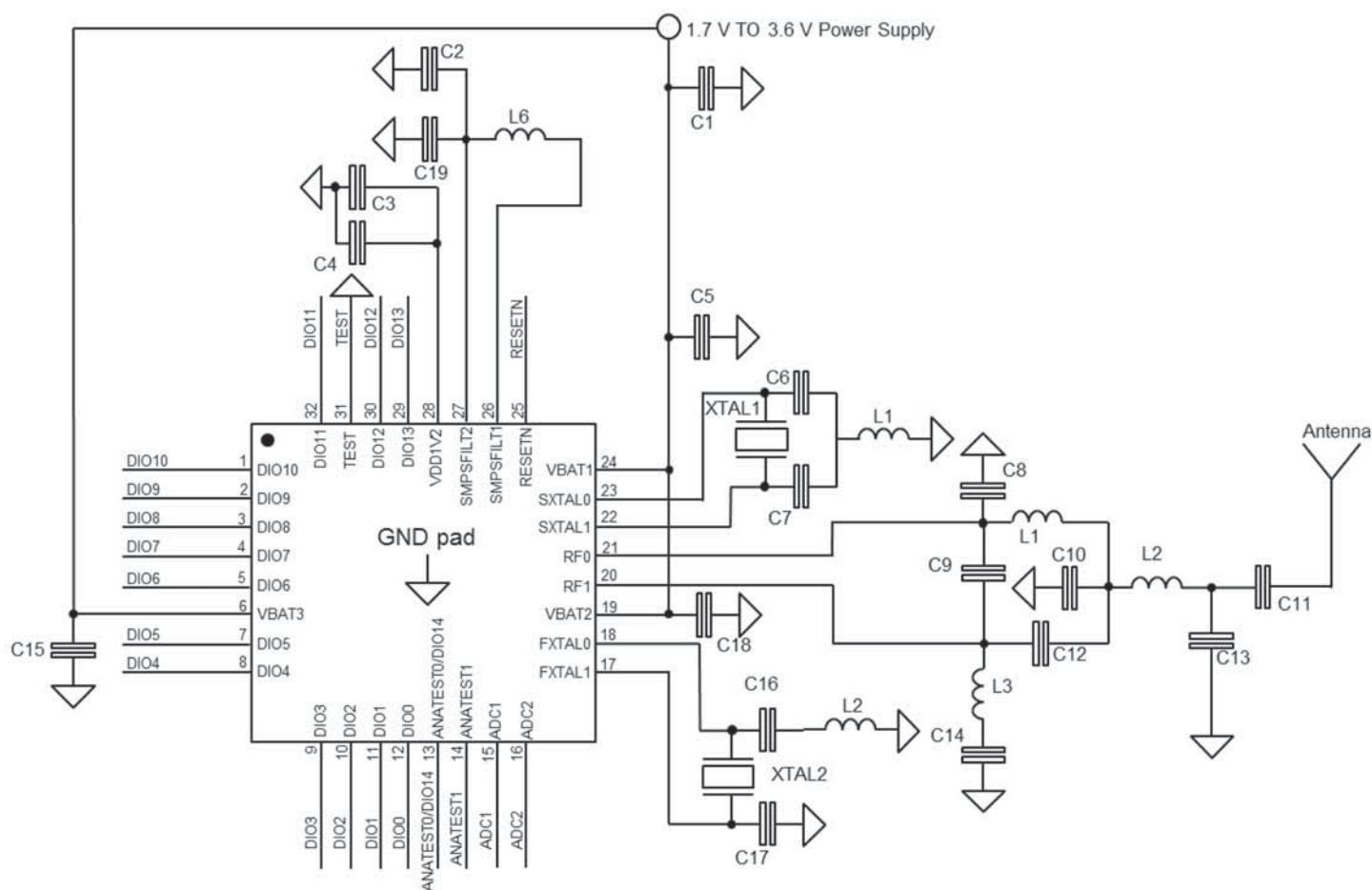


Рис. 5. Схема на основе BlueNRG-1 с активным конвертором DC-DC в корпусе QFN32

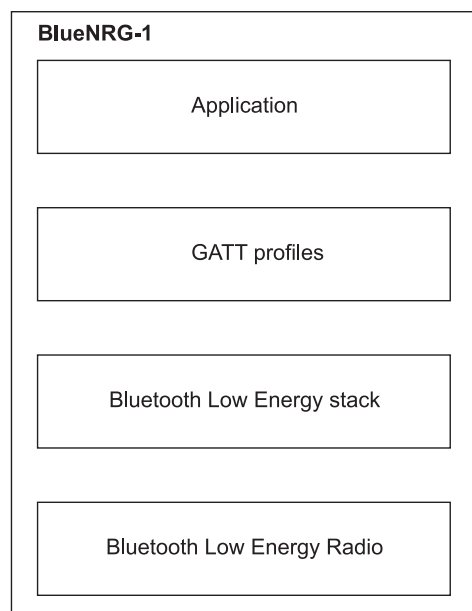


Рис. 6. Слои ПО для однокристальной системы на базе BlueNRG-1

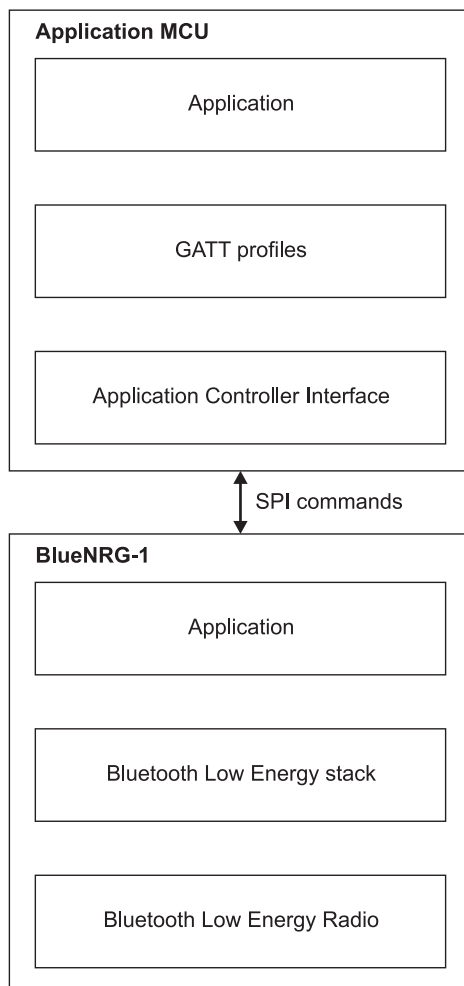


Рис. 7. Слои ПО для сетевого процессора на базе BlueNRG-1



Рис. 8. Плата STEVAL-IDB007V1

ной библиотеки, в то время как профили GATT представлены в виде объектного кода в других библиотеках.

Для сконфигурированного и используемого в качестве сетевого сопроцессора BlueNRG-1 предусмотрено специальное программное обеспечение для поддержки интерфейса с процессором внешнего приложения. В данном случае весь стек BLE работает с BlueNRG-1, а профили GATT предусмотрены для вы-

полнения уже в другом процессоре совместно с кодом приложения.

Средства разработки BlueNRG-1 Оценочная плата STEVAL-IDB007V1

Упростить процесс освоения BlueNRG-1 и сократить время разработки новых устройств позволяет специальная платформа **STEVAL-IDB007V1** (рисунок 8), которая предоставляет на-

бор аппаратных ресурсов для реализации широкого спектра сценариев применения датчиков цифровых данных (акселерометр, датчики давления и температуры) и пульты дистанционного управления (кнопки и светодиоды). Также она обеспечивает контроль отладки через виртуальный COM-порт в интерфейсе USB.

Особенности STEVAL-IDB007V1:

- плата на основе однокристальной системы BlueNRG-1 BLE;
- в комплекте имеется программный пакет разработки на основе BlueNRG-1, включая встроенное программное обеспечение и документацию;
- выходная мощность радиопередатчика на разъеме антенны: до +8 дБм;
- превосходная чувствительность приемника: -88 дБм;
- очень малое потребление тока: 7,7 мА в режиме приема и 8,2 мА в режиме передачи с уровнем +0 дБм;
- совместимость с BLE 4.1, поддержка режимов «ведущий», «ведомый» и одновременно «ведущий/ведомый»;
- интегрированные цепи согласования с антенной;
- разъем SMA для подключения антенны или измерительного оборудования;
- три светодиода для индикации;
- две кнопки управления;
- цифровой акселерометр и цифровой гироскоп в формате 3D;
- датчик давления типа MEMS с встроенным измерителем температуры;
- держатель батарей;
- отладочный разъем JTAG;
- мост между USB и последовательными каналами ввода/вывода через BlueNRG-1;
- соответствие требованиям RoHS.

Предусмотрены три варианта питания платы STEVAL-IDB007V1 (только USB, батарея, внешний блок питания и USB) для разработки прикладного программного обеспечения и обеспечения расширенных возможностей тестирования.

Пакет ПО STSW-BLUENRG1-DK

Пакет специального ПО для разработки STSW-BLUENRG1-DK поддерживает платформу BlueNRG-1 (рисунок 9). Он обеспечивает библиотеку двоичных кодов для Bluetooth Low Energy с полным набором API и соответствующие функции обратного вызова для событий, позволяющие взаимодействовать с обеспечиваемыми устройством BlueNRG-1 компонентами BLE. Кроме того, пакет ПО обеспечивает набор демонстрационных приложений, позволяя показать некоторые типичные рабочие сценарии BLE. Каждое демонстрационное приложение имеет полный набор заголовочных файлов и исходного кода.



Рис. 9. Пакет ПО STSW-BLUENRG1-DK для разработки на основе BlueNRG-1

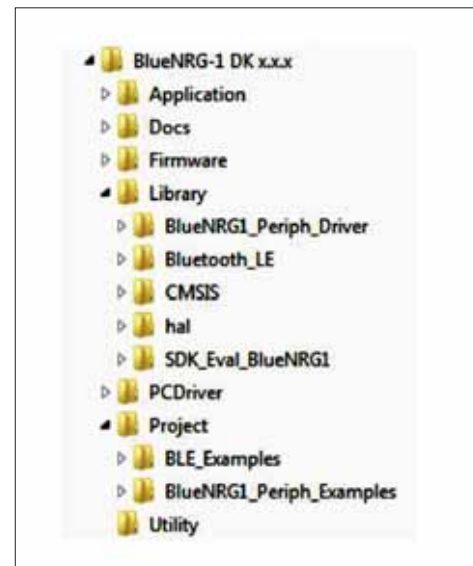


Рис. 10. Структура пакета BlueNRG-1 DK



Рис. 11. Графический интерфейс, позволяющий контролировать BlueNRG-1

Программный пакет разработки STSW-BLUENRG1-DK содержит полный набор периферийных драйверов (заголовочные и исходные файлы), позволяющих взаимодействовать с периферийными устройствами (АЦП, GPIO, I²C, RTC, SPI, таймеры, UART, WDG, RTC). Имеется и полный набор соответствующих демонстрационных приложений (заголовочные и исходные файлы). Состав и структура пакета BlueNRG-1 DK представлены на рисунке 10.

Специальная программа «Навигатор BlueNRG-1» обеспечивает интерактивный простой и наглядный интерфейс доступа к ресурсам для разработки на основе BlueNRG-1 (рисунок 11). Основной функцией навигатора является вы-

бор и запуск демонстрационного приложения в удобной для пользователя форме. Навигатор также обеспечивает прямой доступ к документации демонстрационных приложений и описанию аппаратных ресурсов платформы разработки BlueNRG-1.

Включенная в данный пакет ПО утилита BlueNRG-1 Flasher запускается на компьютере и позволяет программировать устройства на базе BlueNRG-1, используя для этого загрузчик UART.

Особенности комплекта ПО для разработки STSW-BLUENRG1-DK:

- пакет ПО Bluetooth SMART с поддержкой однокристальных систем BlueNRG-1 BLE;

- запускаемый на компьютере навигатор BlueNRG-1;
- запускаемая на компьютере утилита BlueNRG-1 Flasher;
- библиотека стека двоичных протоколов и API для Bluetooth Low Energy, интерфейс обратного вызова событий;
- демонстрационные приложения BlueNRG-1 BLE;
- файлы CMSIS для BlueNRG-1;
- драйверы для периферии BlueNRG-1 и соответствующие примеры;
- комплект ПО для разработки и драйверы HAL для BlueNRG-1;
- поддержка платформ для разработок на базе BlueNRG-1.

Заключение

Усовершенствованный вариант беспроводного сетевого процессора STMicroelectronics BlueNRG-1 обладает всеми достоинствами прежних моделей семейства сетевых процессоров и включает возможность исполнения программного кода пользователя.

Совместно с процессорами BlueNRG-1 компания STMicroelectronics предоставляет разработчикам все необходимое для ускоренного освоения новых микросхем и создания на их базе целого ряда компактных и экономичных беспроводных BLE-устройств.

Обладая пониженным энергопотреблением и повышенными радиочастотными характеристиками интегрированного приемопередатчика, микросхемы BlueNRG-1 оптимально подходят для использования в составе устройств Интернета вещей.

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка –
e-mail: wireless.vesti@compel.ru

Виктор Чистяков (г. Малоярославец)

BLE ВЗАМЕН RS-232: SPP-ПРОФИЛЬ НА УСТРОЙСТВАХ BLUETOOTH LOW ENERGY



В классической беспроводной технологии Bluetooth профиль последовательного порта (SPP) обеспечивает возможность замены проводного интерфейса RS-232 беспроводным соединением между двумя устройствами. В устройствах, работающих на новом Bluetooth-стандарте BLE, структура стека для соединения через последовательный порт — иная. Как же организовать на них замену проводного интерфейса беспроводным соединением?



Стек ПО Bluetooth Smart (BLE) для последовательного порта

Спецификация Bluetooth определяет структурные элементы, на базе которых разработчик создает совместимые друг с другом устройства. Архитектура программного обеспечения для устройств BLE имеет послонно упорядоченную структуру, обычно называемую стеком. Наборы протоколов и профили позволяют отдельным устройствам соединяться друг с другом и обмениваться данными определенного типа.

В новых версиях Bluetooth, начиная с 4.0, вводятся два типа устройств: однорежимные и двурежимные. Однорежимные устройства работают лишь с поддержкой спецификации BLE, тогда как двурежимные способны также работать и в режиме классического Bluetooth BR/EDR (с базовой/повышенной скоростью).

На рисунке 3 изображены варианты реализации коммуникационного стека Bluetooth. Имеющийся в обычном Bluetooth профиль последовательного порта (SPP) обеспечивает возможность замены проводного интерфейса RS-232 беспроводным соединением между двумя устройствами.

Профиль SPP включает протоколы RFCOMM, L2CAP, Link Manager и ба-

Изначально созданная для высокоскоростной передачи данных в сетях малого радиуса действия беспроводная технология Bluetooth с течением времени развивалась и совершенствовалась. Последнее существенное изменение произошло с появлением версии 4.0, известной также как Bluetooth Low Energy (BLE). Новейшая принятая спецификация имеет версию 4.2. Для BLE используется также и другое название — Bluetooth Smart.

В Bluetooth при создании соединения между двумя устройствами одно из них, инициирующее соединение, выступает в роли ведущего (Master), а другое будет находиться в роли ведомого (Slave). При этом оба устройства могут действовать как индивидуально (топология Point to Point), так и находясь в составе сети со структурой типа «звезда» (топология Star) (рисунк 1). В этом случае один узел функционирует как центральный и действует в роли ведущего, в то время как все остальные узлы функционируют в роли ведомых.

В классическом варианте Bluetooth соединение между двумя точками поддерживается, даже если нет подлежащих передаче данных, что приводит к повышенному расходу энергии от автономного источника питания. Лишь при переходе в спящий режим удается несколько сократить потребляемый от батареи ток. В результате на основе классического Bluetooth практически невозможно реализовать компактные устройства длительного пользования с батарейным питанием. Значительно более экономичный в отношении потребляемого тока стандарт Bluetooth Low Energy позволяет создавать конечные устройства с питанием от батареек пуговичного типа, которые способны ра-

ботать в течение нескольких месяцев и даже лет.

BLE можно рассматривать как расширение базовой технологии Bluetooth Classic, ориентированное в основном на передачу небольших объемов данных, которое оптимально подходит для Интернета вещей. Сравнение основных характеристик BLE и обычного Bluetooth приведено в таблице 1.

BLE, как и обычный Bluetooth, работает в нелицензируемом частотном диапазоне 2,4 ГГц, используя 40 каналов вместо 79 в классическом варианте и довольствуясь сокращенным по длительности до 3 мс сеансом связи. При этом максимальный размер передаваемого пакета составляет 27 байт.

BLE использует меньше каналов, но с расширенной полосой пропускания. Как показано на рисунке 2, ширина каждого из 40 каналов Bluetooth Smart составляет 2 МГц. Для передачи служебных сигналов (Advertising) выделены три канала, разнесенные в пределах частотного спектра, чтобы минимизировать влияние помех. В течение сеанса связи используется скачкообразный алгоритм выбора частоты канала.

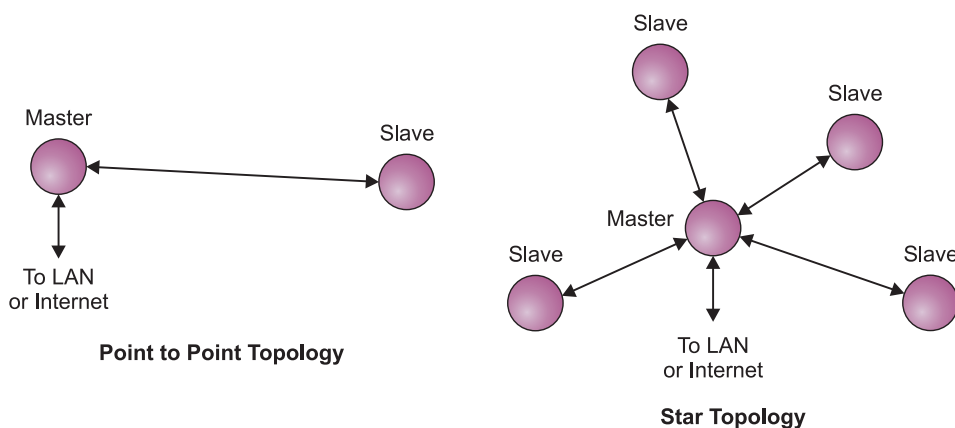


Рис. 1. Две топологии соединений в Bluetooth

Таблица 1. Сравнение Bluetooth с Bluetooth Low Energy

Параметр	Классический Bluetooth	Bluetooth Low Energy
Потребляемый ток, мА	1...30	0,001...15
Скорость передачи, Мбит/с	1...3	1
Радиус действия, м	1...100	50
Макс. мощность передатчика, дБм	+20 (класс 1)	+10
	+4 (класс 2)	
Число каналов	79	40
Длительность сеанса связи, мс	100	3
Макс. размер пакета	2875 мкс = 1021 байт	328 мкс = 27 байт
Шифрование	Safe+	AES-128

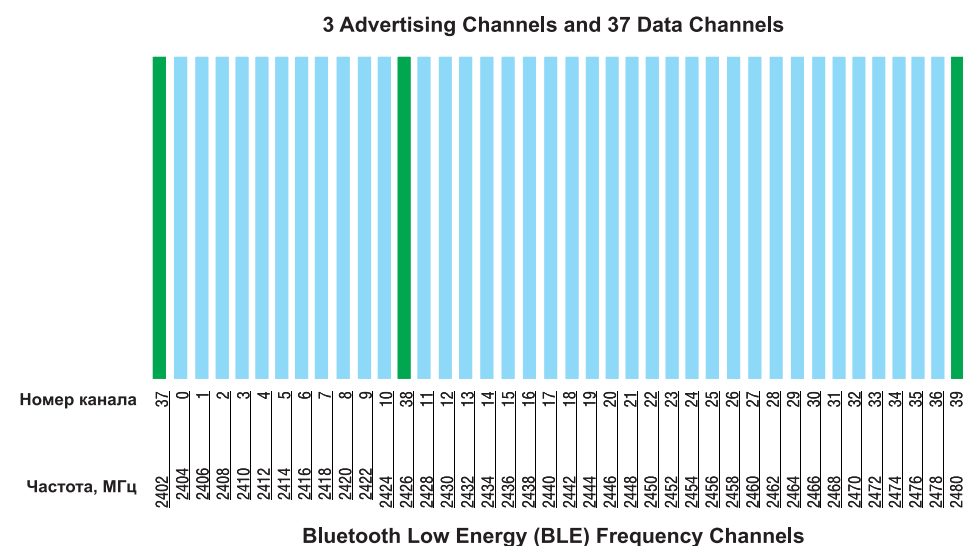


Рис. 2. Частотные каналы Bluetooth Smart (BLE)

зовый протокол радиосвязи. RFCOMM (Radio Frequency Communications), создает виртуальный последовательный поток данных и эмулирует управляющие сигналы RS-232.

Далее в дело вступает пакетный протокол L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol). Он передает пакеты

данных между хостом и подсистемой контроллера Bluetooth через интерфейс HCI (Host to Controller Interface) или напрямую в Link Layer, например, как в BlueNRG (рисунок 4).

В устройствах BLE используется несколько измененная структура стека для соединения через последовательный

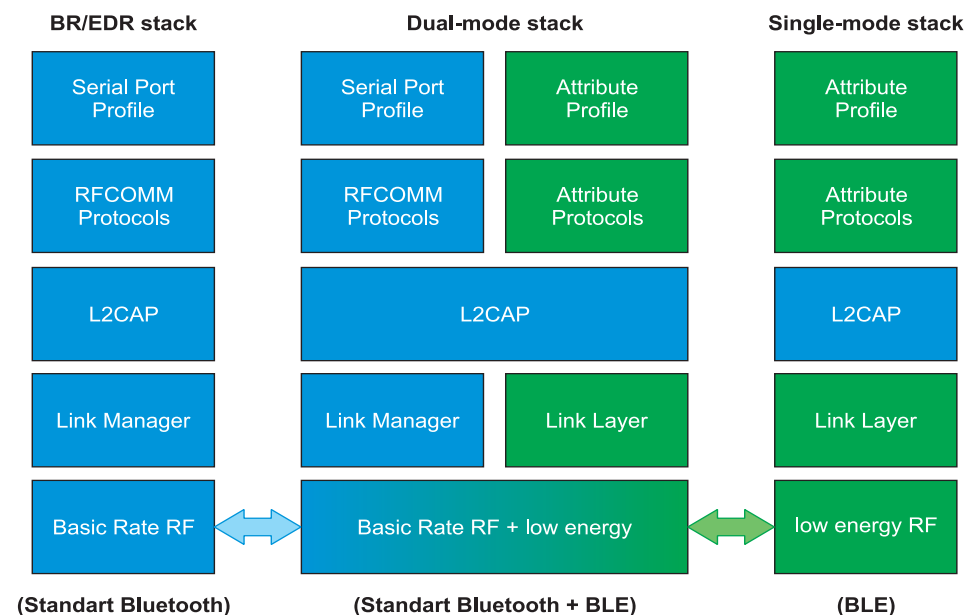


Рис. 3. Структура коммуникационного стека Bluetooth

порт. Вместо SPP имеется профиль атрибутов, а вместо протоколов RFCOMM — протокол атрибутов, оптимизированный для используемых в BLE пакетов данных небольшого размера. Протокол L2CAP остается неизменным, Link Manager заменен на Link Layer, который определяет для пакетов структуру/каналы, процедуры подключения и отправляемые/получаемые данные.

Последовательный канал связи для устройств BLE

Надо сразу отметить, что отдельные операции в процессе соединения выполняются на уровне микропрограммного обеспечения и не требуют пристального внимания со стороны разработчика конечного устройства. Ему остается лишь выбрать заложенные производителем чипов микрокоманды на уровне конфигурации стека и профилей программного обеспечения.

В комплекте с оценочными платами производства компании **STMicroelectronics** имеется пакет ПО для разработки новых устройств, включающий в себя встроенное программное обеспечение, примеры реализации различных сценариев и документацию.

Рассмотрим пример создания канала связи между двумя компьютерами с использованием микросхем **BlueNRG-MS** или **BlueNRG-1**, которые являются однокристными чипами с поддержкой требований BLE из спецификации Bluetooth v4.0. BlueNRG взаимодействуют с микроконтроллером внешнего хоста, используя линии SPI и набор API, состоящий из команд стандартного Application Command Interface (ACI) и определенных производителем команд Host Controller Interface (HCI) (рисунок 4).

Для решения поставленной задачи можно использовать, например, модуль **SPBTLE-RF** с сетевым процессором BlueNRG-MS (рисунок 5) или другие устройства на основе приемопередатчиков BlueNRG-1. В случае использования BlueNRG-1 расширенные возможности аппаратной платформы позволяют ему в отдельных случаях выполнять также функции приложения и полностью реализовать стек протоколов в одном чипе.

Образец программной реализации, которая демонстрирует простое двухполосное соединение между двумя устройствами BlueNRG-MS, доступен в комплекте для разработки ПО (SDK) BlueNRG-MS. Проект называется “BLE Chat”, он размещен в папке “Projects\Projects_STD_Library\BLE_Chat\EWARM_BlueNRG-MS” внутри ПО для оценочного комплекта **STEVAl-IDB005V1** или **STEVAl-IDB006V1** (рисунок 6).

Те, кто работает с оценочными платами **NucleoL152RE** и **X-NUCLEO-**

IDB05A1, могут найти этот проект в папке “Projects\Projects_Cube\BLE_Chat\EWARM_BlueNRG-MS”.

Примечание: если работать с BlueNRG-1 в составе оценочной платы STEVAL-IDB007V1, проект можно найти в SDK BlueNRG-1, в папке “\BLE_Examples\BLE_Chat”. Имеется поддержка IAR Embedded Workbench, Keil Microcontroller Development Kit и Atollic TrueSTUDIO.

При работе с этим проектом доступны четыре конфигурации:

- “Client” — роль клиента;
- “Server” — роль сервера;
- “Client throughput” — тестирование пропускной способности для режима клиент;
- “Server throughput” — тестирование пропускной способности для режима сервер.

В процессе реализации чата BLE выполняются следующие действия:

- клиент подключается к сервису “Chat” в режиме «ведущий»;
- сервер предоставляет определенный производителем сервис BLE под названием “Chat” и действует как ведомый. С сервисом Chat ассоциирован 128-битный универсальный уникальный идентификатор (UUID), значение которого равно 0xD973F2E0-B19E-11E2-9E96 — 0800200C9A66.

Сервис Chat содержит две определенные производителем характеристики:

- характеристика TX: клиент может включить уведомления по этой характеристике. Когда сервер имеет данные для отправки, он будет посылать уведомления, которые содержат значение характеристики TX. Значение ассоциированного с характеристикой TX 128-битного UUID — 0xD973F2E1-B19E-11E2-9E96-0800200C9A66;
- характеристика RX — это записываемая характеристика. Когда клиент имеет данные для отправки на сервер, он записывает значение в эту характеристику. Значение ассоциированного с характеристикой RX 128-битного UUID — 0xD973F2E2-B19E-11E2-9E96-0800200C9A66.

Максимальная длина значения характеристики — 20 байт.

Чтобы установить соединение между двумя устройствами BlueNRG-MS (двумя оценочными платами BlueNRG), необходимо на одном из них реализовать режим «ведущий», а на втором должен быть установлен режим «ведомый». Как только соединение установлено — две точки могут начать передачу данных по каналу связи, используя эти две характеристики.

При использовании оценочных плат участвующие в обмене данные посылаются и принимаются с использованием подключенного к плате через эмулятор терминала на ПК, например, TeraTerm. Каждая оценочная плата будет отобра-

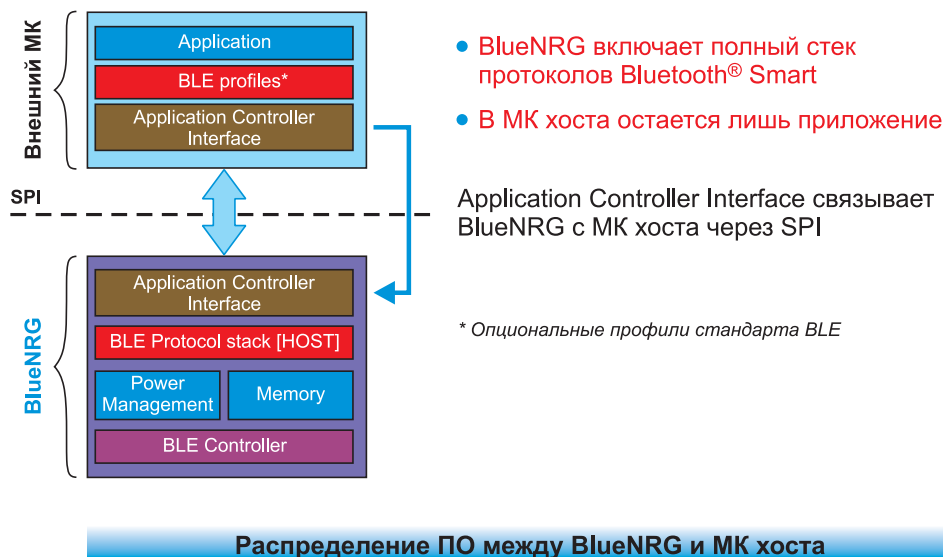


Рис. 4. Структура стека BlueNRG

жаться на ПК как виртуальный порт COM. Эмулятор терминала конфигурируется следующим образом:

- скорость передачи: 115200;
- стоповые биты: 1;
- проверка на четность: нет;
- количество бит данных на символ: 8;
- контроль потока: нет.

Проектные конфигурации “Client throughput” и “Server throughput” позволяют пользователю тестировать пропускную способность (определенный идентификатор препроцессора “THROUGHPUT_TEST” будет представлен в обеих проектных конфигурациях).

Тест на пропускную способность включает следующие этапы:

- Задать режим Client на одной из платформ BlueNRG-MS и сбросить ее. Платформа появится как виртуальный COM-порт на ПК. Открыть порт COM в терминальном эмуляторе. Клиент запустится через 4 секунды после сброса.
- Задать режим Server на второй платформе BlueNRG-MS и сбросить ее. После этого две платформы попытаются установить соединение. Как только им удастся это сделать, ведомый будет по-

стоянно отправлять клиенту уведомления, состоящие из 20 байт.

- После каждых 500 пакетов, полученных от клиента, текущая пропускная способность приложения будет отображаться на эмуляторе клиентского терминала.

Примечание: при работе с BlueNRG-1 в составе оценочной платы STEVAL-IDB007V1 контроллер **STM32L1** выполняет роль моста между USB и последовательным портом BlueNRG-1, что позволяет непосредственно проверить пропускную способность от ПК к BlueNRG-1. Пршивка представлена в двоичной форме в SDK BlueNRG-1. Приложение BLE Chat запускается на устройстве BlueNRG-1 и сохраняется во Flash-памяти.

Заключение

Производимые STMicroelectronics приемопередатчики BlueNRG стандарта Bluetooth Low Energy подходят для использования в самом широком спектре устройств персонального назначения, в системах сбора и учета данных, находят широкое применение в промышленной и домашней автоматике.

Встроенное ПО BlueNRG обеспечивает эффективное решение стоящих перед



Рис. 5. Модуль ST SPBTLE-RF



Рис. 6. Модуль STEVAL-IDB006V1

разработчиком задач и не требует от него углубленных познаний в радиочастотной технике и спецификации Bluetooth. Имеющийся в комплекте с SDK набор демонстрационных приложений позволяет использовать некоторые типичные рабочие сценарии BLE.

Постоянно расширяемый набор библиотек ПО, предоставляемые производителем оценочные платы и SDK обеспечивают быстрое начало работ и позволяют в кратчайшие сроки создать законченное устройство с поддержкой Bluetooth Low Energy.

Литература

1. <http://www.compel.ru/lib/ne/2016/7/6-ble-ustroystvo-s-mems-datchikami-legko-s-programmyim-paketom-bluemicrosystem1>.

2. <http://www.compel.ru/?s=BlueNRG>.

3. http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/design_tip/group0/38/8f/09/42/85/a4/47/3f/DM00321422/files/DM00321422.pdf/jcr:content/translations/en.DM00321422.pdf.

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка –
e-mail: wireless.vesti@compel.ru

BlueNRG-1 — новое однокристальное решение Bluetooth® Low Energy

Система-на-кристалле **BlueNRG-1** производства компании **STMicroelectronics** позволяет создавать на базе единственного чипа законченное устройство с поддержкой технологии Bluetooth Low Energy. Микросхема отличается чрезвычайно низким потреблением и предлагает 100 кбайт Flash-памяти для приложения пользователя, которое выполняется на малопотребляющем ядре **Cortex-M0**. BlueNRG-1 предназначена для растущих рынков Bluetooth с низким энергопотреблением, включая розничную торговлю, портативные гаджеты, устройства для «умного дома», автомобильную, промышленную и медицинскую электронику. Поддержка новейшей версии спецификации Bluetooth Low Energy ver 4.2 — современный подход к обеспечению безопасности и конфиденциальности при передаче данных. Способность BlueNRG-1 быстро переключаться между энергосберегающим и активным режимами продлевает время автономной работы от нескольких месяцев до нескольких лет. Кроме того, выходная мощность

чипа увеличена до +8 dBm, чтобы обеспечить четкую и надежную связь даже в условиях большого количества помех в диапазоне 2,4 ГГц. Новые возможности BlueNRG-1 включают в себя специальный вход цифрового микрофона, упрощающий голосовую поддержку приложений, и работу при температуре до 105°C, что очень важно в «умном освещении» и автомобильной электронике. BlueNRG-1 будет доступен в двух типах корпусов — 5x5 мм QFN-32 (BlueNRG-132) и 2,7x2,6 мм WLCSP-34 (BlueNRG-134).

Особенности BlueNRG-1:

- система-на-кристалле 32 МГц ARM® Cortex®-M0 SoC;
- память: 160 кбайт Flash и 24 кбайт RAM;
- точные показания RSSI для управления мощностью;
- быстрое пробуждение и переход в режим сна;
- 10-битный АЦП, SPI, 2xI²C, UART, и до 15 GPIO;
- встроенный понижающий DC/DC-преобразователь;
- максимальный ток потребления: 8,2 мА (@ 0 dBm, 3,0 В);
- ток 1 мкА в режиме сна (active BLE stack);
- рабочее напряжение: 1,7...3,6 В.



BALF-NRG-01D3

Балун для беспроводных BLE-устройств

- Нессимметричный выход Zant = 50 Ом
- Входной импеданс, соответствующий чипам семейства BLUENRG
- Низкие вносимые потери: -1,1 дБ
- Низкий дисбаланс по амплитуде (0,5 дБ) и фазе (7°)
- Высокие радиочастотные параметры
- Высота корпуса: < 670 μm



Поддержка разработчиков:
E-mail: st@compel.ru
www.compel.ru/projects-support

Компэл
www.compel.ru

Алексей Чечекин (КОМПЭЛ), Алексей Ширяев (КОМПЭЛ)

НОВЫЙ МОДУЛЬ QUECTEL: НЕЗАВИСИМАЯ РАБОТА GSM И ПРИЕМНИКА GNSS

В новом комбинированном модуле MC60 производства компании Quectel за GSM- и GNSS-части впервые в отрасли отвечают два независимых процессорных ядра, размещенных на одном кристалле. Таким образом, появилась возможность одновременно решать навигационные задачи и задачи GSM/GPRS-связи в рамках одного компактного корпуса.



Модуль MC60 (таблица 1) — очередная новинка компании Quectel. Он создан на базе всего положительного опыта, накопленного компанией за годы ее присутствия на рынке GSM и GPS/ГЛОНАСС. Модуль является комбинированным решением GSM/GPRS + GNSS, основанным на платформе MT2503D производства компании Mediatek. Платформа MT2503D — это комбинация GNSS-чипсета MT3333 и GSM/GPRS-чипсета MT6261. Новый комбинированный чипсет показывает такую же производительность, как MT6261 и MT3333, имеет тот же обширный функционал, но существенно меньшие габариты, а также предлагает расширенные возможности в части GNSS.

На рисунке 1 показано, что модуль MC60 всего на 1 и 0,2 мм по длине и ширине соответственно превышает размеры традиционного GSM/GPRS-модуля M66. В действительности же использование комбинированного решения позволяет существенно уменьшить размер печатной платы и в ряде случаев уменьшить количество слоев меди, используемых для трассировки. Ожидаемый размер печатной платы для устройств с автономным питанием, таких как маяки, закладки, персональные трекеры, трекеры для детей и животных, составит не более 25x25 мм. Говоря о трассировке, нужно отметить, что расположение выводов у модуля MC60 традиционно для продуктов компании Quectel выполнено в дружелюбной проектировщику манере. То есть, большинство выводов модуля сгруппировано по целевому назначению.

На рисунке 2 видно, что цепи питания, сим-интерфейсы, цепи управления, UART'ы и другие функциональные группы расположены очень удачно с

точки зрения удобства трассировки, что упрощает процесс и повышает в итоге качество проектируемого продукта. Непосредственно в нижней части модуля расположены только резервные выводы и цифровой аудиоинтерфейс. И если PCM в проекте не задействован, то корпус модуля можно рассматривать как LCC. То есть, все выводы доступны снаружи, и нет необходимости в рентгеновском контроле собранных печатных плат.

Нужно отметить, что идея комбинированного GSM/GPS/ГЛОНАСС-модуля не нова. Попытки создать такое решение были и раньше и предпринимались целым рядом компаний. Но это были попытки сделать все несколько иначе: решение навигационных задач возлагалось

на ядро GSM во время пауз в таймслотах сети, когда ядро не занято непосредственно обработкой задач связи. Так или иначе, но выполнение задач связи и навигации алгоритмически существенно различается. Реализовать ранее подобные модули на должном уровне одновременно не удавалось, такие решения не прижились и рынком приняты не были. В случае же с MT2503 использован другой вариант (рисунок 3), а именно — размещение на одном кристалле двух независимых процессорных ядер.

Как видно из рисунка 3, одно ядро на основе MT3333 занято решением навигационных задач, а другое на основе MT6261 решает задачи GSM/GPRS-связи. Также GSM-ядро обрабатывает смежные задачи, например, BT3.0 или SD-интерфейсы.

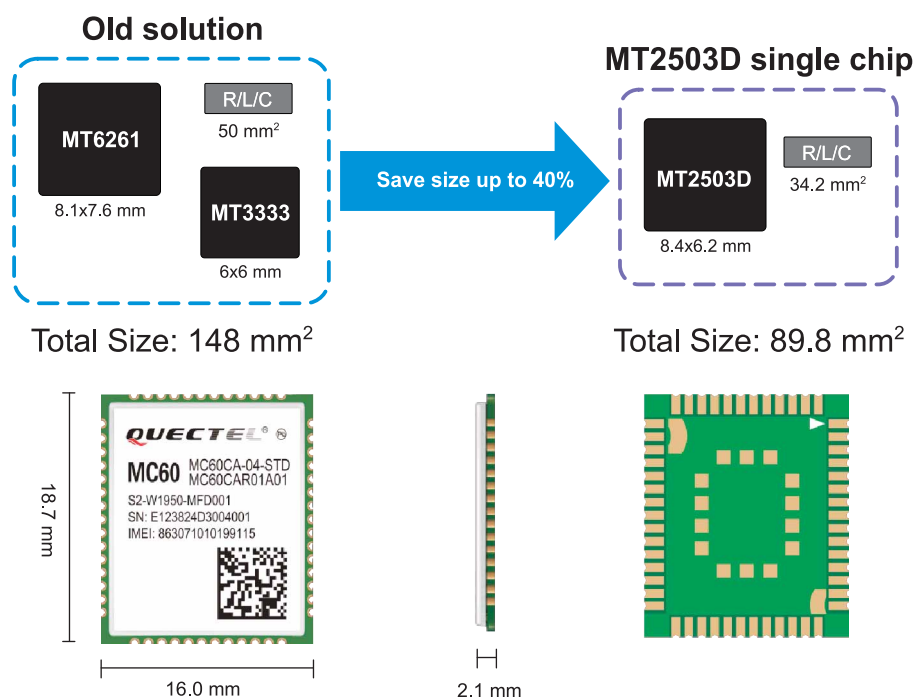


Рис. 1. Сравнение размеров модулей Quectel M66 (только GSM) и MC60(GSM/GPRS + GNSS)

Таблица 1. Спецификация модуля Quectel MC60

GPS L1 Band Receiver (1575.42 MHz), GLONASS L1 Band Receiver (1601.71 MHz)	Channel	33 tracking channels 99 acquisition channels 210 PRN channels
	C/A code	
	SBAS	WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN
Horizontal Position Accuracy	Autonomous	< 2.5 m CEP
Velocity Accuracy	Without Aid	< 0.1 m/s
Acceleration Accuracy	Without Aid	0.1 m/s ²
Timing Accuracy	1PPS	10 ns
TTFF@-130dBm with QuecFastFix Online	Cold Start	< 4.5 s
TTFF@-130dBm with EASY™	Cold Start	< 15 s
	Warm Start	< 5 s
	Hot Start	< 1 s
TTFF@-130 dBm without EASY™	Cold Start	< 35 s
	Warm Start	< 30 s
	Hot Start	< 1 s
Sensitivity	Acquisition	-149 dBm
	Tracking	-167 dBm
	Re-acquisition	-161 dBm
Quad-band	850/900/1800/1900 MHz	
GPRS Multi-slot Class	Class 12	
GPRS Mobile Station	Class B	
Compliant to GSM Phase 2/2+	Class 4 (2W @850/900 MHz), Class 1 (1W @1800/1900 MHz)	
Supply Voltage Range	3.3...4.6 V, 4.0 V Typ.	
Low Power Consumption	1.2 mA @DRX = 5	
Operation Temperature	-40...85°C	
Dimensions	18.7x16.0x2.1 mm	
Weight	Approx. 1.3 g	
Control via AT Commands	GSM 07.07, 07.05 and other enhanced AT commands	
Speech Codec Modes	Half Rate (HR), Full Rate (FR), Enhanced Full Rate (EFR), Adaptive Multi-Rate (AMR)	
Echo Arithmetic	Echo Cancellation, Echo Suppression, Noise Reduction	
Bluetooth	BT 3.0; Profiles: SPP, HFP-AG	
SIM/USIM	3 V/1.8 V	
UART	x3	

Рассмотрим модуль MC60 и его функции подробнее (рисунок 4).

Как уже говорилось, MC60 вобрал в себя весь положительный опыт, который ранее был накоплен его создателями в области модулей GSM и GPS/GNSS. GSM-подсистема модуля работает во всех частотных диапазонах GSM, поддерживает GPRS Class 12, имеет полную совместимость со спецификациями GSM 07.07 и 07.05. Поддерживаются стеки большого количества протоколов высокого уровня: TCP/UDP/HTTP/FTP/PPP и других.

Реализована работа детектора глушения (jamming detection), цифровой и аналоговый аудиоинтерфейсы с поддержкой кодеков HR,FR,EFR,AMR. Поддерживаются два интерфейса SIM/USIM 3V/1.8V. Нужно отметить, что пока реализован только режим DS/SS (Dual SIM, Single Stand-by), то есть две карты поддерживаются попеременно. В первом квартале 2017 года появится режим DS/DS (Dual SIM, Dual Stand-by). Еще один функционал, поддерживаемый модулем — технология встроенных приложений OpenCPU. Это возможность получить доступ к ресурсам процессорного ядра GSM-подсистемы модуля и использовать их для работы пользовательского приложения. И производитель модуля предоставляет эту возможность. Еще одним традиционным преимуществом модулей Quectel всегда была возможность позиционирования по базовым станциям LBS (Location-based service). Эта функция поддержана и в MC60. В состав модуля входит трансивер Bluetooth (версия 3,0, в настоящее время поддерживаются два профиля: SPP для связи с периферией и HFP-AG для передачи звука, например, Hands-Free).

GPS/ГЛОНАСС-подсистема обрабатывает данные обеих спутниковых группировок, что повышает точность позиционирования, (рисунок 5) за счет увеличения количества спутников, участвующих в решении навигационной задачи.

В качестве примера на рисунке 5 приведены результаты 12-часовых испытаний статично установленного модуля с GPS + GLONASS и только с GPS.

Внутри корпуса модуля MC60 установлены дополнительный МШУ и полосовой фильтр, что снижает требования к антенне и позволяет в большинстве задач обойтись бюджетной керамической чип-антенной. Усовершенствован функционал AGPS — введена функция EPO (Extended Prediction Orbit), что позволяет существенно уменьшить время холодного старта (таблица 2).

Поддерживаются технологии, уже опробованные на навигационных модулях прошлого поколения, как например, GLP (GNSS Low Power). В дополнение к уже известным технологиям EASYtm и AlwaysLocatetm это позволяет существенно уменьшить энергопотребление

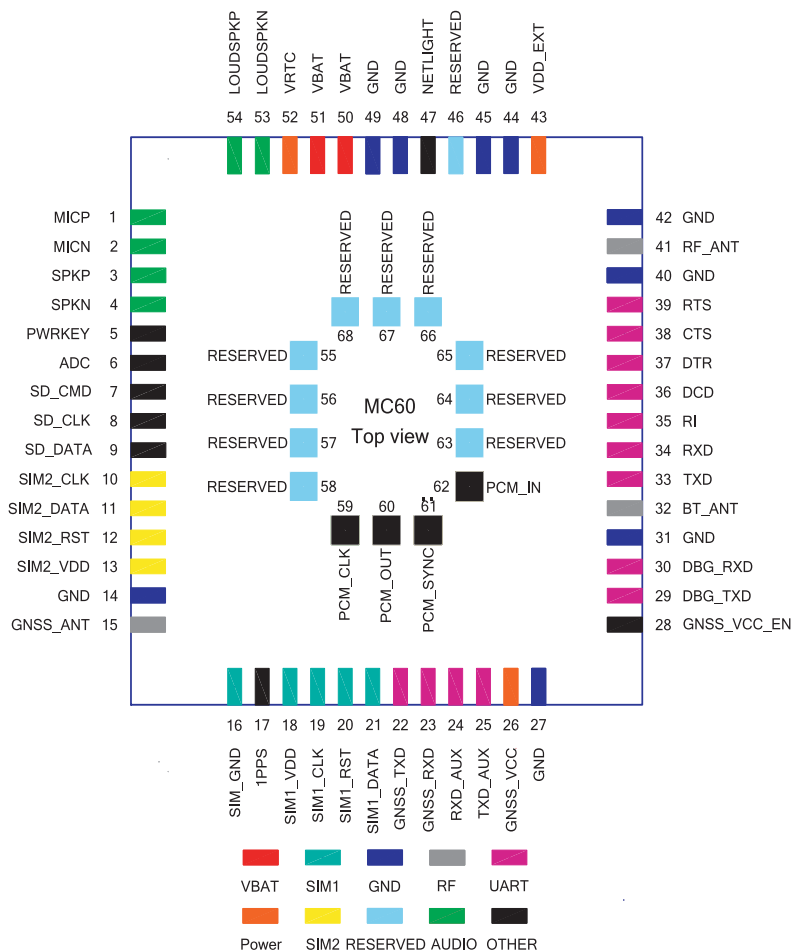


Рис. 2. Расположение выводов модуля MC60

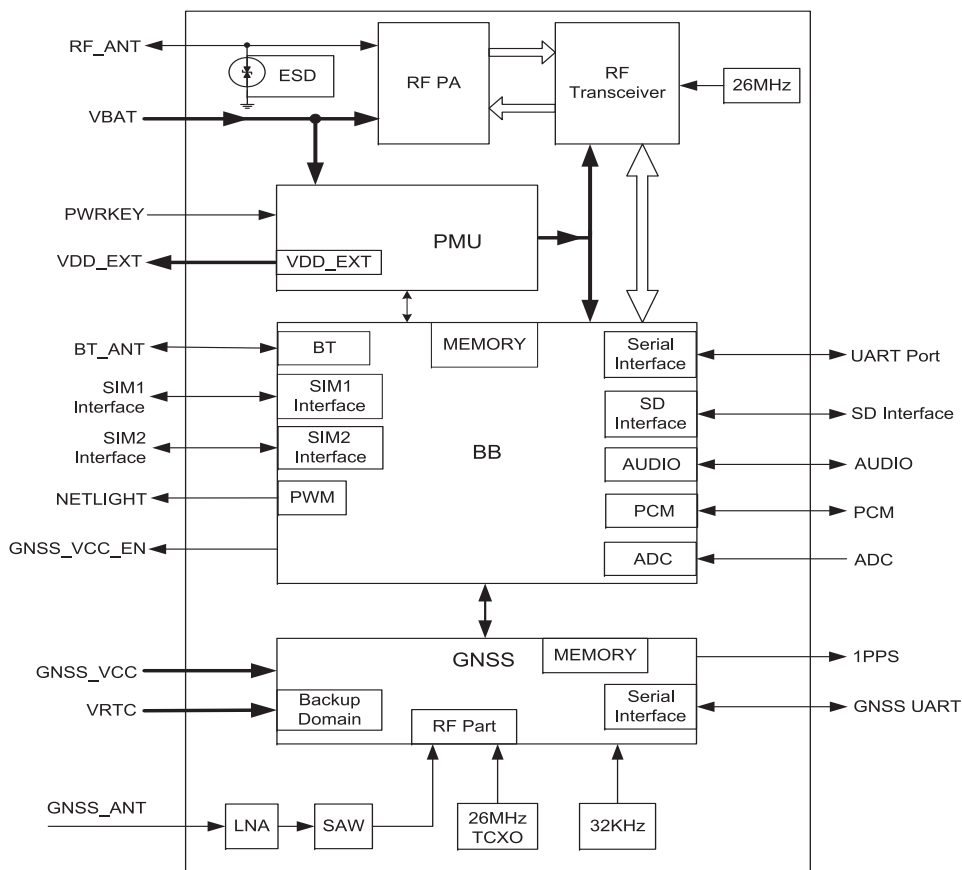


Рис. 3. Функциональная диаграмма модуля MC60

Advanced Features

GNSS Features

- GPS + GLONASS
- QuecFastFix Online
- EASY™
- LOCUST™
- GLP
- DGPS
- AlwaysLocate™
- Build-in LNA
- EPO™
- SDK
- 1PPS

Bluetooth

- BT3.0
- Profiles: SPP, HFP-AG



* Under Development

GSM/GPRS Features

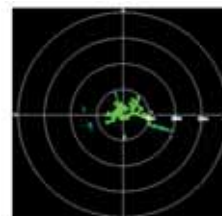
- Quad-band: 850/900/1800/1900MHz
- GPRS Multi-slot Class: Class 12
- AT Commands: GSM 07.07, 07.05 and enhanced AT commands
- TCP/UDP/HTTP/FTP/PPP
- Jamming Detection
- Audio
- QuecFOTA™
- Dual SIM Single Standby
- OpenCPU

Others

- Extended temperature range: -40...85°C
- Support 3V/1.8V SIM/USIM cards
- Highly compact size



GPS+GLONASS



GPS

Рис. 4. Функции модуля

Таблица 2. Время холодного старта

Условия тестирования		TTFF без использования EPO	TTFF с использованием EPO
В реальных условиях при уровне сигнала от генератора -130 dBm	Холодный старт, с	< 35	< 15
	Теплый старт, с	< 30	< 5

навигационной подсистемы модуля. Типичное потребление с использованием этих технологий составляет 2,8 мА. Технология LOCUSTm позволяет записывать трек в упрощенном формате (время,

долгота, широта, высота) во внутреннюю Flash-память модуля без использования внешнего хост-контроллера.

Средства разработки и отладки включают в себя: универсальную от-

Рис. 5. Результаты 12-часовых испытаний статично установленного модуля MC60

ладочную плату GSM-EVB Kit и мезонинную плату MC60-TE-A Kit с установленным на ней модулем. Все необходимое программное обеспечение поставляется в комплекте с указанным оборудованием.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка –
e-mail: wireless.vesti@compel.ru

QUECTEL®
Build a Smarter World

GPRS/GNSS-модуль MC60

Новое решение для Интернета вещей



- Независимое питание GSM и GPS: 2 отдельных кварца для процессорных ядер
- Встроенный МШУ для GPS/ГЛОНАСС
- Dual-Sim: одновременная работа двух SIM-карт
- Поддержка Bluetooth 3.0: профили SPP и HFP
- Поддержка OpenCPU: технологии встроенных приложений
- Quecfastfix (технология AGPS): ускорение старта – холодный старт 10 с
- Встроенные термодатчик и усилитель звука на аналоговом выходе

Москва
Тел.: +7 (495) 234-7734, доб. 2250
Ширяев Алексей
E-mail: a.shiryaev@compel.ru

Компэл
www.compel.ru

Александр Калачев (г. Барнаул)

ЗАЖИГАЯ «ЗВЕЗДЫ»: БЕСПРОВОДНОЙ СТЕК ПРОТОКОЛОВ 802.15.4E/G ДЛЯ CC1310



Новое программное обеспечение **TI 15.4-Stack SDK** компании **Texas Instruments** для **беспроводных микроконтроллеров CC1310** позволяет создавать **сетевые приложения** топологии «звезда» для устройств, работающих в **субгигагерцевом диапазоне**. Поддержка режима работы с переключением частот позволяет узлам сети работать с большей выходной мощностью, увеличивая радиус действия, и размещать на одной территории большее количество узлов.

Применение беспроводных сетей открывает широкие возможности по автоматизации и отслеживанию состояния различных процессов. Беспроводные интерфейсы позволяют подключать к сетям управления самые различные по типу и функциональности устройства. Фактически, так родился процесс, получивший название «Интернет вещей» (*Internet of Things, IoT*). Взаимодействие устройств, относящихся к категории «Интернета вещей» чаще всего происходит в пределах небольших сетей (как правило, типа PAN или LAN), работающих по различным протоколам. Выбор технологии для того или иного класса задач будет зависеть в первую очередь от самой задачи и возможного территориального разброса узлов.

В середине 2016 года компания **Texas Instruments** представила беспроводной стек протоколов **TI-15.4 MAC**, построенный на основе стандарта **IEEE802.15.4e/g**. Новое программное обеспечение для беспроводных микроконтроллеров **CC1310** позволяет создавать беспроводные сети с топологией «звезда» в диапазоне **868 МГц (Sub-1 GHz)**. Полное название нового продукта — **TI-15.4 Stack: IEEE802.15.4e/g Standard Based Star Networking Software Development Kit (SDK)**.

Преимущества **TI 15.4-Stack** перед другими сетевыми протоколами — большая дальность действия и устойчивость к помехам благодаря использованию технологии «прыгающих частот» (*Frequency Hopping*).

TI 15.4-Stack является реализацией стандарта **802.15.4-2006** с расширениями **802.15.4e** для промышленного применения и **802.15.4g** для небольших

сетей. Он поддерживает режим переключения частот **WiSUN**.

Основные целевые области применения стека протоколов **TI 15.4-Stack** это:

- охранные системы — датчики открытия окон и дверей, детекторы движения, управление открытием/закрытием ворот;
- пожарные датчики — детекторы огня, дыма;
- системы вентиляции и кондиционирования, датчики температуры, влажности и состава воздуха;



- промышленная автоматика;
- датчики потока, давления, протечек;
- системы учета расхода ресурсов;
- интеллектуальные сети распределения ресурсов;
- системы домашней автоматизации.

Основные характеристики стека протоколов **TI-15.4 Stack**

Программное обеспечение **TI-15.4 Stack Software Development Kit (TI-15.4 Stack SDK)** ориентировано на серию многоядерных беспроводных систем-на-кристалле **SimpleLink CC1310**.

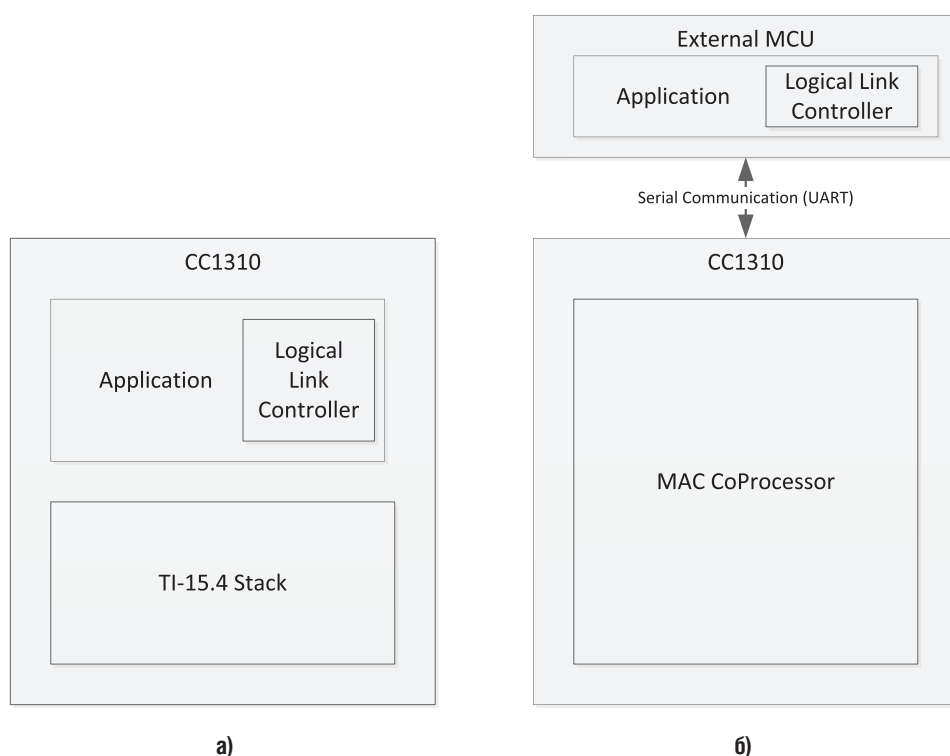


Рис. 1. Организация системной архитектуры сетевых узлов: а) «однокристальный» узел; б) узел на основе сетевого процессора

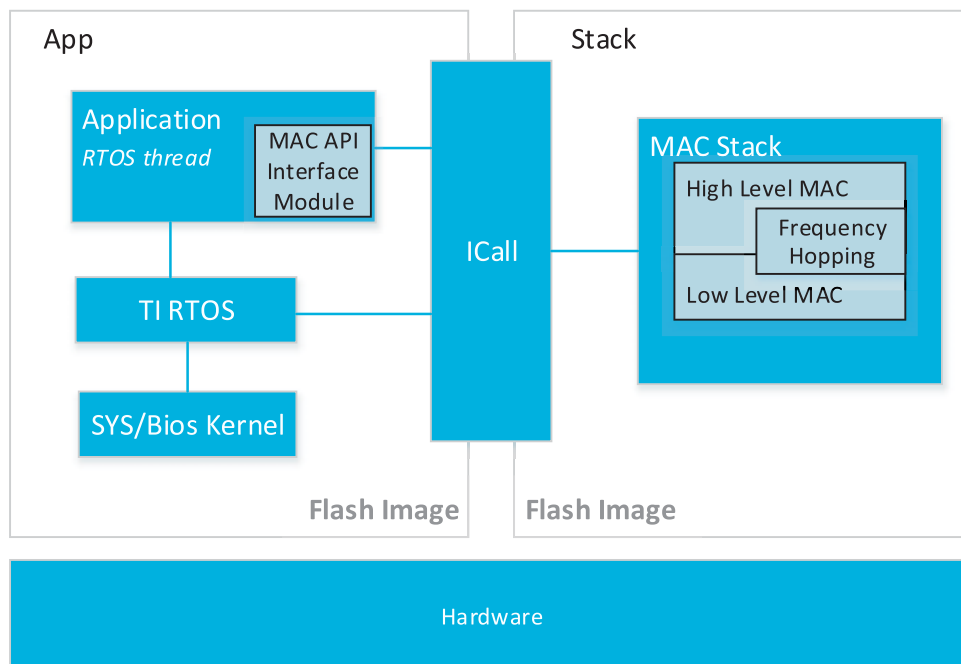


Рис. 2. Составные части TI-15.4 Stack SDK

Микросхема CC1310 имеет в своем составе субгигагерцевый приемопередатчик, управляемый процессорным ядром ARM Cortex M0, независимый контроллер датчиков, контроллер приложений и верхних уровней стека протоколов архитектуры ARM Cortex M3, 128 кбайт встроенной памяти программ, 20 кбайт оперативной памяти, набор периферийных интерфейсов.

Субгигагерцевый диапазон, в частности — диапазон 868 МГц, позволяет при незначительных затратах энергии передавать данные на значительные расстояния (до нескольких километров между узлами в условиях прямой видимости), или же достаточно свободно осуществлять связь между узлами в пределах здания или группы близко

расположенных зданий. Для обеспечения безопасности сети при передаче сообщений TI-15.4 Stack поддерживает AES-шифрование.

Программное обеспечение предоставляется без лицензионных отчислений и предназначено для работы на линейке беспроводных систем на кристалле **SimpleLink Sub-1 GHz CC1310 wireless MCU**.

Основные характеристики стека протоколов TI-15.4 MAC:

- поддерживает стандарты IEEE 802.15.4e/g;
- позволяет организовать PAN-сети топологии «звезда»;
- возможны различные режимы работы сети: синхронный (маяк) и асинхронный (non-beacon), режим с пере-

ключением частот (поддерживается спецификация WiSUN FAN, на данный момент возможен только для полосы 915 МГц);

- реализованы шифрование и проверка целостности (AES -128).

Все это в сумме позволяет строить на базе стека протоколов TI-15.4 Stack защищенные малопотребляющие беспроводные сети с достаточно широким радиусом действия. Использование готового стека существенно сокращает время разработки устройств для Интернета вещей, так как включает в себя программное обеспечение как для беспроводных сенсоров, так и для центрального узла сбора данных.

В стеке определено два типа сетевых устройств — полнофункциональные устройства (*full-function device, FFD*) и устройства с ограниченной функциональностью (*reduced-function device, RFD*). Поддерживается также два подхода к организации системной архитектуры сетевых узлов — «однокристалльный» узел и узел на основе сетевого процессора с внешним управляющим микроконтроллером (рисунок 1).

В «однокристалльном» узле и приложении и стек протоколов выполняется непосредственно на CC1310. Данная конфигурация является типовой, наиболее дешевой и энергоэффективной. На CC1310 реализуются и рядовые узлы сети и координатор сети.

При архитектуре сетевого узла, использующего сетевой процессор, CC1310 выполняет все задачи, связанные с функционированием сети и сетевого стека, тогда как приложение выполняется на отдельном внешнем контроллере (хост-контроллере). Взаимодействие CC1310 и хост-контроллера осуществляется посредством интерфейса UART. Такой подход позволяет, например, легко добавить сетевую функциональность в уже работающую систему, или же реализовать и протестировать в короткие сроки макетный образец проекта беспроводной сети. Сетевой процессор позволяет также работать с беспроводной сетью посредством персонального компьютера.

Программное окружение TI-15.4 Stack SDK состоит из трех основных частей:

- операционной системы реального времени TI-RTOS;
- образа прикладной задачи;
- образа стека протоколов.

TI-RTOS является многозадачной операционной системой реального времени с возможностью синхронизации задач. И стек протоколов, и приложение пользователя выполняются в рамках TI-RTOS как отдельные задачи, при этом TI-15.4 Stack имеет более высокий приоритет. Синхронизация между приложением и стеком протоколов осуществляется при помощи механизма

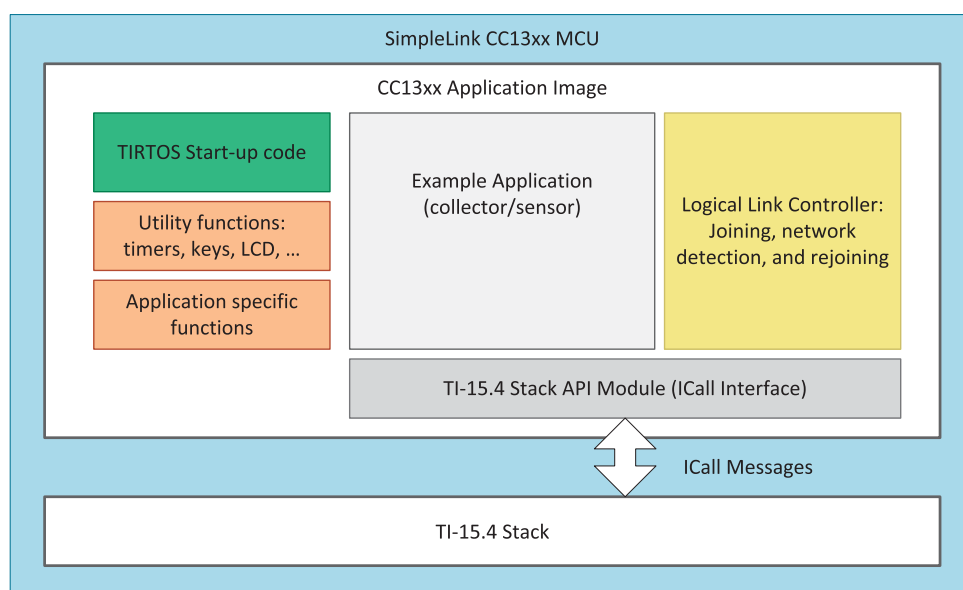


Рис. 3. Основные компоненты, входящие в TI-15.4 Stack SDK

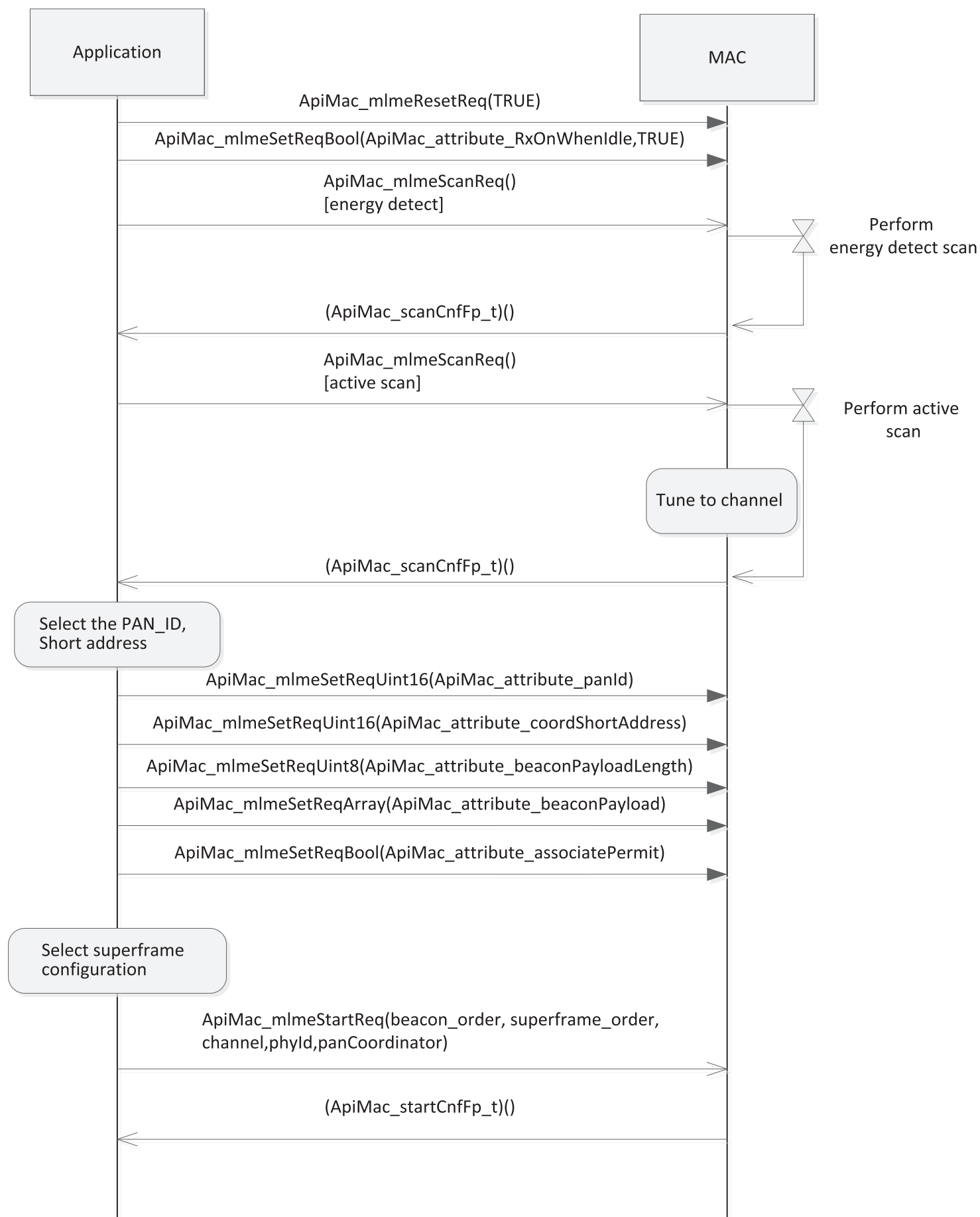


Рис. 4. Взаимодействие приложения координатора и стека протоколов

косвенных вызовов Indirect Call (ICall) (рисунок 2).

В образ приложения входят про-
граммный код приложения, драйвера

периферийных устройств, TI-RTOS и
модуль ICall.

Основные компоненты, входящие в TI-15.4 Stack SDK (рисунок 3):

- контроллер логического канала (*Logical Link Controller*) — программный блок, реализующий специфичные для стандартов IEEE 802.15.4 или Wi-SUN задачи, такие как формирование сети, присоединение или выход из сети. Link Controller скрывает особенности работы с различными сетевыми протоколами;

- код инициализации TI-RTOS Startup Code предназначен для настройки и запуска задач приложения и стека протоколов;

- утилиты и драйверы периферийных устройств — LCD, таймеры, последовательные интерфейсы, кнопки и так далее;

- вспомогательные прикладные функции — набор функций, специфичных для платформ, поддерживающих CC1310, например, запись данных в постоянную память, отображение информации на LCD, интерфейс с пользователем;

- модуль TI-15.4 Stack API (API MAC module) предоставляет интерфейс к сервисам стека протоколов 802.15.4 через модуль ICALL.

Также TI-15.4 Stack SDK предлагает примеры исходных кодов реализации сетевых устройств двух типов — коллекторного и сенсорного узлов. Разработчик может в дальнейшем модифицировать данные примеры для получения собственного приложения с нужной функциональностью.

TI-15.4 Stack поддерживает три режима организации и работы сети:

- синхронный («маячковый»);
- асинхронный;
- режим с переключением частот.

Синхронный режим работы сети под управлением TI-15.4 Stack

Описанный в стандарте IEEE 802.15.4 синхронный режим работы PAN-сети предполагает наличие координатора, периодически рассылающего пакеты синхронизации сети для обозначения своего присутствия и обеспечения

возможности подключения к сети новых устройств.

В данном режиме работы сети весь временной период разбивается на дискретные интервалы определенной длительности, называемые суперкадрами. Отсчет суперкадра начинается с пакета синхронизации (*beacon*), в котором указывается информация, помогающая узлам присоединиться к сети, получить сетевые параметры и синхронизировать цикл своей работы с сетью. В суперкадре выделяется активный и пассивный периоды. В течение активного периода узлы сети взаимодействуют между собой посредством механизма доступа CSMA/CA, в течение пассивного периода узлы могут находиться в режиме пониженного энергопотребления.

Сеть всегда создается полнофункциональным устройством, и процесс ее запуска начинается со сброса подуровня MAC. Работа синхронной сети идет всегда в рамках одного частотного канала и перед стартом сети координатор может просканировать диапазон

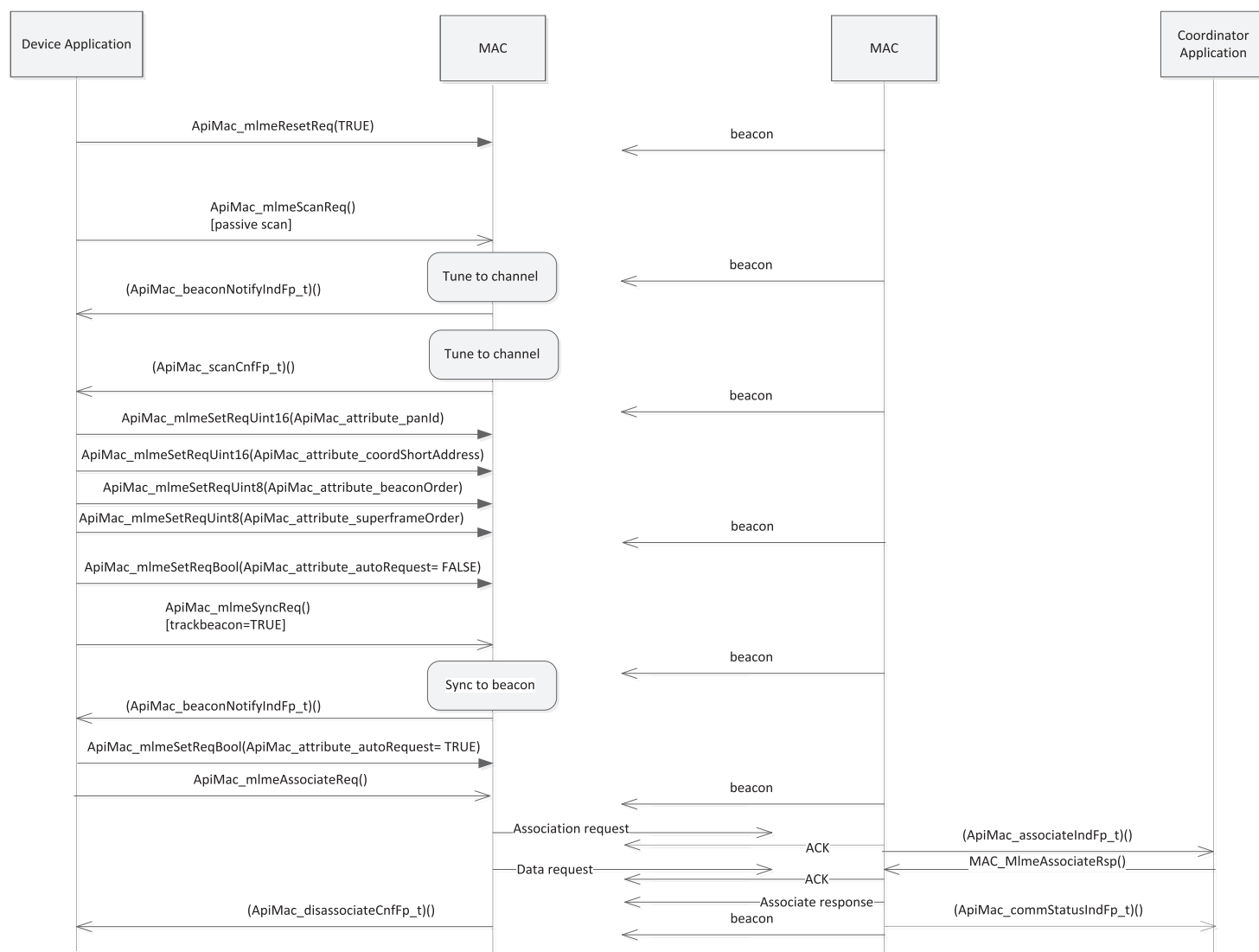


Рис. 5. Процесс присоединения узла к сети в синхронном режиме

с целью выбрать канал с наименьшим количеством помех и других работающих активных сетей. Далее координатор задает идентификатор сети, собственный короткий адрес, конфигурирует суперкадр и вызовом процедуры `ApiMac_mlmeStartReq()` запускает работу сети.

Диаграмма последовательностей взаимодействия приложения координатора и стека протоколов представлена на рисунке 4.

Устройство, желающее присоединиться к сети (рисунок 5), должно просканировать частотные каналы и по результатам сканирования выбрать подходящую сеть. Вторым шагом будет непосредственная синхронизация с сетью для приема сигналов маяка и отправки и приема информационных пакетов.

Для завершения процесса синхронизации требуется определенный период времени, после которого узел получает возможность отслеживать синхронизи-

рующие пакеты. Далее приложение может инициировать процесс присоединения к сети.

Процесс прямого обмена данными в сети представлен на рисунке 6. Рассмотрены несколько случаев:

- успешный обмен данными;
- запрос на передачу данных в условиях загруженной сети (ошибка доступа к среде);
- случай передачи данных без подтверждения получения.

Все конечные устройства, работающие в сети маяком, должны отслеживать пакеты синхронизации, генерируемые координатором. Данные пакеты позволяют устройствам синхронизироваться с координатором, запрашивать координатор о наличии данных для них и самим передавать сообщения другим узлам сети.

В ходе подключения к сети узел вызывает функцию `Api_mlmeSyncReq()` с параметром `trackBeacon (=TRUE)` для

автоматического отслеживания и приема синхронизирующих пакетов. При потере синхронизации с координатором узел может запустить процедуру синхронизации заново (рисунок 7).

Асинхронный режим работы сети

Вторым режимом работы сети, определенным в стандарте IEEE 802.15.4, является асинхронный режим, не требующий от координатора периодической рассылки синхропакетов, а от узлов — их отслеживания. Совместная работа устройств в сети регулируется механизмом CSMA/CA.

Процедура старта сети практически не отличается от старта синхронной сети (за исключением параметров). Координатор проводит сканирование диапазона с целью выбора оптимального частотного канала, устанавливает собственный короткий адрес, идентификатор сети и ожидает запросов на подключение.

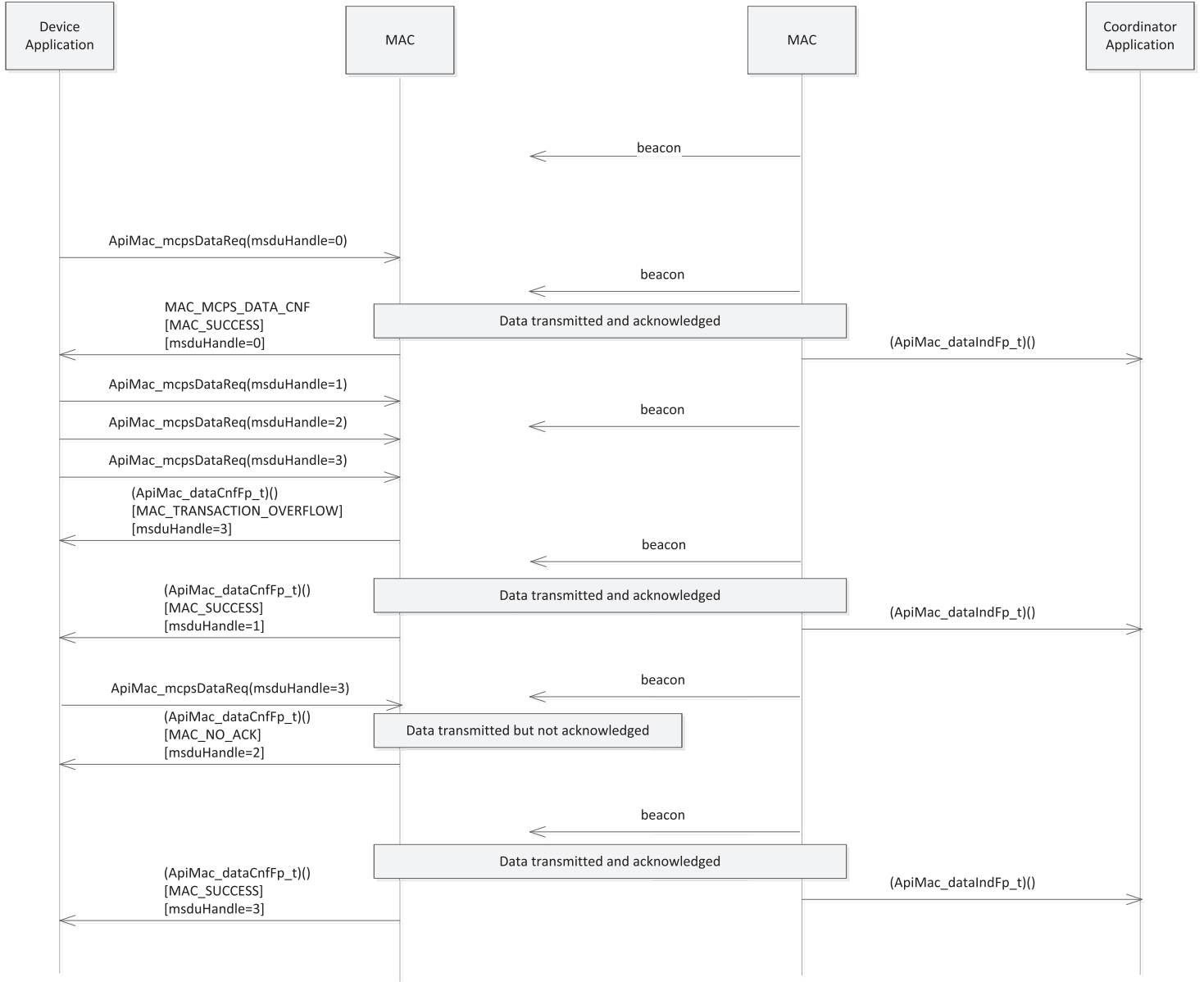


Рис. 6. Обмен данными в синхронном режиме

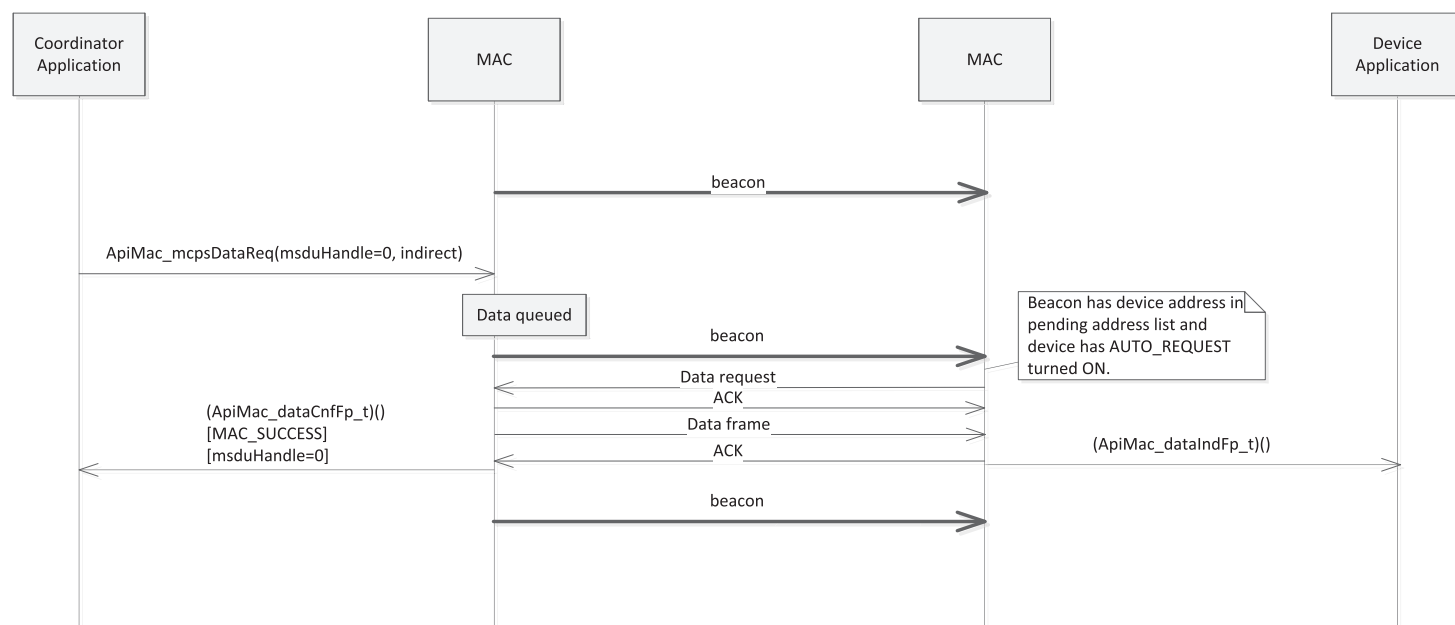


Рис. 7. Получение данных узлом от координатора в синхронном режиме работы сети

Устройство, желающее подключиться к сети, проводит активное сканирование частотных каналов, рассылая широковещательный запрос на подключение. Координатор (если он присутствует в данном канале) в случае получения такого пакета высылает ответ. По окончании сканирования устройство будет иметь список дескрипторов сетей и выберет нужный ему координатор.

Выбрав сеть, устройство посылает координатору запрос на присоединение. После получения подтверждения от координатора устройство считается подключенным к сети.

Режим переключения частот

Стек протоколов TI-15.4 Stack позволяет создавать сети, работающие в режиме переключения частот. Данная опция поддерживается стеком по умолчанию в диапазоне 902...928 МГц и основывается на режиме прямого обмена пакетов, описанного в спецификации Wi-SUN FAN v1.0. Это позволяет работать на каком-либо фиксированном канале или в режиме переключения каналов, где последовательность переключений задается функцией Direct Hash Channel Function (DH1CF). Для рабо-

ты в диапазоне 868 МГц нужно задать другую маску сканируемых каналов.

DH1CF позволяет генерировать псевдослучайную последовательность переключения каналов, основываясь на расширенном адресе сетевого узла, гарантируя тем самым уникальность последовательности для каждого узла. Каждый узел поддерживает два типа последовательностей переключения каналов: адресную (*Unicast*) и широковещательную (*Broadcast*).

Устройство, желающее присоединиться к сети, проводит активное сканирование каналов, осуществляя широковещательную рассылку пакетов-запросов. Координатор, получив подобный запрос, посылает ответ. По окончании сканирования TI15.4 Stack осуществляет вызов call-back-функции `ApiMac_scanCnfFp_t` с дескрипторами обнаруженных в ходе сканирования сетей. Приложение на устройстве выбирает требуемый дескриптор и координатор. Следующим шагом является отправка запроса на присоединение к сети. Приложение вызывает функцию `ApiMac_mlmAssociateReq()` для отправки запроса координатору. В случае успеха приложению приходит

подтверждение со стороны стека протоколов.

В ходе работы сети каждый из узлов работает по своей собственной последовательности переключения частот (рисунк 8).

Для запуска широковещательной передачи координатор инициирует специальную процедуру, позволяющую узлам подстроиться под псевдослучайную последовательность переключений широковещательной передачи координатора.

Получив широковещательный пакет от координатора, узел будет продолжать работать по собственной последовательности в течение текущего интервала *dwell*, а со следующего интервала переключится на широковещательную последовательность и будет отслеживать ее в течение следующего *dwell*-интервала, после чего вернется на собственную последовательность переключения частот (рисунк 9).

Приложение может установить собственный интервал отслеживания широковещательных пакетов *dwell* (по умолчанию — 250 мс), режим переключения частот и список каналов, в пределах которых будет осуществляться переключение частот. На координаторе дополнительно можно установить интервал отправки широковещательных пакетов (по умолчанию — 4250 мс).

Поддерживается специальный тип передачи, называемый асинхронной передачей (*Async transmission*). В этом режиме устройство передает пакет специального вида (*Async frame types*, о чем более подробно в “Wi-Sun FAN Specification”) по всем указанным приложением каналам. Это позволяет другим устройствам получить данные пакеты вне зависимости от последова-

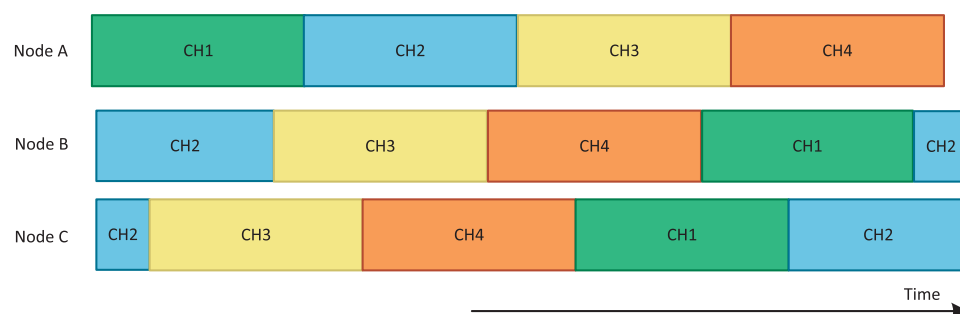


Рис. 8. Пример последовательности переключения частот на различных узлах

тельности переключения каналов. Данная возможность используется для обмена между узлами сети информацией о последовательностях переключений, например, при старте сети.

После получения информации о последовательностях переключения соседних узлов TI-15.4 Stack автоматически отслеживает их, что позволяет успешно осуществлять адресные и широковещательные передачи, скрывая от приложения механизмы синхронизации и переключения последовательностей.

Единственным заметным отличием режима переключения частот от остальных режимов является необходимость использования глобальных адресов узлов вместо коротких.

В режиме переключения частот в сети могут функционировать три типа устройств:

- координатор сети;
- постоянно включенный узел;
- узел, большую часть времени находящийся в режиме сна.

Примеры приложений TI-15.4 Stack SDK

В помощь разработчикам в TI-15.4 Stack SDK предлагаются несколько проектов приложений различного уровня — от простой функциональности 802.15.4 MAC до примеров приложений сенсорных узлов и координатора сети. Данные проекты не требуют доработки и специальных навыков для компиляции или запуска и могут служить отправной точкой для собственных приложений.

Проект Stack реализует весь функционал сетевого взаимодействия узла. Он включает программное обеспечение для полнофункционального устройства (FFD) и для устройств с ограниченной функциональностью (RFD). Предварительно скомпилированный образ стека используется во всех проектах-примерах TI-15.4 Stack SDK.

Основным отличием FFD от RFD является количество устройств, с которыми узел может взаимодействовать. По умолчанию FFD может общаться с 50 соседними узлами (при включенном режиме шифрования), RFD — только с 5, но это экономит порядка 3300 байт оперативной памяти.

Проект сетевого процессора (Co-Processor) предназначен для реализации систем, работающих по «двухчиповой» схеме, существенно упрощая добавление сетевых возможностей в уже готовые проекты и решения. Наличие исходных текстов позволяет модифицировать код и добавлять новые ко-

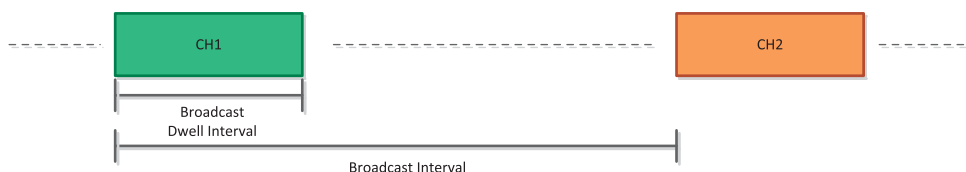


Рис. 9. Переход на широковещательную последовательность переключения частот

манды в зависимости от потребностей текущей задачи.

Проект коллектора данных (Collector) реализует сетевой полнофункциональный узел, выполняющий задачи сетевого координатора (иницирование сети и присоединение к сети новых устройств), а также устройства сбора данных с подключившихся к сети сенсорных узлов (Sensor devices).

Сенсорные узлы, в свою очередь, основываются на проекте (Sensor) сетевого устройства с неполной функциональностью (присоединение к сети и опрос координатора на предмет наличия данных для узла) с дополнительными функциями опроса датчиков и пересылки данных координатору.

Заключение

TI 15.4-Stack SDK является достаточно мощным и гибким инструментом разработки сетевых приложений для устройств, работающих в субгигагерцевом диапазоне. Большинство рутинных сетевых операций автоматически выполняется на уровне стека протоколов прозрачно для прикладной задачи. Наличие готовых примеров позволяет разработчику в достаточной мере адаптироваться к стилю написания приложений с учетом специфики работы TI-RTOS и TI 15.4-Stack.

Поддержка в TI 15.4-Stack режима работы сетевых устройств с переключением частот позволяет узлам сети работать с большей выходной мощно-

стью радиосигнала в пределах одного частотного диапазона, увеличивая тем самым радиус действия сети без увеличения уровня ошибок и перекрестных помех. Также это позволяет размещать на одной территории большее количество узлов. Особенно это актуально для решения задач, связанных с автоматизацией жилых и коммерческих зданий, промышленной автоматикой, интеллектуальными энергосетями.

Литература

1. Frequency hopping for long-range IoT networks//<http://www.ti.com/lit/pdf/swry025>.
2. TI-15.4 Stack: IEEE802.15.4e/g Standard Based Star Networking Software Development Kit (SDK)//<http://www.ti.com/tool/TI-15.4-STACK>.
3. Новый беспроводной стек протоколов 802.15.4e/g для CC1310//<http://www.compel.ru/2016/07/29/novyiy-bespровodnoy-stek-protokolov-802-15-4e-g-dlya-cc1310>.
4. TI-15.4 Stack CC1310 SimpleLink™ Embedded Example Applications — Quick Start (Rev. A)//<http://www.ti.com/lit/pdf/swru488>.
5. CC1310 SimpleLink™ TI-15.4 Stack 2.x.x Developer's Guide//<http://www.ti.com/lit/pdf/swru489>.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка — e-mail: wireless.vesti@compel.ru

TI-15.4-STACK
Беспроводная сеть в диапазоне 868 МГц

- В основе: CC1310
- До 50 узлов в сети топологии «звезда»
- Спящие устройства (beacon)
- Шифрование: AES-128

www.compel.ru

Виктор Чистяков (г. Малоярославец)

ОДНА АНТЕННА – ХОРОШО, А ДВЕ – ЛУЧШЕ



Технология **разнесенных в пространстве антенн** — лучший способ повышения достоверности передачи сигналов в **беспроводных сетях систем безопасности и контроля**. Примеры разработок компании **Texas Instruments** помогут реализовать эту технологию при построении таких сетей на базе **беспроводных микроконтроллеров CC13xx/CC26xx**.



В системах безопасности, контроля и охраны объектов особое значение имеет надежность и достоверность передачи сигналов тревоги с удаленных датчиков. Беспроводные системы зачастую вынуждены работать в условиях, затрудняющих прием радиосигналов. Охранные датчики иногда приходится размещать в неудачных с точки зрения приема радиосигналов местах, что вызывает особые проблемы при доставке тревожных сообщений.

При передаче радиосигнала от источника к приемнику могут возникать множественные отражения электромагнитных волн от встречающихся на пути их распространения препятствий, будь то стены, потолок, пол внутри помещений или деревья и проходящие по улице люди. В результате на антенну приемника приходят запаздывающие по фазе дополнительные сигналы, которые, складываясь с основным сигналом, могут вызывать его затухание, вплоть до полного пропадания.

Для борьбы с этим явлением используется технология с пространственно разнесенными антеннами (*Antenna Diversity*). Она позволяет в условиях нестабильного радиоприема повысить надежность радиосвязи и максимизировать для конкретной точки вероятность доставки пакетов данных.

Антенны, разнесенные в пространстве

Для реализации разнесенного приема компания **Texas Instruments (TI)** предлагает использовать дополнение (патч) к программному обеспечению для беспроводных МК **CC13xx/CC26xx**. Этот патч обеспечивает поочередное переключение двух антенн в процессе приема и передачи радиосигналов.

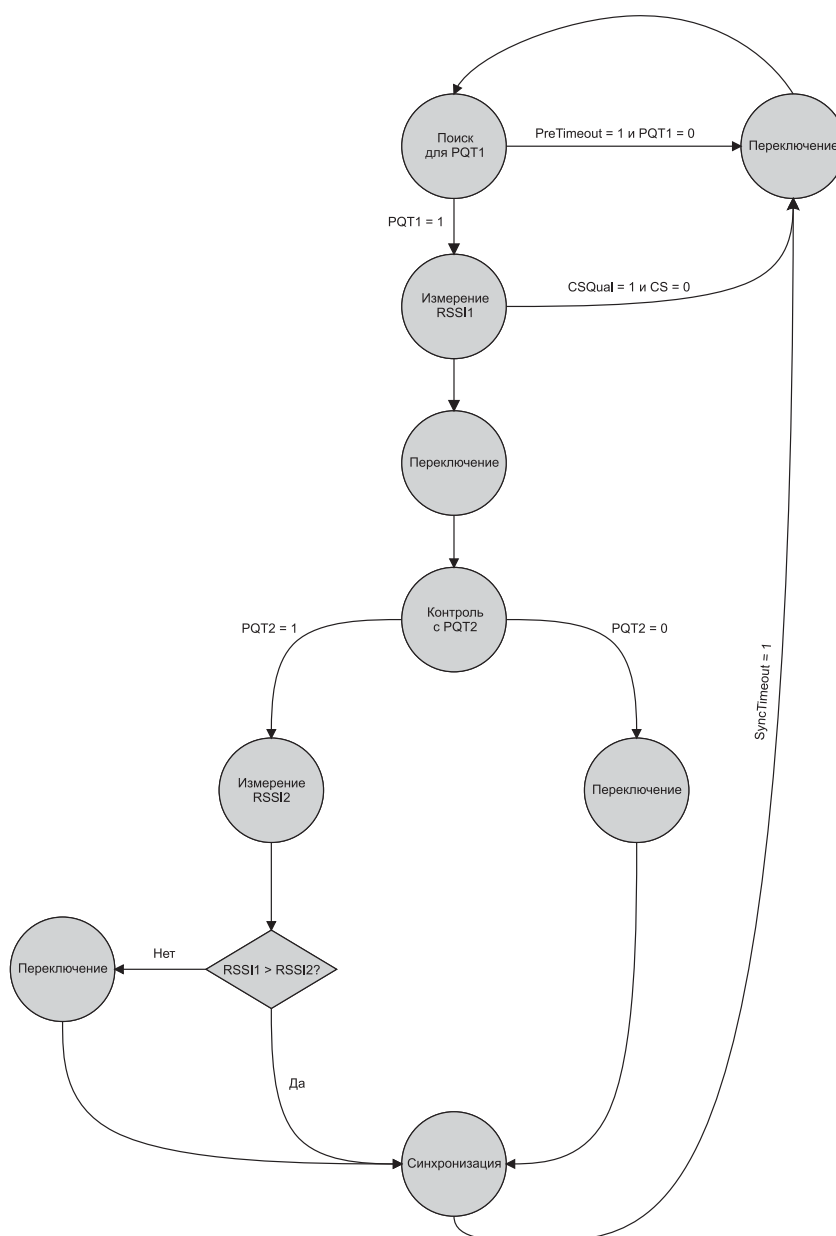


Рис. 1. Блок-схема работы разнесенных антенн

Программный алгоритм управления приемом от двух внешних антенн использует внутренний сигнал радиочастотного ядра (RFC_SMI_CL_OUT), который может быть направлен внутри чипа CC13xx на любой доступный цифровой вход/выход (DIO). Этот сигнал управляет внешней микросхемой высокочастотного коммутатора, который поочередно подключает одну или другую антенну.

Алгоритм действий основан на оценке качества принимаемого сигнала в сравнении с заданным уровнем — порогом качества преамбулы (Preamble Quality Threshold — PQT). Под преамбулой понимается заголовок пакета в виде последовательности нулей и единиц. Преамбула передается перед полезными данными пакета и имеет длительность от одного до нескольких десятков байт.

Переключение приемных антенн работает следующим образом: если преамбула не обнаружена с помощью первой антенны, происходит переключение внешнего коммутатора и повторный старт процедуры приема с помощью второй антенны. При обнаружении заголовка алгоритм переключает коммутатор и проверяет прием заголовка другой антенной. Если заголовки принимаются обеими антеннами, то выбирается антенна с более высоким уровнем сигнала (RSSI) и затем начинается поиск слова синхронизации. Если окажется, что преамбула принимается лишь с одной антенны — коммутатор переключается на нее и начинается процесс синхронизации. На рисунке 1 показана диаграмма последовательности состояний в этом процессе.

Для повышения надежности обнаружения преамбулы может быть использован опциональный дополнительный контроль уровня несущей. Эта функция может быть включена или выключена программно.

Порог чувствительности несущей (CS) установлен на уровне -111 дБм. При уровне шума выше -111 дБм реко-

мендуется увеличить порог CS, чтобы снизить вероятность обработки ложного пакета. Если МК будет занят обработкой ложных пакетов, есть вероятность потери ожидаемого пакета.

Если питание радиоядра не отключалось, то последняя используемая антенна будет автоматически использоваться при переходе в режим передачи. Это условие гарантирует передачу подтверждения с той же самой антенны, с помощью которой был принят последний пакет.

Автоматическая регулировка усиления

Алгоритм разнесенных антенн использует отдельную автоматическую регулировку усиления (APU) (Automatic Gain Control — AGC) (ANT_DIV AGC). Эта APU не используется при поиске заголовка. APU выполняет регулировку усиления тракта ВЧ только в процессе синхронизации (рисунок 1), а затем использует индикатор мощности принятого сигнала (RSSI) от выбранной антенны для расчета оптимального коэффициента усиления по ВЧ.

Изменить уровень сигнала, с которого APU начинает уменьшать усиление, можно путем программирования опорного уровня APU RSSI (AgcRssiRef) (таблица 1).

Система APU использует уровни измеренного и запрограммированного опорного RSSI для вычисления AGC_ERROR и оптимального уровня усиления, как показано в уравнении 1.

$$AGC_ERROR = RSSI - AgcRssiRef_dBm \quad (1)$$

Ограничения на формат пакета

Алгоритм разнесенных антенн обеспечивает расширенные возможности в отношении скорости передачи данных, но имеет ограничение, связанное с минимальной длиной заголовка. Уравнение 2 показывает расчет минимальной длины заголовка.

$$MinimumPreambleLength = 4 \times PreTimeout + 8[\text{символов}] \quad (2)$$

В наихудшем случае уровень принимаемого сигнала находится вблизи порога чувствительности.

Например, если первая антенна пропускает ожидаемую преамбулу, и уровень сигнала оказывается слишком низким для приема на вторую антенну, то на это уходит два временных интервала. Затем приемник обнаруживает преамбулу, после чего необходимо опять проверить прием с второй антенны. Данный случай с потерей четырех временных слотов является наихудшим вариантом. Кроме того, необходимо учесть и внутреннюю аппаратную задержку на обработку и переключение режимов в самом чипе.

Таким образом, для установки по умолчанию с PreTimeout = 10 символов, минимальная длина заголовка составит 1 байт.

Из-за того, что APU не работает во время переключения между антеннами, алгоритм может не выбрать антенну с наиболее высоким RSSI, если оба сигнала антенны имеют уровень более примерно -50 дБм. Это не является проблемой, так как при таком сильном сигнале выбор антенны не играет существенной роли.

Настройка регистров

Для настройки регистров используется программа SmartRF Studio. Однако при использовании патча (antenna diversity patch) необходимо удалить из Studio Code Export три регистра и один добавить. Удаляются регистры HW_REG_OVERRIDE(0x6084, 0xFFFF), HW_REG_OVERRIDE(0x6088, 0xFFFF) и HW_REG_OVERRIDE(0x608C, 0xFFFF). Добавляется регистр MCE_RFE_OVERRIDE(1, 0, 0, 1, 0, 0).

Регистры конфигурации

В патче для разнесенных антенн доступны следующие регистры конфигурации (таблица 1).

Содержимое регистров можно изменить с помощью специальной функции By static overrides в следующем

Таблица 1. Регистры конфигурации

Регистр	Биты	Обозначение	Описание	По умолчанию
0x4004 52B0	15...8	PreTimeout	PreTimeout_bits = PreTimeout + 8	0x02
	7...0	SyncTimeout	SyncTimeout_bits = SyncBits + PreamBits + SyncTimeout - 31	0x18
0x4004 52B4	15	NA	Не используется	0x00
	14	CsQual	Контроль уровня несущей заголовка	0x01
	13...12	NA	Не используется	0x00
	11...8	PreLen	Количество бит заголовка для корреляции: PreLen_bits = PreLen + 1	0x07
	7...0	PreThr	Порог корреляции заголовка	0x0B
0x4004 6088	15...0	AgcRssiRef	Опорный уровень APU RSSI для регулировки усиления: AgcRssiRef_dBm = AgcRssiRef - 216 [dBm]	0xFFA6
0x4004 6090	15...8	Reserved	Резерв	0x0A
	7...0	CS_THR	Порог контроля несущей: CS_THR_dBm = CS_THR - 256 [dBm]	0x91

Таблица 2. Регистры статуса

Регистр	Биты	Обозначение	Описание	По умолчанию
0x4004 5178	15...0	AntSelect	Выбор антенны TX и RX: 0 – Антенна 0; 1 – Антенна 1	0x00
0x4004 517C	15...8	RSSI1	RSSI антенны 1	0x00
	7...0	RSSI0	RSSI антенны 0	0x00
0x4004 51C8	11...0	AntSelect0Cnt	Счетчик выбранной антенны 0	0x00
0x4004 51CC	11...0	AntSelect1Cnt	Счетчик выбранной антенны 1	0x00

формате: `HW_REG_OVERRIDE(0xXXXX, 0xYYYY)`,

где:

- XXXX – значение двух последних значащих байтов адреса регистра (52B0, 52B4, 6088 или 6090);

- YYYY – значение для записи.

Например, следующая запись в регистр устанавливает порог CS -111 дБм: `HW_REG_OVERRIDE(0x6090, 0x0A91)`.

Регистры статуса

В патче для разнесенных антенн доступны перечисленные в таблице 2 регистры статуса.

В режиме TX AntSelect выбирает антенну, которая использована для передачи. Регистры конфигурации не запоминаются, поэтому после отключения и повторного включения питания РЧ-ядра необходимо обновлять регистр AntSelect. Процессор **ARM Cortex-M3** должен прочитать и запомнить значение регистра перед выключением питания РЧ-ядра для того чтобы записать его снова перед переходом в режим TX.

Регистры могут быть прочитаны посредством команды `CMD_READ_RFREG` и переопределены с помощью команды `CMD_PROP_RADIO_DIV_SETUP`.

Пример программы

Использование патча прозрачно для пользовательского приложения при корректных настройках и применении для управления антенным ключом сигнала `RFC_SMI_CL_OUT` на одном из цифровых выводов процессора.

Пример простого приложения приема пакетов `rfPacketRX` доступен после загрузки операционной системы TI-RTOS для CC13xx и CC26xx. После загрузки и установки TI-RTOS в папку по умолчанию `C:\ti\tirtos_cc13xx_cc26xx_x_xx_xx_xx\docs` вы найдете там, собственно, примеры приложений для разных сред разработки и руководство `Getting Started_Guide_cc13xx_cc26xx`. Чтобы использовать пример `rfPacketRX` в режиме работы с разнесенными антеннами, необходимо выполнить следующие шаги.

- Файл `smartrf_settings.c` должен быть заменен скачанным с <http://www.ti.com/lit/pdf/SWRC325>.

Патчи `rf_patch_mce_genfsk_ant_div_pqt.h` и `rf_patch_rfe_genfsk_ant`

`div.h` должны быть сохранены в той же самой папке, где находится `smartrf_settings.c`.

- Должны быть добавлены следующие определения:

```
#define IOC_PORT_RFC_SMI_CL_OUT 0x37
#define ANTENNA_SELECT IOID_X//Added if the switch requires two control signals
```

```
#define ANTENNA_SELECT_INV IOID_Y
```

- Сигналы ANTENNA_SELECT и опциональный ANTENNA_SELECT_INV должны быть добавлены в `pinTable`:

```
PIN_Config pinTable[] =
{
    Board_LED1|PIN_GPIO_OUTPUT_EN|PIN_GPIO_LOW|PIN_PUSHPULL| I N _
    DRVSTR_MAX,
    ANTENNA_SELECT|PIN_GPIO_OUTPUT_EN|PIN_GPIO_LOW|PIN_PUSHPULL|PIN_
    DRVSTR_MAX,
    ANTENNA_SELECT_INV|PIN_GPIO_OUTPUT_EN|PIN_GPIO_LOW|PIN_
    PUSHPULL|PIN_DRVSTR_MAX|PIN_INV_INOUT,
    PIN_TERMINATE
};
```

- Перед запуском BIOS в функцию `int main(void)` добавляются следующие строки:

```
PINCC26XX_setMux(pinHandle, PIN_ID(ANTENNA_SELECT),
PINCC26XX_MUX_RFC_SMI_CL_OUT);
PINCC26XX_setMux(pinHandle, PIN_ID(ANTENNA_SELECT_INV), PINCC26XX_
MUX_RFC_SMI_CL_OUT);
```

Они позволяют вывести сигнал `RFC_SMI_CL_OUT` на предусмотренные цифровые выходы контроллера (ANTENNA_SELECT и ANTENNA_SELECT_INV).

Использованный для передачи экран SmartRF Studio с настройкой 50 кбит/с и длиной заголовка в 6 байт представлен на рисунке 2.

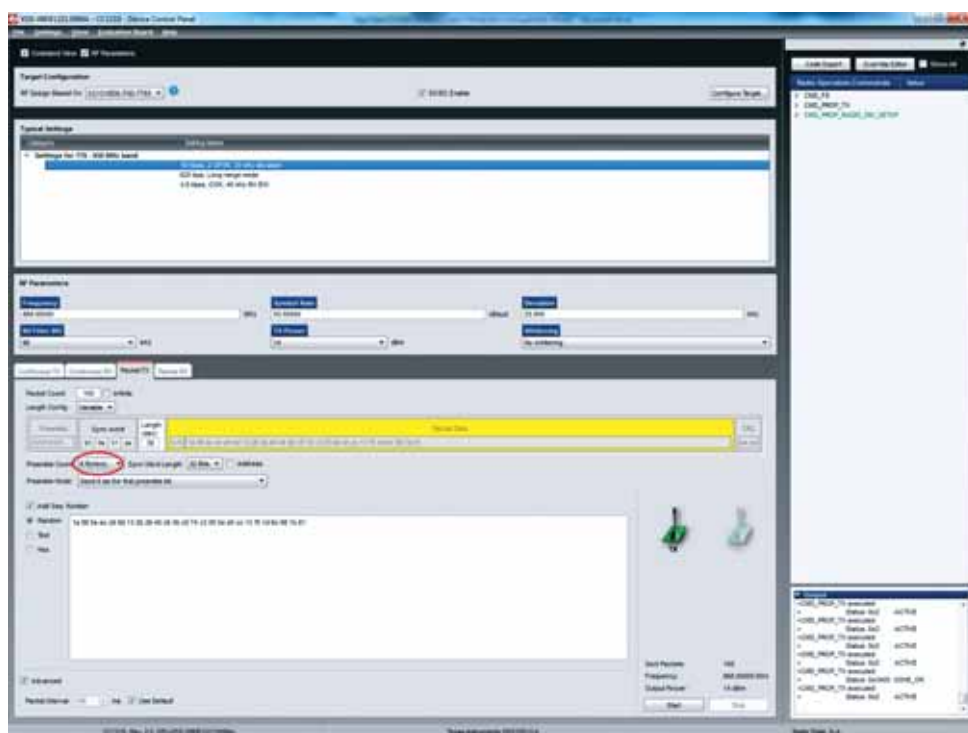


Рис. 2. Настройка SmartRF Studio для передачи

Результаты измерений

При тестировании разнесенных антенн использовались следующие параметры:

- модуляция: 2-GFSK;
- скорость передачи данных: 50 кбит/с, девиация ± 25 кГц;

- диапазон: 868 МГц;
- преамбула длительностью или 8 байт;
- 4-битное слово синхронизации: 0x930B 51DE;
- порог контроля несущей (CS), установленный в значение -111 дБм.

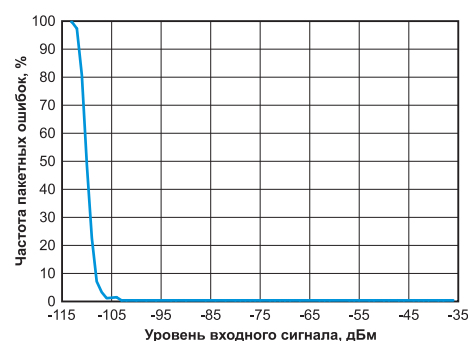


Рис. 3. Зависимость PER от уровня входного сигнала при 6-битном заголовке

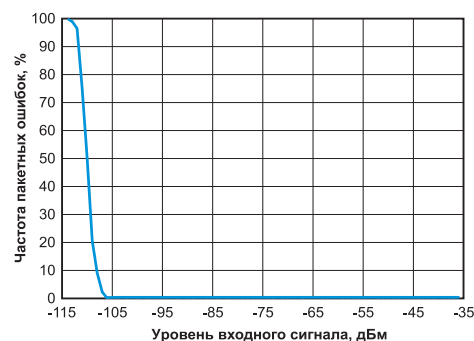


Рис. 4. Зависимость PER от уровня входного сигнала при 8-битном заголовке

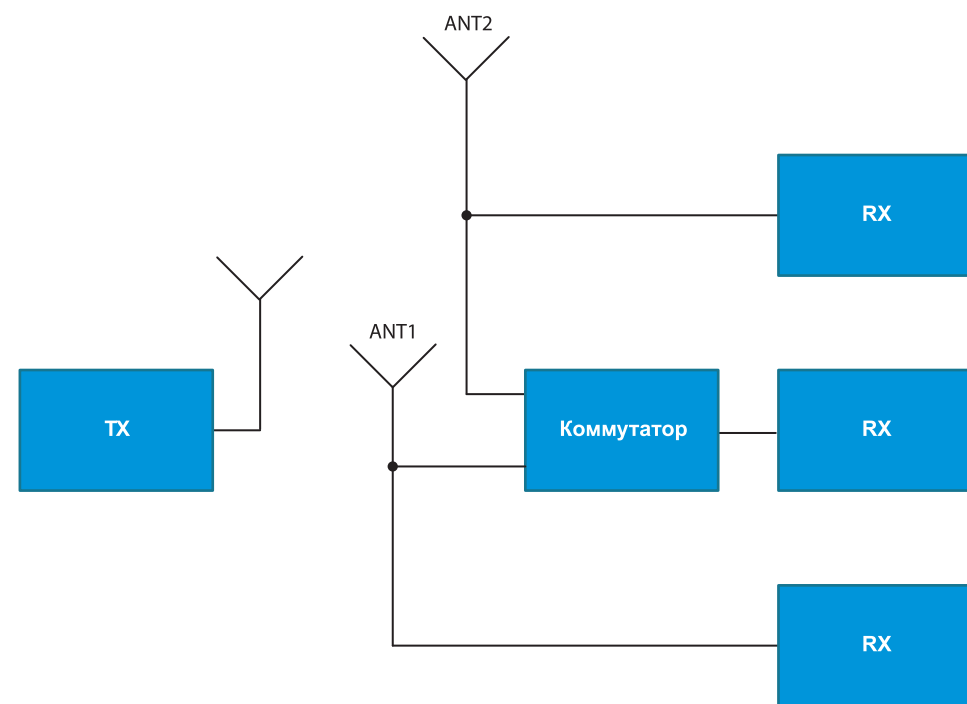


Рис. 5. Блок-схема комплекта для тестирования разнесенных антенн

Таблица 3. PER для использующих разные антенны приемников в тесте 1

Антенна	Принятые пакеты	Переданные пакеты	PER, %
ANT1	2647	3000	11,8
ANT2	2078	3000	30,7
DIV	2672	3000	10,9

Таблица 4. PER для использующих разные антенны приемников в тесте 2

Антенна	Принятые пакеты	Переданные пакеты	PER, %
ANT1	632	3000	78,9
ANT2	2696	3000	10,1
DIV	2751	3000	8,3

Чувствительность

Для заголовков в 6 и 8 байт типичная чувствительность составила -109 дБм при 1% BER (частота ошибок приема битов), что соответствовало 20% PER (частота ошибочного приема пакетов), при 3-байтной полезной нагрузке пакета.

Частота пакетных ошибок (PER) в зависимости от уровня входной мощности

На рисунке 3 представлена зависимость PER от входного уровня при 6-битном заголовке и с аттенуатором в 6 дБ на антенне.

На рисунке 4 представлена зависимость PER от входного уровня при 8-битном заголовке и с аттенуатором в 6 дБ на антенне.

Результаты тестирования антенн

Использованный комплект оборудования позволил оценить надежность приема от двух разнесенных антенн в сравнении с одиночными антеннами в одно и то же время в аналогичных условиях затухания сигнала.

В процессе тестирования использовались:

- один передатчик;
- три приемника;
- две антенны (ANT1 и ANT2).

Все три приемника находились в режиме приема в одно и то же время. На рисунке 5 представлена блок-схема комплекта тестового оборудования.

Одно устройство **CC1310EM** используется в качестве передатчика. Два приемника **CC1310EM** подключены к ANT1 и ANT2 напрямую, через соответствующий сплиттер, а третий — к обеим антеннам через коммутатор и сплиттеры. Он использует в работе патч разнесенных антенн (DIV).

Штыревые антенны были размещены под прямым углом друг к другу. Точки подключения антенн размещены на расстоянии в четверть волны друг от друга (рисунок 6).

Для выбора соответствующей антенны через коммутатор используются сигналы, формируемые на двух цифровых выходах **CC1310**.

Настройка ПО

Для работы патча разнесенных антенн в составе тестового комплекта нужно модифицировать пример `rfPacketRx` как описано выше. Кроме того, нужно сделать проверку в функции обратного вызова после процедуры приема, чтобы определить, от какой именно антенны был получен пакет. Эта проверка происходит при чтении `AntSelect` из регистра `0x4004 5178` (таблица 2).

Для чтения регистра и отслеживания количества пакетов, принятых от каждой антенны, был использован следующий код:

```
RF_Stat status = RF_runImmediateCmd(rfHandle, (uint32_t*)&RF_
cmdReadRfRegAntenna); if (((uint8_t)(RF_cmdReadRfRegAntenna.value))
& 0x01)
{
    antenna1++;
}
else
{
    antenna0++;
}
//RF_cmdReadRfRegAntenna was configured as follows: rfc_CMD_READ_
RFREG_t RF_cmdReadRfRegAntenna =
{
    .commandNo = 0x0601,
    .address = 0x5178,
};
```

`Antselect` читается вместо `Antselect0Cnt` и `Antselect1Cnt`, потому что во время тестирования мы заинтересованы только в выбранной антенне для принятых пакетов (`Antselect0Cnt` и `Antselect1Cnt` будет включать выбор антенны в тех случаях, когда пакеты отбрасываются из-за ошибок CRC).

Тест 1

Плата передатчика была жестко закреплена на нижнем этаже офиса TI в Осло. Плата с приемниками была размещена этажом выше, так что стены и перекрытия находились на пути распространения сигнала. Сотрудники офиса представляли собой движущиеся препятствия для радиоволн. На плате передатчика использовался аттенюатор на 60 дБ, размещенный между разъемом SMA на CC1310EM и антенной. Передаваемый уровень мощности составил 14 дБм — 60 дБ = -46 дБм.

В таблице 3 представлены пакетные ошибки приемников при использовании разных антенн в тесте 1.

Использующий две антенны (DIV) и подключенный к ANT1 приемники имели примерно одинаковую частоту ошибочно принятых пакетов. У подключенного к ANT2 приемника параметр PER был выше.

Тест 2

Условия в тесте 2 отличались лишь тем, что плата с антеннами была повернута на 90°. Соответствующий этому случаю параметр PER представлен в таблице 4.

Использующий технологию разнесенных антенн приемник, а также подключенный ко 2-й антенне приемник имели почти одинаковые значения PER. Тогда как у подключенного к 1-й антенне приемника PER значительно вырос.

Тест 3

В тесте 3 использованы условия предыдущего теста, но передатчик работает с тремя разными уровнями выходной мощности. С увеличением излучаемой антенной

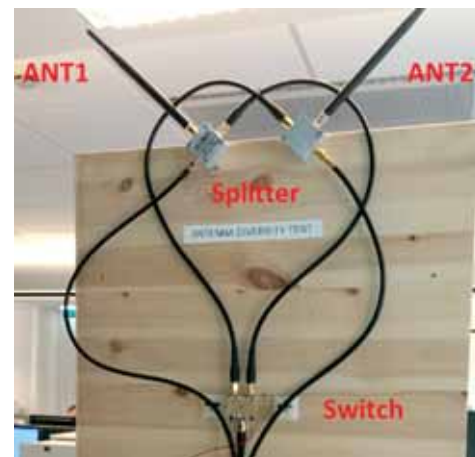


Рис. 6. Комплект разнесенных антенн

мощности PER приемников с одиночными антеннами приближается к величине PER приемника, использующего технологию двух разнесенных антенн. В таблице 5 представлены PER для теста 3.

В этом случае приемнику с одиночной антенной ANT1 потребовалась увеличенная на 4 дБ мощность сигнала, чтобы достичь уровня PER использующего две антенны приемника (-38 дБм против -42 дБм).

Тест 4

В 4-м тесте плата приемников была жестко закреплена, а плата передатчика перемещалась в пределах офиса. В таблице 6 представлены PER для теста 4.

Использующий две антенны приемник (DIV) и в этом случае имеет меньшую PER в сравнении с приемниками, использующими одиночные антенны.

Антенны CC-Antenna-DK2

Упростить выбор подходящей антенны и оценить ее эффективность позволяет выпускаемый компанией TI комплект **CC-Antenna-DK2** (рисунок 7). Печатная плата размером с лист формата A4 содержит 16 отдельных плат, 13 антенн и 3 платы для калибровки. Антенны распределены по рабочим частотам 169, 433, 868 МГц и 2,44 ГГц и настроены индивидуально.

Таблица 5. PER для использующих разные антенны приемников в тесте 3

Антенна	Выходная мощность, дБм	Принятые пакеты	Переданные пакеты	PER, %
ANT1	-46	632	3000	78,9
	-42	1551	2000	22,5
	-38	1971	2000	1,5
ANT2	-46	2696	3000	10,1
	-42	1900	2000	5
	-38	1983	2000	0,8
DIV	-46	2751	3000	8,3
	-42	1944	2000	2,8
	-38	1999	2000	0

Таблица 6. PER для использующих разные антенны приемников в тесте 4

Антенна	Принятые пакеты	Переданные пакеты	PER, %
ANT1	2055	3000	31,5
ANT2	2114	3000	29,5
DIV	2403	3000	19,9

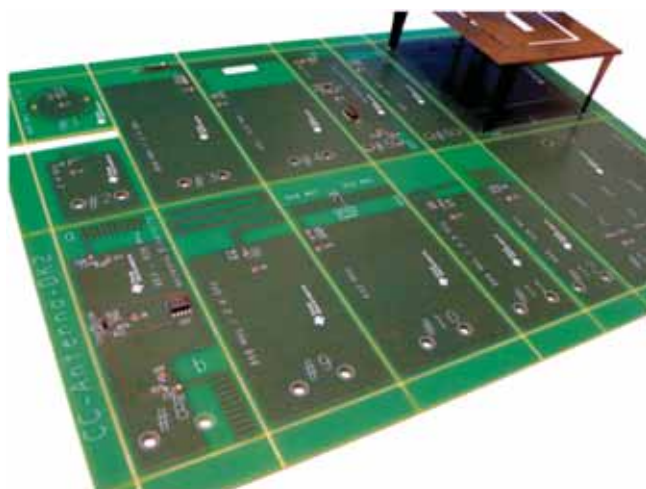


Рис. 7. Плата CC-Antenna-DK2

Плата №5: разнесенные антенны на 2,4 ГГц

Средняя суммарная мощность, измеренная с помощью антенны 5A составляет -3,3 дБм. Средняя мощность, измеренная с антенной 5B составляет -3,4 дБм. При переключении максимальной мощности между двумя антеннами средняя мощность будет увеличена до -2,2 дБм. Таким образом есть лишь небольшое увеличение с 1,1 дБ до 1,2 дБ в излучаемой мощности через разнесенные антенны (рисунок 8).

Плата №8: разнесенные антенны на 868/915/920 МГц

Средняя суммарная мощность, измеренная с антенной 8A составляет -2,8 дБм.

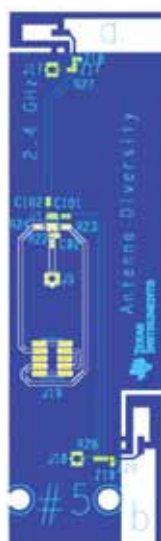


Рис. 8. Плата №5: разнесенные антенны 2,4 ГГц

Средняя мощность, измеренная с антенной 8B составляет -4,9 дБм. При переключении максимальной мощности между двумя антеннами средняя мощность будет увеличена до -2,4 дБм. Таким образом есть лишь небольшое увеличение с 0,4 до 2,5 дБ в излучаемой мощности через разнесенные антенны (рисунок 9).

Разнесенные антенны №5 и №8 имеют главное преимущество для приема электромагнитного сигнала в среде с многолучевым распространением, где возможен провал до 15 дБ в пределах квадратного метра площади. Предел чувствительности, указанный в технических характеристиках, будет уменьшен на величину, определяемую размером затухания при многолучевом распространении сигнала.

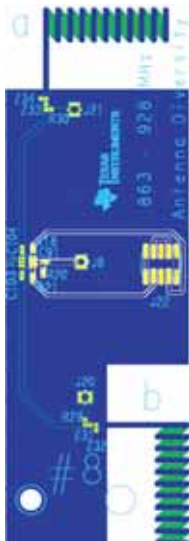


Рис. 9. Плата №8: разнесенные антенны 868/915/920 МГц

Разнесенные антенны не приведут к повышению абсолютного уровня чувствительности радиоприема, но повысят чувствительность при попадании устройства в зону замирания радиосигнала при многолучевом распространении.

Беспроводные МК CC13XX/CC26XX

Компания Texas Instruments выпускает беспроводные МК CC13xx/CC26xx на базе платформы SimpleLink (рисунок 10). Они включают вычислительное ядро Cortex-M3, универсальный приемопередатчик для диапазонов 433/868/2400 МГц и энергоэффективный контроллер для работы с датчиками.

Мощный процессор и программно-конфигурируемый радиомодуль впервые позволили создать универсальную микросхему с поддержкой ZigBee, Bluetooth Low Energy, 6LoWPAN, RF4CE и других сетевых протоколов. В то же время приемопередатчик в составе CC13xx/CC26xx способен обмениваться пакетами данных в режиме "Proprietary" как с другими трансиверами TI (CC110L, CC1120, CC430, CC25xx и другими), так и с радиочастотными микросхемами других производителей.

МК CC13XX/CC26XX позволяют создавать беспроводные устройства с чрезвычайно низким потреблением тока — 6,2 мА в режиме приема, 0,95 мА в режиме Sniff, и 6,1 мА в режиме передачи при выходной мощности 0 дБм.

Основные преимущества беспроводных МК CC13xx/CC26xx:

- экономичное ядро Cortex-M3 для пользовательских приложений;
- программно-конфигурируемый радиомодуль на базе ядра Cortex-M0;
- поддержка протоколов 802.15.4, ZigBee, BLE, 6LoWPAN, RF4CE;
- универсальный приемопередатчик для диапазонов 433/868/2400 МГц;
- экономичный RISC-контроллер для работы с датчиками;
- расширенный набор стандартных интерфейсов (GPIO, UART, SPI, I²C, I²S), АЦП 12 бит;
- аналоговая периферия: ОУ, компаратор, источник тока;
- расширенный диапазон питания: 1,8...3,8 В;
- аппаратное шифрование AES-128;
- объем памяти: 128 кбайт Flash, 20 кбайт RAM;
- несколько типов корпусов QFN с размерами 4x4...7x7 мм (с разным количеством портов GPIO).

Отличающиеся сверхмалым потреблением энергии беспроводные МК семейств CC26xx и CC13xx на базе платформы SimpleLink наилучшим образом подходят для использования в системах безопасности также благодаря универсальности и поддержке целого ряда стандартов и протоколов беспроводной

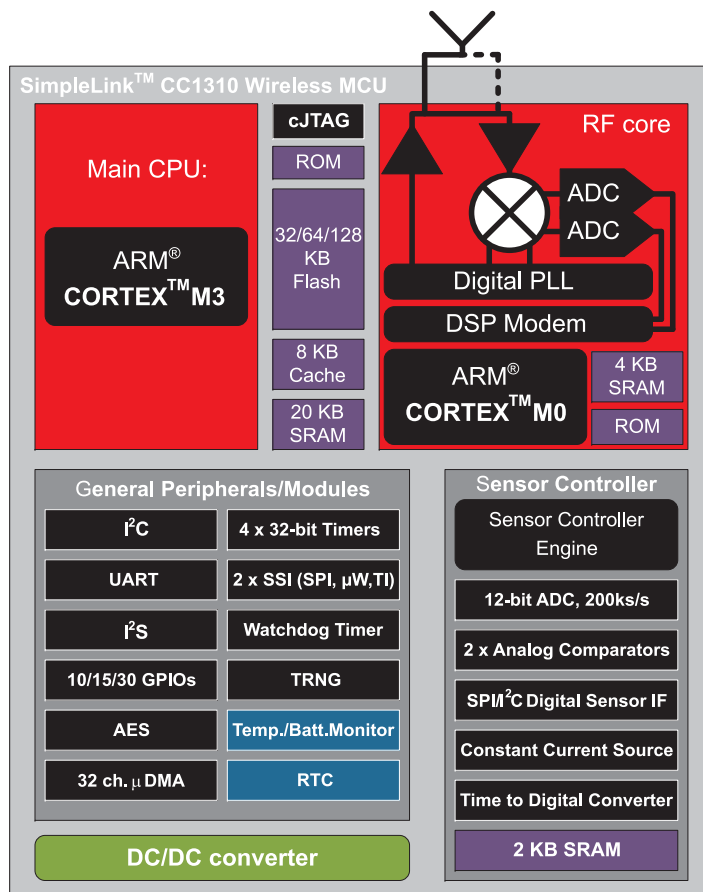


Рис. 10. Блок-схема CC26xx и CC13xx

связи. Они легко найдут применение в домашней электронике, аксессуарах для мобильной связи, устройствах для спорта и фитнеса, в медицинских приборах и многих других приложениях.

Заключение

В обширном ассортименте продукции компании TI предусмотрены все аппаратные и программные компоненты, необходимые для создания высоконадежных сетей. В условиях, затрудняющих распространение радиоволн, технология разнесенных антенн позволяет повысить достоверность принимаемых пакетов данных.

Результаты измерений, выполненных с использованием приемников на базе CC13xxEM, свидетельствуют об эффективности использования методики разнесенных антенн.

Литература

1. <http://www.ti.com/lit/an/swra523/swra523.pdf>.
2. <http://www.ti.com/lit/an/swra496/swra496.pdf>.

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка –
e-mail: wireless.vesti@compel.ru



Первый в мире микроконтроллер с двухдиапазонным радио 868/2400 МГц CC1350



- Производительное ядро ARM Cortex-M3, 48 МГц, 128 кбайт Flash, 20+8 кбайт SRAM
- Простое сопряжение с усилителями CC1190 и CC2592
- Потребление RX: 5,4 мА (868 МГц); 6,4 мА (BLE, 2,4 ГГц)

- Считывание АЦП 12 бит один раз в секунду: 0,95 мА
- 4 таймера, АЦП 12 бит, 2 компаратора, источник тока, UART, 2 x SPI, I²C, I²S, RTC, AES-128, TRNG, датчик температуры

Поддержка разработчиков:
E-mail: ti@compel.ru
www.compel.ru/projects-support

Компэл
www.compel.ru

Вячеслав Гавриков (г. Смоленск)

ДЕЙСТВУЯ НА РАССТОЯНИИ: МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ TI С БЕСПРОВОДНЫМИ МОДУЛЯМИ



Разнообразные беспроводные устройства выдвигают различные требования к применяемому радиоканалу. В одних случаях требуется максимальная скорость передачи данных, в других ключевым параметром становятся дальность связи или уровень потребления. По этой причине можно наблюдать существование целого ряда различных технологий, например, **ZigBee**, **Wi-Fi**, **Bluetooth** и других. Компания **Texas Instruments** предлагает широкий выбор решений для наиболее популярных беспроводных технологий, в том числе — уникальные микроконтроллеры семейств **CC3xx**, **CC2xx**, **CC1xx**, **CC430** и **RF430** со встроенными модулями радиопередатчиков. С их помощью удастся максимально упростить процесс разработки и значительно сократить время вывода новых устройств на рынок.



Если среди разработчиков провести опрос о том, какими свойствами, по их мнению, должен обладать идеальный беспроводной канал связи, то наиболее популярными ответами наверняка станут высокая пропускная способность, максимальный радиус действия, малое потребление, высокий уровень безопасности, привлекательная стоимость и простота реализации. К сожалению, объединить все перечисленные качества в одной технологии не получается. Например, **Wi-Fi** характеризуется отличной скоростью передачи, но имеет значительное потребление.

Еще одним недостатком большинства высокоскоростных технологий является высокая сложность реализации. При этом речь идет не только о создании аппаратной части, но и о написании программного обеспечения, в том числе — коммуникационных протоколов. Многие производители электронных компонентов и микросхем стремятся упростить жизнь разработчиков и предлагают различные готовые решения. Так, один из лидеров отрасли — компания **Texas Instruments** — выпускает сразу несколько семейств микроконтроллеров со встроенным радиомодулем [1, 2]:

- **CC3xx** — для скоростных, защищенных и малопотребляющих **Wi-Fi**-приложений;
- **CC2xx** — для пользовательских решений и популярных технологий с частотами 2,4 ГГц (**Bluetooth**, **BLE**, **ZigBee**, **ZigBee RF4CE**, **6LoWPAN** и других);

- **CC1xx** — для устройств с беспроводным радиоканалом субгигагерцевого диапазона <1 ГГц (пользовательские решения, **IEEE 802.15.4g**, **6LoWPAN**, **WM-Bus**);

- **CC430** — для малопотребляющих пользовательских решений субгигагерцевого диапазона <1 ГГц;

- **RF430** — для **NFC**-решений.

Рассмотрим наиболее популярные технологии беспроводной передачи данных, а также — краткую характеристику микроконтроллеров со встроенными радиомодулями производства **Texas Instruments**.

Обзор беспроводных технологий: разные цели — разные решения

В современных беспроводных приложениях к каналу передачи данных предъявляются такие требования как:

- поддержка одной из популярных топологий сети («точка-точка», «звезда», «дерево», ячеистая топология);

- высокая пропускная способность до десятков Мбит/с;
- максимальный радиус действия от нескольких сантиметров (**NFC**) до нескольких километров (проприетарные протоколы **Sub1GHz**);
- малое потребление (от десятков миллиампер в активном режиме до десятых долей микроампер в режиме сна);
- высокий уровень безопасности (поддержка шифрования, функций хеширования, протоколов аутентификации и так далее);
- конкурентная цена (минимальное количество и стоимость компонентов);
- малые габариты (особенно важно для портативных приложений);
- простота реализации аппаратной и программной частей.

Большинство требований из вышеприведенного списка противоречит друг другу. По этой причине сейчас применяются различные беспроводные технологии, каждая из которых является оптимальной для конкретного приложения или устройства.

Wi-Fi — наиболее скоростная беспроводная технология с пропускной способностью до 54 Мбит/с. Базируется на стандартах **IEEE 802.11a**, **802.11b**, **802.11g** и **802.11n** и использует радиока-

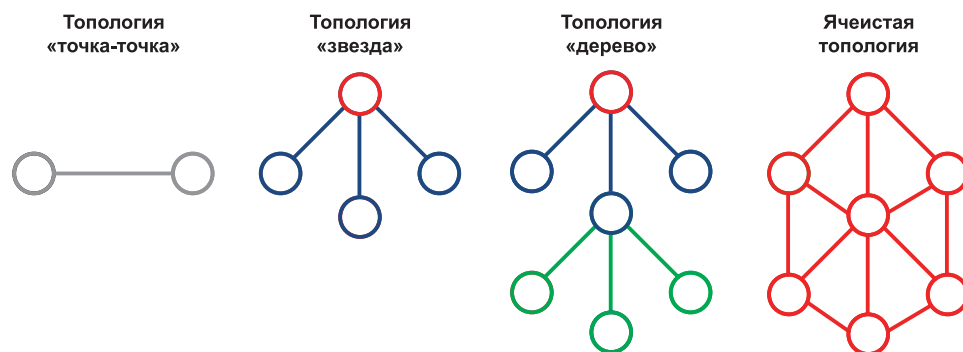


Рис. 1. Топологии беспроводных систем

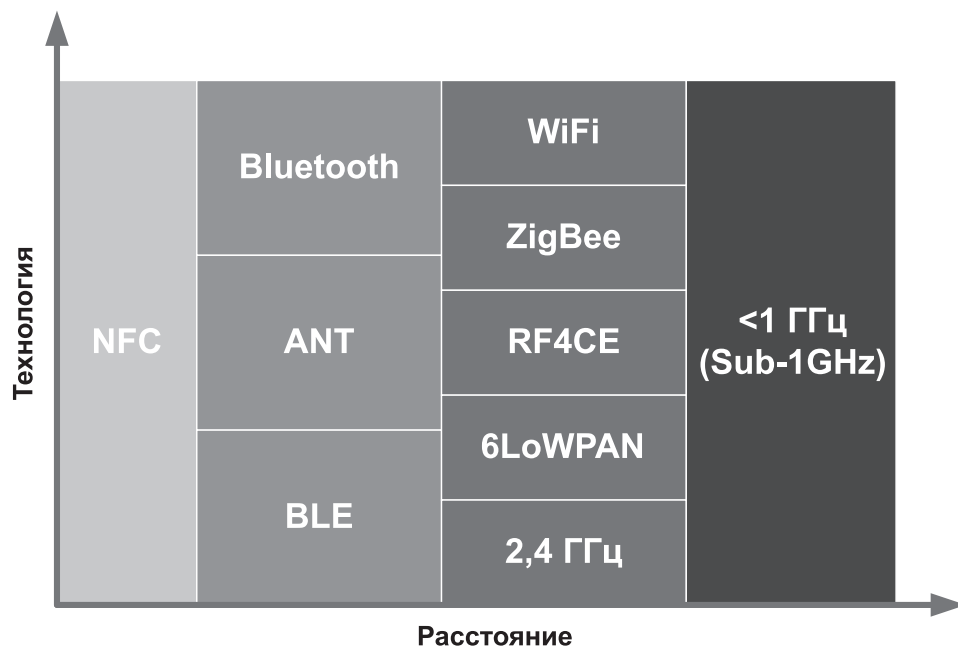


Рис. 2. Сравнение дальности действия современных беспроводных технологий

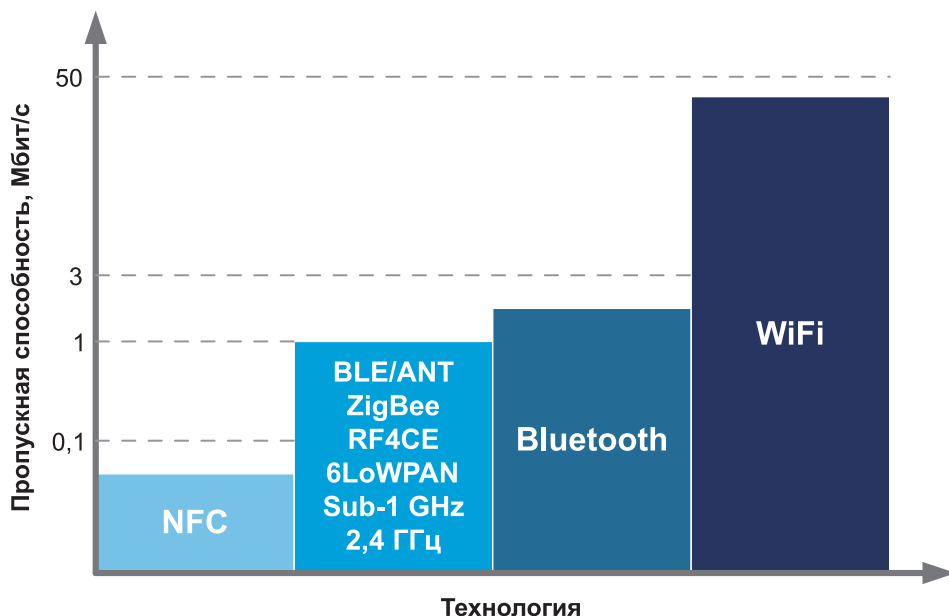


Рис. 3. Пропускная способность современных беспроводных технологий

нал 2,4 ГГц и/или 5 ГГц. Wi-Fi применяется в широком спектре приложений, таких как медицинские приборы (системы мониторинга, диагностические установки и так далее), потребительская электроника (планшеты, смартфоны и прочее), промышленная и домашняя автоматика, системы безопасности, видеонаблюдение и тому подобное.

ZigBee — стандарт, применяемый для создания ячеистых сетей малопотребляющих устройств и датчиков. Использует рабочую частоту радиосигнала 2,4 ГГц. ZigBee широко распространен в системах автоматизации в промышленности, медицине, логистике, системах учета потребления энергии и так далее.

ZigBee RF4CE — низкоскоростной малопотребляющий и упрощенный вариант ZigBee. Устройства RF4CE не поддерживают весь функционал, обязательный для узлов ZigBee. С одной стороны это позволяет использовать более простые контроллеры, а с другой — добиваться минимального потребления. RF4CE — идеальная альтернатива инфракрасным системам управления бытовой техникой. Если для ИК-канала необходима прямая видимость, то радиоканал RF4CE позволит включать приборы даже из соседней комнаты. Частотный диапазон сигнала остается тем же, что и у ZigBee — 2,4 ГГц.

6LoWPAN — технология для создания ячеистых сетей, в которых каждый

узел имеет свой адрес IPv6, что позволяет ему напрямую подключаться к сети Интернет. 6LoWPAN работает совместно с протоколом IEEE 802.15.4 и может быть реализован в полосах частот 1 ГГц и 2,4 ГГц. Области применения 6LoWPAN схожи с областями применения ZigBee.

Bluetooth — одна из наиболее популярных технологий для связи устройств, расположенных на небольших расстояниях вплоть до нескольких сотен метров. Bluetooth позволяет работать как в режиме «точка-точка», так и в режиме «звезда». Тем не менее, этот стандарт чаще всего используется для обмена информацией между двумя устройствами. Для передачи используется диапазон 2,4...2,485 ГГц. Bluetooth применяется в портативной электронике («умные часы», смартфоны и прочее), в датчиках, бытовой электронике, медицинских приборах и так далее.

Bluetooth low energy (BLE) — версия Bluetooth, нацеленная на получение минимального уровня потребления. Между устройствами BLE не устанавливается постоянное соединение, что позволяет активно использовать спящие режимы. В результате приборы могут более года работать в автономном режиме без замены элемента питания (аккумулятора или батарейки). Такие решения востребованы в спортивном инвентаре (тренажеры, беговые дорожки и так далее), медицине.

Near Field Communication (NFC) — беспроводная технология, которая работает на расстоянии до нескольких сантиметров. В NFC используется сигнал 13,56 МГц. Обмен данными происходит между двумя устройствами: инициатором (считывателем) и целью (транспондером). При этом инициатор способен не только передавать и получать данные, но и обеспечивать питание транспондера. По этой причине пассивные NFC-устройства вообще не содержат элемента питания.

Пользовательские радиоканалы. Несмотря на наличие готовых технологий, очень часто разработчики создают собственные протоколы связи, для этого используются открытые радиоканалы субгигагерцевого диапазона и диапазона 2,4 ГГц.

Таким образом, на первом этапе создания беспроводного устройства у разработчиков в распоряжении есть два списка: список требований и список доступных беспроводных технологий. Как правило, именно выбор технологии и определяет дальнейший ход всего процесса разработки. Чтобы подобрать оптимальное решение, следует определиться с базовыми параметрами: топологией сети, радиусом действия, скоростью передачи данных и уровнем потребления [1].

Таблица 1. Микроконтроллеры Texas Instruments с беспроводными модулями

Наименование	Ядро	Стандарт	Базовая частота, МГц	Пропускная способность, кбит/с	Безопасность
CC3200	ARM Cortex-M4	Wi-Fi, IEEE 802.11, b/g	2400	20000	AES, DES и 3 DES, SHA2 и MD5, CRD и CRC
CC2620	ARM Cortex-M3	ZigBee RF4CE	2400	250	128-битный AES
CC2630	ARM Cortex-M3	ZigBee, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	2400	250	128-битный AES
CC2640	ARM Cortex-M3	Bluetooth Smart (BLE)	2400	—	128-битный AES
CC2650	ARM Cortex-M3	Bluetooth Smart (BLE), ZigBee, ZigBee RF4CE, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	2400	5000	128-битный AES
CC2540, CC2540T, CC2541, CC2541-Q1	8051	Bluetooth Smart (BLE)	2400	1000	128-битный AES
CC2543, CC2544, CC2545	8051	Пользовательский 2,4 ГГц	2400	2000	128-битный AES
CC2538	ARM Cortex-M3	ZigBee, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	2400	250	AES128/ 256, SHA2, ECC 128/ 256, RSA
CC2530, CC2531	8051	ZigBee, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	2400	250	128-битный AES
CC2533	8051	2.4-GHz IEEE 802.15.4, ZigBee	2400	250	128-битный AES
CC1110, CC1111	ARM Cortex-M3	Пользовательский (Sub 1GHz)	300-346, 391-464, 782-928	—	128-битный AES
CC1310	8051	IEEE 802.15.4g, 6LoWPAN, wM-Bus	315, 433, 470, 500, 779, 868, 915, 920	—	128-битный AES
RF430CL33xH	MSP430	NFC: ISO/IEC 14443B, NFC Tag Type 4B	13,56	848	—
RF430FRL15xH	MSP430	NFC: ISO/IEC 15693	13,56	6,6; 26,5	—
RF430F5978	MSP430	Пользовательский (Sub 1GHz) и НЧ	0,1342, 315, 433, 779, 868, 915, 920	500	AES
CC430Fxx	MSP430	Пользовательский (Sub 1GHz)	315, 433, 779, 868, 915, 920	500	AES

Для начала необходимо выбрать топологию соединений (рисунок 1). Принципиальное отличие многоузловых сетей заключается в наличии или отсутствии мастера/ведущего. Мастер необходим в соединениях типа «звезда» и «дерево». Он единолично определяет, с каким из ведомых устройств производить обмен данными. В ячеистых топологиях все узлы имеют равные права.

Все перечисленные выше технологии способны работать по схеме «точка-точка» [1]. Если требуется создать сеть датчиков, то логично использовать топологию типа «звезда». Для промышленных сетей больше подойдет ячеистая топология (например, ZigBee), так как возможность ретрансляции сообщений позволяет добиваться максимальной надежности.

Значительная дальность действия субгигагерцовых решений (рисунок 2) сказывается на скорости передачи данных [1] (рисунок 3). Наибольшей пропускной способностью обладает Wi-Fi, который, вместе с тем, отличается и высоким потреблением.

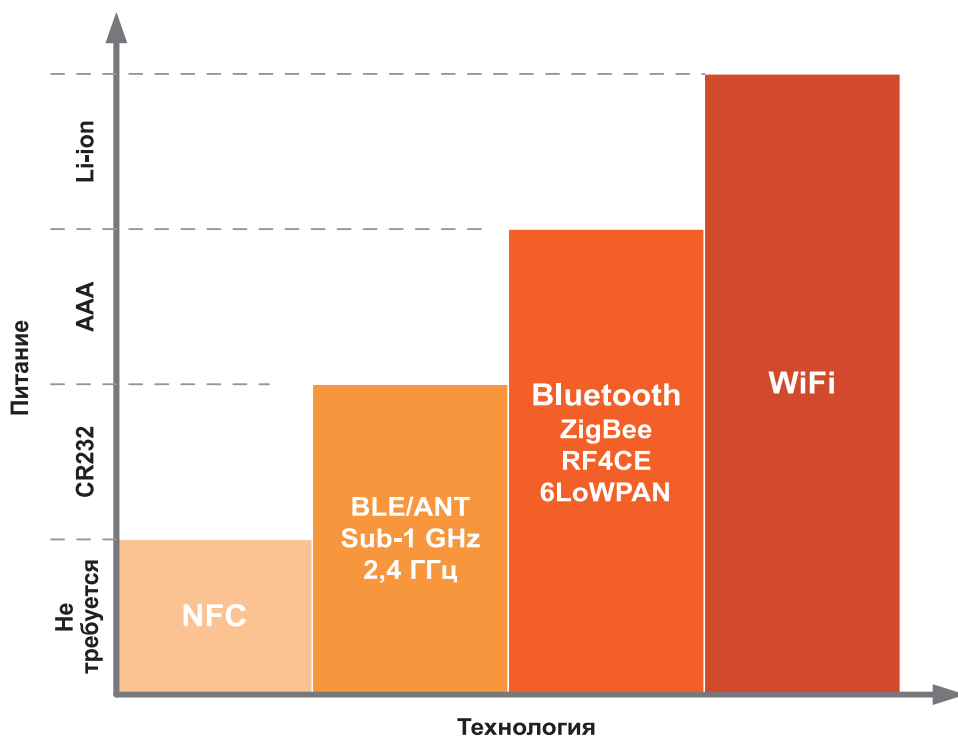


Рис. 4. Потребление современных беспроводных решений

Таблица 2. Характеристики сетевого процессора CC3200

Наименование	Ядро	Грб, МГц	Flash, кбайт	ОЗУ, кбайт	GPIO	Интерфейсы	ADC	16-бит таймеры	Безопасность	Траб, °C	Корпус
CC3200	ARM Cortex-M4	80	—	256	27	I ² C SPI UART I ² S	12 бит, 4 канала	4	AES, DES и 3 DES, SHA2 и MD5, CRD и CRC	-40...85	9x9 (VQFN)

Таблица 3. Алгоритмы шифрования, поддерживаемые CC3100/CC3200

Криптографический алгоритм	Протокол	Назначение	Разрядность ключа шифрования, бит
RC4	WEP, TKIP	Кодирование данных	128
AES	WPA2	Кодирование данных, аутентификация	256
DES	—	Кодирование данных	56
3DES	—	Кодирование данных	56
SHA1	EAP-SSL/TLS	Аутентификация	160
SHA256	EAP-SSL/TLS	Аутентификация	256
MD5	EAP-SSL/TLS	Аутентификация	128
RSA	EAP-SSL/TLS	Аутентификация	2048
DHE	EAP-SSL/TLS	Аутентификация	2048

NFC проигрывает всем остальным технологиям по скорости и дальности действия, но берет уверенный реванш по уровню потребления [1] (рисунок 4). NFC-транспондеры могут и вовсе обходиться без собственного элемента питания, используя для работы энергию радиоизлучения ведущего.

При выборе оптимальной технологии необходимо учитывать и такую особенность, как сложность реализации. Например, если речь идет о создании защищенного Wi-Fi-устройства, то разработчики должны иметь достаточно высокую квалификацию. Это относится как к схемотехникам, так и к програм-

мистам, на плечи которых ляжет написание соответствующих протоколов. Будем откровенны — далеко не всем под силу справиться с этими задачами. Наличие на рынке готовых решений оказывается настоящей палочкой-выручалочкой для небольших компаний. Например, микроконтроллеры с беспроводными модулями производства компании Texas Instruments не только упрощают создание принципиальной схемы и разводку печатной платы, но и имеют поддержку в виде отладочных наборов, программных библиотек и готовых стеков популярных протоколов (ZigBee, Bluetooth и так далее).

Преимущества микроконтроллеров с беспроводными модулями от Texas Instruments

Компания Texas Instruments является одним из лидеров на рынке микроконтроллеров со встроенными беспроводными модулями. При выборе продуктов компании пользователи также получают доступ к средствам разработки — отладочным наборам, программным библиотекам и примерам, стекам популярных протоколов, руководствам по применению. Использование беспроводных микроконтроллеров от TI дает целый ряд преимуществ.

Упрощение процесса разработки аппаратной части. В случае интегрированного решения все самые сложные цепи, связывающие приемопередатчик и ядро, оказываются скрытыми от разработчика.

Упрощение процесса разработки программного обеспечения. Во-первых, взаимодействие с беспроводным модулем строится точно так же, как и с другими периферийными блоками. Во-вторых, Texas Instruments предлагает

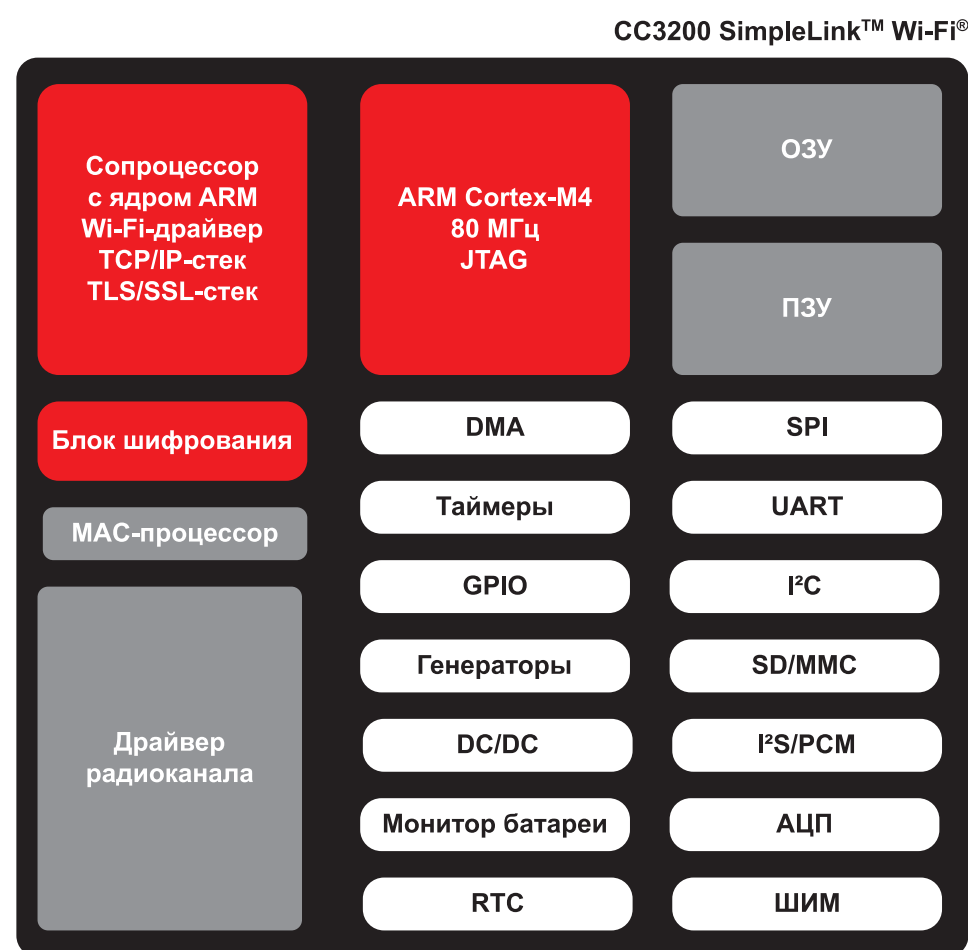


Рис. 5. Блок-схема сетевого Wi-Fi-процессора CC3200 Texas Instruments

Таблица 4. Беспроводные микроконтроллеры семейства SimpleLink™ CC2x

Наименование	Стандарт передачи данных	Пропускная способность, кбит/с	Ядро	Граб, МГц	Flash, кбайт	ОЗУ, кбайт	Упит, В	Потребление (прием), мА	Мин. потребление, мкА	Траб, °С	Минимальные габариты, мм
CC2620	ZigBee RF4CE	250	ARM Cortex-M3	48	128	20+2+8	1,8...3,8	5,9	0,1	-40...85	4x4 (VQFN)
CC2630	ZigBee, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	250	ARM Cortex-M3	48	128	20+2+8	1,8...3,8	5,9	1	-40...85	4x4 (VQFN)
CC2640	Bluetooth Smart (BLE)	—	ARM Cortex-M3	48	128	20+2+8	1,8...3,8	5,9	1	-40...85	5x5 (VQFN)
CC2650	Bluetooth Smart (BLE), ZigBee, ZigBee RF4CE, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	5000	ARM Cortex-M3	48	128	20+2+8	1,8...3,8	5,9	1	-40...85	4x4 (VQFN)
CC2540T	Bluetooth Smart (BLE)	1000	8051	32	128, 256	8	2...3,6	19,6	0,4	-40...125	6x6 (VQFN)
CC2543	Пользовательский 2,4 ГГц	2000	8051	32	32	1	2...3,6	21,2	0,4	-40...85	5x5 (VQFN)
CC2541-Q1	Bluetooth Smart (BLE)	2000	8051	32	128, 256	8	2...3,6	17,9	0,5	-40...105	6x6 (VQFN)
CC2540	Bluetooth Smart (BLE)	1000	8051	32	128, 256	8	2...3,6	19,6	0,4	-40...85	6x6 (VQFN)
CC2538	ZigBee, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	250	ARM Cortex-M3	24	до 512	до 32	2...3,6	нет данных	0,4	-40...125	8x8 (QFN)
CC2541	Bluetooth Smart (BLE)	2000	8051	32	128, 256	8	2...3,6	17,9	0,5	-40...85	6x6 (VQFN)
CC2530	ZigBee, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	250	8051	24	до 256	8	2...3,6	20,5	0,4	-40...125	6x6 (VQFN)
CC2545	Пользовательский 2,4 ГГц	2000	8051	32	32	1	2...3,6	20,8	0,4	-40...85	7x7 (VQFN)
CC2531	ZigBee, 6LoWPAN, 802.15.4 MAC	250	8051	24	до 256	8	2...3,6	20	0,4	-40...125	6x6 (VQFN)
CC2533	2.4-GHz IEEE 802.15.4, ZigBee	250	8051	24	до 96	до 6	2...3,6	20	0,4	-40...125	6x6 (VQFN)
CC2544	Пользовательский 2,4 ГГц	2000	8051	32	32	2	2	22,5	0,4	-40...125	5x5 (VQFN)

бесплатные библиотеки, стеки протоколов и примеры, что значительно упрощает работу программистов.

Сокращение времени на разработку. Данный пункт является следствием двух предыдущих: чем проще становится процесс создания устройства, тем меньше на это уходит времени.

Уменьшение габаритных размеров. Интеграция ключевых компонентов в одном корпусе приводит к снижению площади, занимаемой на плате. Не стоит забывать и о сокращении числа пассивных компонентов, например, конденсаторов фильтров.

Снижение стоимости достигается за счет уменьшения размеров печатной платы и сокращения перечня элементов.

Снижение уровня потребления. Современные контроллеры обладают различными инструментами для оптими-

зации уровня потребления: режимами пониженного потребления, активным управлением частотой тактирования, использованием низких значений напряжения питания и так далее. В случае использования интегрального решения все это распространяется и на беспроводной модуль.

В настоящий момент компания Texas Instruments предлагает разработчикам более трех десятков микроконтроллеров со встроенными радиомодулями (таблица 1).

Беспроводные микроконтроллеры для Wi-Fi-приложений от Texas Instruments

Технология Wi-Fi позволяет добиваться максимальной скорости передачи данных. Вместе с тем, традиционные Wi-Fi-устройства имеют целый ряд недостатков — относительно высокое по-

требление, сложность аппаратной и программной реализации, необходимость создания сложных механизмов защиты данных, значительные габариты. Компании Texas Instruments позволяют быстро и просто решать все перечисленные проблемы благодаря новым микроконтроллерам CC3200.

CC3200 — сетевой Wi-Fi-процессор, объединяющий в одном корпусе Wi-Fi-модуль и мощный микроконтроллер с ядром ARM Cortex-M4, доступный для программирования пользователем [3] (рисунок 5, таблица 2). В номенклатуре Texas Instruments также присутствует сопроцессор **CC3100**, который, в отличие от CC3200, не имеет встроенного программируемого ядра.

CC3200 выпускается в корпусном исполнении 9x9 мм QFN-64. Совмещение процессора и беспроводного модуля в одном малогабаритном корпусе значи-

Таблица 5. Семейство микроконтроллеров SimpleLink™ CC1x

Наименование	Стандарт передачи данных	Диапазон частот, МГц	Фраб, МГц	Flash, кбайт	ОЗУ, кбайт	Упит, В	Потребление (прием), мА	Мин. потребление, мкА	Траб, °С	Минимальные габариты, мм
CC1110/CC1111	Пользовательский (Sub 1GHz)	300...346, 391...464, 782...928	24	до 32	до 4	2...3,6	16,2	0,3	-40...85	6x6 (VQFN)
CC1310	IEEE 802.15.4g, 6LoWPAN, wM-Bus	315, 433, 470, 500, 779, 868, 915, 920	48	128	до 20	1,8...3,8	5,5	0,6	-40...85	4x4 (VQFN)

SimpleLink™ CC26xx

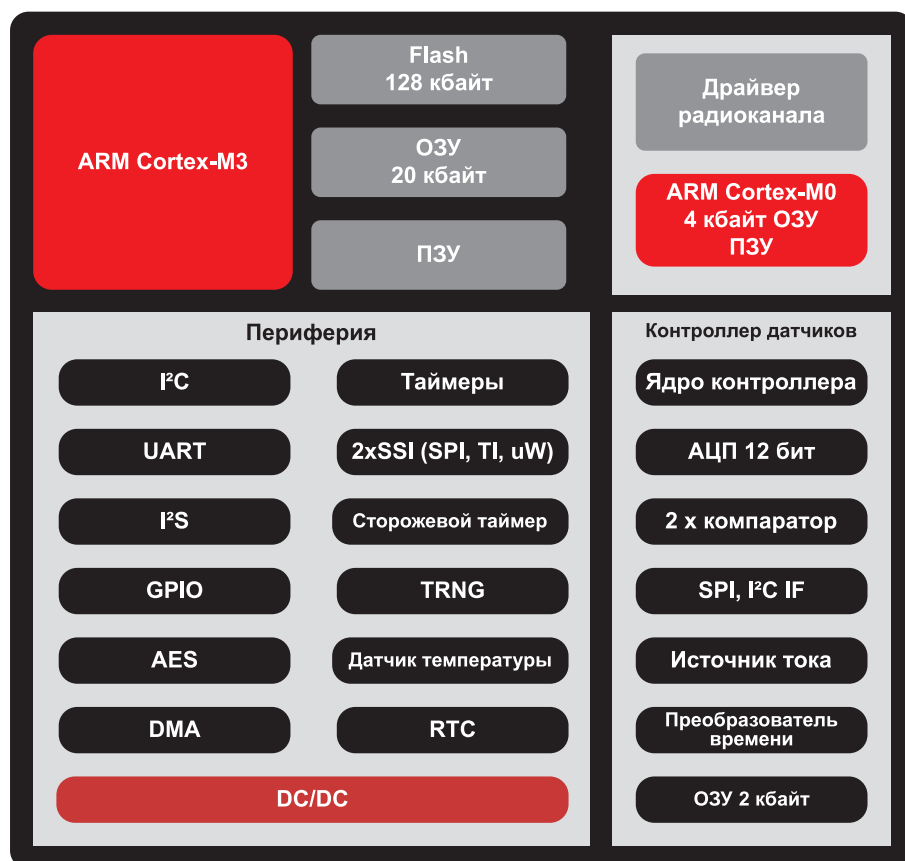


Рис. 6. Блок-схема микроконтроллеров CC26xx

тельно упрощает создание принципиальной схемы и решает проблему с ограничением свободного места на плате.

Контроллер, интегрированный в CC3200, может похвастаться следующими характеристиками [4]:

- ядро ARM Cortex-M4 с рабочей частотой до 80 МГц;
- память: 256 кбайт ОЗУ, SPI для подключения внешней Flash;
- 32 канала прямого доступа к памяти (DMA);
- модули шифрования: AES, DES и 3DES;
- четыре 16-битных таймера с ШИМ;
- 12-битный четырехканальный АЦП;
- интерфейсы: последовательный аудиопорт, 1xSD/MMC, 1xSPI, 1xI²C, 2xUART.

Вопросы потребления достаточно критичны для мобильных устройств и IoT-приложений, так как большая часть из них является автономными устройствами. Уровень потребления CC3200 выглядит достаточно привлекательно. При приеме данных по Wi-Fi ток достигает 59 мА, а при передаче 229 мА. В режиме ожидания ток опускается до уровня 825 мкА, а в состоянии глубокого сна составляет 4 мкА. Такие показатели располагают к использованию этих процессоров в спящем режиме с редкими пробуждениями. В этом случае большую часть времени они находятся либо в режиме ожидания, либо в режиме сна, пробуждаясь только на время обмена данными по сети Wi-Fi.

В микроконтроллерах CC3200 встроенный Wi-Fi-модуль подключается напрямую к матрице Multi-Layer AHB

Bus Matrix. Это дает возможность рассматривать этот блок как стандартный периферийный модуль, который способен напрямую взаимодействовать с памятью и ядром, что позволяет достигать максимальных скоростей обмена данными и даже сокращать нагрузку на ядро за счет контроллера прямого доступа к памяти. Максимальная скорость при работе с протоколом UDP достигает 16 Мбит/с, а при работе со стеком TCP — до 12 Мбит/с.

Чрезвычайно важным достоинством CC3200 является наличие удобного прикладного интерфейса API для взаимодействия с Wi-Fi-сетью и поддержка широкого спектра механизмов безопасности (таблица 3). При этом все самые сложные части кода — организация соединений по Wi-Fi и использование протоколов защиты (TLS/SSL) — оказываются скрытыми от пользователя [4].

Обзор микроконтроллеров SimpleLink CC2x для приложений 2,4 ГГц (Bluetooth, ZigBee, 6LoWPAN)

Семейство беспроводных микроконтроллеров SimpleLink™ CC2x позволяет создавать устройства для популярных технологий, работающих с частотным диапазоном 2,4 ГГц (Bluetooth® Smart, ZigBee®, 6LoWPAN), а также реализовывать частные пользовательские протоколы 2,4 ГГц (таблица 4).

Сейчас семейство объединяет полтора десятка микроконтроллеров, которые можно разделить на две группы: CC25xx и CC26xx.

Базовая линейка CC25xx построена на базе 8-битного процессорного ядра 8051 и характеризуется большим объемом памяти до 512 кбайт. CC25xx используется для относительно простых приложений с минимальным потреблением в режимах сна от 400 нА. Среди представителей данной линейки стоит выделить следующие модели:

- **CC2540T** — микроконтроллер для BLE-устройств с расширенным температурным диапазоном -40...125°C;
- **CC2541-Q1** — микроконтроллер для автомобильных BLE-устройств;
- **CC2538, CC2544, CC2540 и CC2531** — микроконтроллеры со встроенным USB-интерфейсом;

Таблица 6. Семейство микроконтроллеров CC430

Наименование	Диапазон частот, МГц	Ядро	Грб, МГц	Flash, кбайт	ОЗУ, кбайт	NVM, кбайт	Упит, В	Потребление (прием), мА	Мин. потребление, мкА	Траб, °C	Минимальные габариты, мм
CC430F5147	0,1342; 315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	32	4	32	1,8...3,6	15	2	-40...85	9x9 (VQFN)
CC430F5137	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	32	4	32	1,8...3,6	15	2	-40...85	7x7 (VQFN)
CC430F6127	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	32	4	32	1,8...3,6	15	2	-40...85	7x7 (VQFN)
CC430F6135	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	16	2	16	1,8...3,6	15	2	-40...85	9x9 (VQFN)
CC430F6147	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	32	4	32	1,8...3,6	15	2	-40...85	9x9 (VQFN)
CC430F5133	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	8	2	8	1,8...3,6	15	2	-40...85	9x9 (VQFN)
CC430F5145	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	16	2	16	1,8...3,6	15	2	-40...85	7x7 (VQFN)
CC430F5123	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	8	2	8	1,8...3,6	15	2	-40...85	7x7 (VQFN)
CC430F5125	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	16	2	16	1,8...3,6	15	2	-40...85	7x7 (VQFN)
CC430F5143	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	8	2	8	1,8...3,6	15	2	-40...85	7x7 (VQFN)
CC430F6143	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	8	2	8	1,8...3,6	15	2	-40...85	9x9 (VQFN)
CC430F6145	315; 433; 779; 868; 915; 920	MSP430	20	16	2	16	1,8...3,6	15	2	-40...85	9x9 (VQFN)

• **CC2545** и **CC2543** — наиболее подходящее решение для беспроводных клавиатур и мышек.

Высокопроизводительная линейка CC26xx построена на базе современного 32-битного ядра ARM Cortex-M3 [5, 6]. Важно отметить, что данная линейка отличается богатой цифровой и аналоговой периферией, а также дополнительным 32-битным ядром ARM Cortex-M0 для беспроводного модуля (рисунок 6).

Важным достоинством CC26xx является минимальный уровень потребления. В режиме приема значения питающих токов начинаются всего от 5,9 мА.

Микроконтроллеры CC26xx находят применение в самых разнообразных областях: от автоматизации до создания систем освещения [5]. Отдельно стоит отметить наличие в большинстве моделей I²S-интерфейса, что делает эти микроконтроллеры весьма

привлекательными для создания аудиоприложений.

Субгигагерцевые микроконтроллеры семейства SimpleLink CC1x от TI

Семейство микроконтроллеров SimpleLink™ CC1x предназначено для создания субгигагерцевых приложений и включает две линейки (таблица 5).

Микроконтроллеры **CC1110/CC1111** строятся на базе скромного 8-битного ядра 8051 с рабочей частотой до 24 МГц. Данная линейка идеально подходит для создания самых простых пользовательских решений (беспроводные мышки, клавиатуры и так далее). Особо стоит отметить наличие в них USB-интерфейса.

Микроконтроллеры **CC1310** строятся на базе современного ядра ARM Cortex-M3 и имеют поддержку 6LoWPAN. По своей структуре и характеристикам CC1310 практически идентичны пред-

ставителям семейства CC26xx: они также отличаются богатой периферией и дополнительным 32-битным сопроцессором ARM Cortex-M0 для беспроводного модуля [6, 7] (рисунок 7).

Минимальное потребление микроконтроллера CC1310 позволяет использовать его в том числе в системах с питанием от солнечных батарей [8]. С другой стороны современное ядро и высокая производительность позволяют создавать и мощные сетевые решения [9].

Семейство микроконтроллеров CC430 для пользовательских субгигагерцевых решений

Семейство **CC430** объединяет более десятка беспроводных микроконтроллеров (таблица 6). Все они идеально подходят для создания пользовательских субгигагерцевых приложений, в том числе — с использованием популярных

Таблица 7. Семейство микроконтроллеров RF430

Параметр	Наименование						
	RF430CL330H-Q1	RF430CL330H	RF430CL331H	RF430FRL154H	RF430FRL152H	RF430FRL153H	RF430F5978
Стандарт передачи данных	NFC: ISO/IEC 14443B, NFC Tag Type 4B	NFC: ISO/IEC 14443B, NFC Tag Type 4B	NFC: ISO/IEC 14443B, NFC Tag Type 4B	NFC: ISO/IEC 15693	NFC: ISO/IEC 15693	NFC: ISO/IEC 15693	Пользовательский (Sub 1GHz)
Пропускная способность, кбит/с	848	848	848	6.6, 26.5	6.6, 26.5	6.6, 26.5	500
Диапазон частот, МГц	13,56	13,56	13,56	13,56	13,56	13,56	315; 433; 779; 868; 915; 920
Ядро	MSP430	MSP430	MSP430	MSP430	MSP430	MSP430	MSP430
Грб, МГц	—	—	—	2	2	2	20
FRAM, кбайт	0	0	0	2	2	2	0
ОЗУ, кбайт	3	3	3	4	4	4	4
NVM, кбайт	0	0	—	2	2	2	32
Упит, В	3...3,6	2...3,6	2...3,6	1,45...1,65	1,45...1,65	1,45...1,65	1,8...3,6
Потребление ядра, мкА/МГц	—	—	—	140	140	140	160
Потребление (прием), мА	0,04	0,04	0,04	0,25	0,25	0,25	15
Мин. потребление, мкА	10	10	10	16	16	16	2
Траб, °C	-40...105	-40...85	-40...85	0...70	0...70	0...70	-40...85

SimpleLink™ CC1310

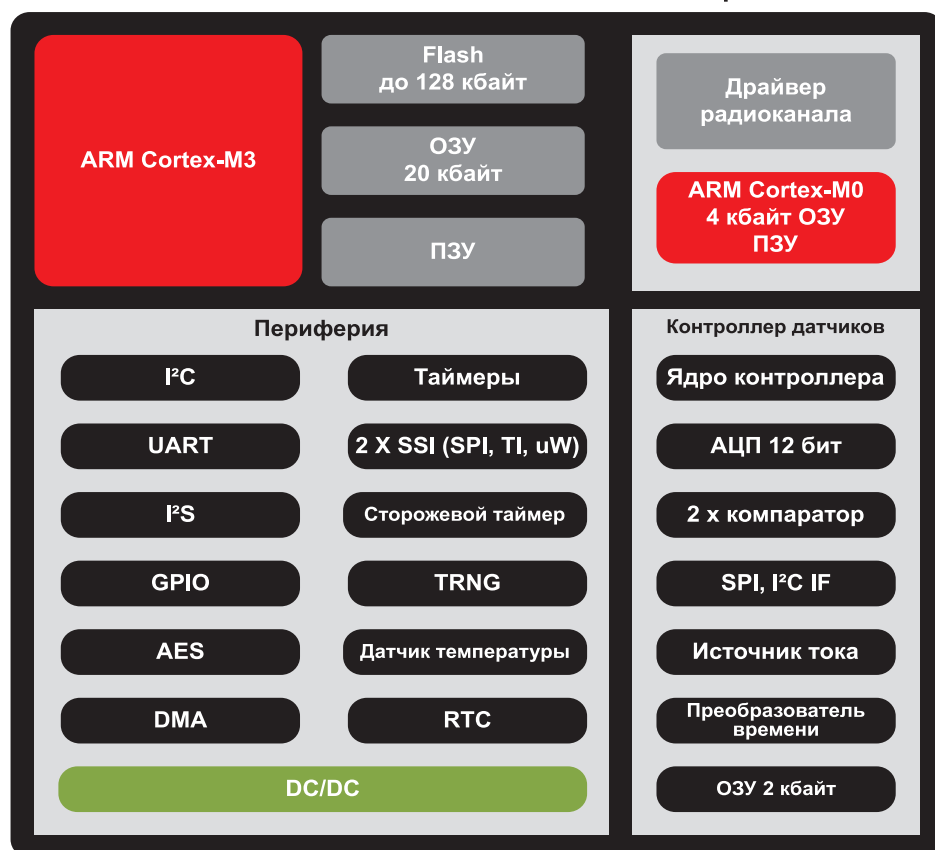


Рис. 7. Блок-схема микроконтроллера CC1310

нелицензируемых диапазонов 433 МГц и 868 МГц.

Среди отличительных черт CC430 стоит отметить:

- производительное и малопотребляющее ядро MSP430 с рабочей частотой до 20 МГц;
- объем Flash-памяти до 32 кбайт, ОЗУ — до 4 кбайт;
- широкий диапазон напряжений питания 1,8...3,6 В;
- минимальное потребление от 1 мкА.

Преимуществом CC430 является широкий выбор встроенной периферии и коммуникационных интерфейсов (рисунок 8). Особенно стоит выделить модели **CC430F6143**, **CC430F6145** и **CC430F6147** со встроенным ЖК-контроллером.

Система-на-кристалле CC430 находит практическое применение в таких областях как [10]:

- автоматизация зданий: отопление, вентиляция, кондиционирование;
- домашняя автоматизация: пульты управления телевидением, портативные устройства, управление бытовыми приборами;
- медицина: биодатчики, диагностика пациента, тревожные кнопки;
- периферия ПК: клавиатура, мышь, джойстик;

- промышленное управление и мониторинг: удаленный контроль оборудования, промышленная автоматика;
- ЖКХ, управление освещением: мониторинг систем, учет электроэнергии, воды, отопления;
- системы безопасности: датчики, контроль доступа, контроль помещений.

Интересный практический опыт по применению микроконтроллеров **CC430F5137** существует и у отечественных разработчиков [11].

Обзор микроконтроллеров RF430 для NFC-приложений

Семейство микроконтроллеров RF430 объединяет две линейки: **RF430CL33** и **RF430FRL15xH** (таблица 7). Обе линейки максимально упрощают создание NFC-транспондеров. Для считывателей используется трансивер **TRF79xx** (рисунок 9).

RF430CL330H — динамический NFC-интерфейс, позволяющий обеспечивать взаимодействие между NFC-считывателем и датчиками. Датчики подключаются к **RF430CL330H** с помощью SPI или I²C (рисунок 10). Этот контроллер не требует для работы собственного элемента питания и получает энергию от радиочастотного поля считывателя. Это делает **RF430CL330H** идеальным решением для наиболее малопотребляющих приложений, систем закрывания дверей, медицинских приложений и других.

RF430FRL15xH — транспондер 13,56 МГц со встроенным программируемым 16-битным процессором **MSP430**. Для хранения памяти программ и данных используется малопотребляющая FRAM-память. Подключение датчиков осуществляется по SPI или I²C. Кроме того, на борту у **RF430FRL15xH** имеется собственный 14-битный сигма-дельта-АЦП, а также датчик температуры.

Средства разработки и отладки для беспроводных микроконтроллеров Texas Instruments

Одним из основных преимуществ беспроводных микроконтроллеров производства компании Texas Instruments является наличие развитой системы средств разработки и отладки (http://www.ti.com/lsds/ti/microcontrollers_16-bit_32-bit/wireless_mcus/tools_software.page#). Даже для краткого описания этих инструментов потребуется отдельная статья [12]. Так, например, только отладочных наборов и модулей для беспроводных микроконтроллеров производства Texas Instruments насчитывается около двух десятков:

- мини-наборы **Mini Development Kit (DK-MINI)**;
- наборы разработчиков **Development Kit (DK)**;

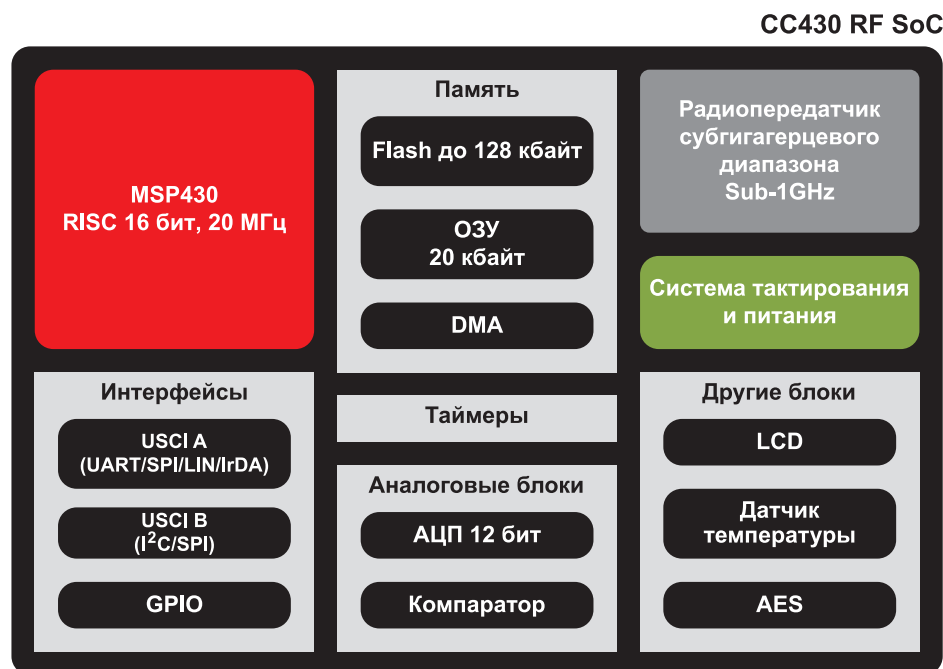


Рис. 8. Блок-схема микроконтроллеров CC430

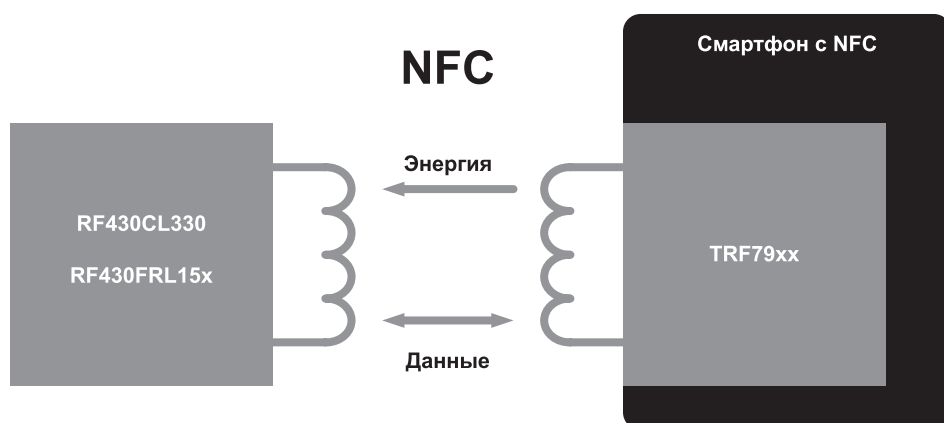


Рис. 9. Структура беспроводного канала NFC на базе решений от Texas Instruments

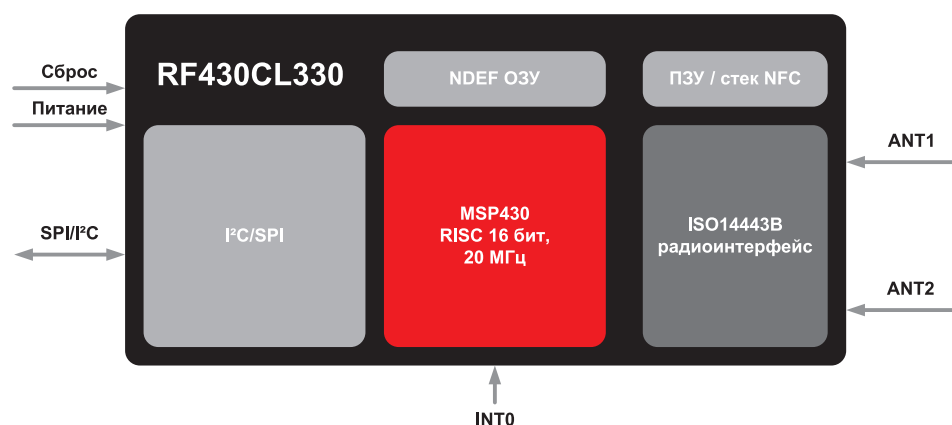


Рис. 10. Блок-схема микроконтроллеров RF430CL330

- оценочные наборы **Evaluation Module Kit (EMK)**;
- USB-модули **USB Evaluation Module**;
- наборы для разработки устройств ZigBee и RF4CE **ZigBee & RF4CE Development Kits**;
- стартовые наборы **LaunchPad**.

Еще большим разнообразием отличается перечень программных средств разработки. Это библиотеки, примеры, стеки протоколов, утилиты и интегрированные среды разработки. Дадим краткую характеристику только специализированным библиотекам и утилитам, предназначенным для беспроводных микроконтроллеров производства Texas Instruments [1].

SmartRF Studio — программа для настройки и управления работой радиочастотных приборов с ПК (<http://www.ti.com/tool/smartrfstudio>).

SmartRF Flash Programmer — утилита для перепрограммирования микроконтроллеров отладочных наборов по радиоканалу (<http://www.ti.com/tool/flash-programmer>).

CC3200 Software Development Kit (SDK) — программный пакет, включающий драйверы для CC3200, более 40 примеров, утилиты для перепрограммирования и конфигурации сетевых параметров (<http://www.ti.com/tool/cc3200sdk>). Используется совместно с набором SimpleLink Wi-Fi CC3200 LaunchPad.

SimpleLink™ Wi-Fi® Starter — программа, позволяющая обмениваться информацией и настраивать процессоры SimpleLink CC3xx (<http://www.ti.com/tool/wifistarter>).

Bluetooth® Low Energy Software Stack and Tools — бесплатный стек и утилиты для протокола Bluetooth Low Energy. Работает с микроконтроллерами **CC2540** и **CC2541** (www.ti.com/blestack).

Z-Stack™ Software Stack — стек протоколов для ZigBee-приложений на базе **CC2530**, **CC2531** и **CC2538** (<http://www.ti.com/tool/z-stack>).

RF4CE Compliant Protocol Stack — стек протоколов для RF4CE-приложений на базе **CC2620**, **CC2650**, **CC2530**, **CC2531** (USB), **CC2533 RF SoC** и **CC259x RF** (<http://www.ti.com/tool/remoti>).

NFCLink NFC/HF RFID Firmware — программная библиотека для создания NFC- и RFID-приложений (<http://www.ti.com/tool/nfclink>).

SimpliciTI — фирменный протокол Texas Instruments, предназначенный для создания небольших беспроводных сетей по топологиям «звезда», «звезда с ретрансляцией» и «точка-точка» на базе микроконтроллеров и приемопередатчиков разных частотных диапазонов [13] (<http://www.ti.com/tool/SimpliciTI>). В настоящий момент протокол поддерживает контроллеры семейств **CC1xxx/CC25xx/CC430**. Для

большинства отладочных наборов предоставляются готовые примеры, использующие SimpliciTI.

TIMAC — реализация стандарта IEEE802.15.4 Medium Access Control (MAC) (<http://www.ti.com/tool/timac>). Стандарт определяет физический слой и управление доступом к среде для беспроводных персональных сетей с низким уровнем скорости. TIMAC реализует топологии «точка-точка», «звезда» и «звезда с ретрансляцией данных». В настоящий момент поддерживает микроконтроллеры различных семейств: **CC2630**, **CC2538**, **CC2530**, **CC2531**, **CC2592**, **CC2590**.

TI-15.4 MAC — программное обеспечение для беспроводных микроконтроллеров **CC1310**, позволяющее создавать беспроводные сети с топологией «звезда» в диапазоне 868 МГц (Sub-1 GHz). ПО TI-15.4 MAC имеет ряд преимуществ перед другими сетевыми протоколами — большую дальность действия и устойчивость к помехам — благодаря использованию технологии «прыгающих частот» (*frequency hopping*). Программное обеспечение предоставляется без лицензионных отчислений и предназначено для работы на линейке беспроводных систем на кристалле SimpleLink Sub-1 GHz CC1310 wireless MCU.

Заключение

Компания Texas Instruments предлагает более трех десятков беспроводных микроконтроллеров для наиболее популярных технологий — 6LoWPAN, NFC, Wi-Fi, устройств Bluetooth и BLE, ZigBee и ZigBee RF4CE. Кроме того, разработчики могут создавать и свои собственные протоколы на базе субгигагерцевых радиоканалов и радиоканалов 2,4 ГГц.

Использование микроконтроллеров со встроенным беспроводным модулем значительно упрощает процесс разработки. Такое решение позволяет снизить потребление, габариты, стоимость и время вывода конечного устройства на рынок.

Важным достоинством микроконтроллеров производства компании Texas Instruments является наличие развитой системы средств разработки: отладочных наборов, программных библиотек и утилит, готовых стеков протоколов.

Литература

1. Wireless Connectivity Guide. Texas Instruments, 2014.
2. SWRB035. Wireless Connectivity Solutions. Texas Instruments, 2015.

3. Chris A. Ciufu. TI emphasizes “KISS” in new Wi-Fi ICs. 2014, <http://eecatalog.com/>

4. CC3100/CC3200 SimpleLink™ Wi-Fi® Internet-on-a-Chip User's Guide. 2016, Texas Instruments.

5. Михаил Чigarev. Беспроводное управление LED-освещением? — Простое решение на CC1110 и CC2510. Новости Электроники №4, 2011.

6. Александр Калачев. Новинка от TI: три процессора, DC/DC и радио 868/2400 МГц на одном кристалле. Новости Электроники №2, 2015.

7. Александр Калачев. Быстрый старт разработки беспроводного канала 868 МГц на CC1310. Новости Электроники №3, 2016.

8. Вячеслав Морозов. Беспроводной датчик с питанием от солнечной батареи: типовый проект от Texas Instruments. Новости Электроники №7, 2016.

9. Олег Пушкарев. Превращение контроллера в сетевой процессор: Как управлять CC1310 с помощью AT-команд. Новости Электроники №3, 2016.

10. Сергей Игнатов. Система на кристалле CC430: вычислительная мощь плюс радиочастотный канал. Новости Электроники №11, 2010.

11. Александр Калачев. Создание беспроводной системы мониторинга — первые шаги «Бекаса». Компэл. <http://www.compel.ru/lib/articles/sozдание-besprovodnoy-sistemyi-monitoringa-pervyye-shagi-bekasa>.

12. Александр Калачев. Отладочная плата устройств Internet of Things — SimpleLink SensorTag — CC2650STK. Часть 1 — теория. Компэл. <http://www.compel.ru/lib/articles/otladchnaya-plata-ustroystv-internet-of-things-simplelink-sensortag-cc2650stk-chast-1-teoriya>.

13. Протокол SimpliciTI. Новости Электроники №14, 2008.

14. <http://www.ti.com/>

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка —
e-mail: wireless.vesti@compel.ru

Первый двухдиапазонный чип 868/2400 МГц



CC1350



- Минимальное энергопотребление: RX 5.4 mA Sub-1 GHz
- Дальность связи: до 20 км
- Чувствительность: -124 дБм, выходная мощность: до +15 дБм
- Сетевые стеки: 6LoWPAN и TI-15.4-STACK 868 МГц, ZigBee, 802.15.4 и Bluetooth Low Energy 2,4 ГГц