

Новые модули Bluetooth 4.0 серии BLE производства Bluegiga

Один из ведущих производителей Bluetooth-модулей — фирма Bluegiga объявила о начале продаж новейшего поколения этих устройств с низким энергопотреблением и поддержкой версии Bluetooth 4.0 — технологии, специально разработанной для использования в батарейных устройствах, которым требуется продолжительная автономная работа без подзарядки. Первая серия устройств Bluegiga с поддержкой Bluetooth v4.0 включает модуль BLE112 и USB-модем BLED112. Область приложения технологии BLE чрезвычайно широка. По оценкам специалистов, продукция с поддержкой Bluetooth 4.0 BLE, Dual-mode в ближайшие годы займет лидирующее место на рынке бытовых беспроводных устройств.

Виктор Алексеев, к. ф-м. н.
info@telemetry.spb.ru

Технология Bluetooth 4.0, BLE с низким энергопотреблением

Финская фирма Bluegiga приступила к массовому производству семейства Bluetooth-модулей с низким энергопотреблением и поддержкой версии Bluetooth 4.0. Спецификация с низким энергопотреблением Bluetooth 4.0 разработана международным объединением SIG — Bluetooth Special Interest Group. Эта специальная группа является органом, который наблюдает за разработкой стандартов, лицензированием технологий и торговых марок Bluetooth. SIG — частная некоммерческая торговая ассоциация, основанная в сентябре 1998 г., имеющая штаб-квартиру в Керкленде (Вашингтон, США) и местные отделения в Гонконге, Пекине (Китай), Сеуле (Корея), Токио (Япония), Тайване и Малме (Швеция).

Несмотря на большие скорости передачи, которые поддерживаются технологией Bluetooth 3.0+HS (максимум до 24 Мбит/с), ее развитие сдерживается из-за достаточно большого энергопотребления. Технология Bluetooth 4.0 специально разработана для использования в батарейных устройствах, которым требуется продолжительное автономное функционирование без подзарядки. Благодаря использованию специального алгоритма работы, при котором передатчик включается только на время передачи данных, в Bluetooth 4.0 удалось достигнуть ультранизкого энергопотребления.

В спецификации Bluetooth 4.0 предусмотрено два типа устройств: Single-mode и Dual-mode. Базовые чипсеты Single-mode поддерживают работу только в соответствии со спецификацией 4.0. Чипсеты Dual-mode могут работать с поддержкой как Bluetooth 3.0, так и Bluetooth 4.0. Поэтому устройства Single-mode прежде всего предназначены для беспроводных миниатюр-

ных электронных датчиков, использующихся в медицине, спортивных тренажерах, миниатюрных промышленных сенсорах [1, 2].

Структурная схема модуля BLE112

Первая серия устройств Bluegiga с поддержкой Bluetooth v.4.0, включает модуль BLE112 и USB-модем BLED112. Базовый модуль BLE112 является законченным полнофункциональным устройством Bluetooth 4 и содержит чипсет Texas Instruments CC2540, периферийные блоки и интерфейсы, а также встроенные средства разработки, позволяющие создавать потребительские приложения [3].

Серия Bluegiga BLE предназначена для использования в таких приложениях, как переносное диагностическое медицинское оборудование, спортивные контрольные датчики, приборы для бытовой автоматизации, аудиогарнитуры, системы безопасности, системы наблюдения за детьми и пожилыми людьми, миниатюрные информационные панели. Встроенная антенна, полный стек Bluetooth-протоколов, гибкие аппаратные интерфейсы позволяют легко интегрировать модули BLE112 в существующее оборудование. Используя прикладное ПО, можно создавать простые управляющие программы и избавиться от внешнего микроконтроллера. Питание модуля BLE112 может быть реализовано от стандартных батарей или аккумуляторов с напряжением 2–3 В. В модуле предусмотрен режим максимального энергосбережения, при котором ток потребления составляет всего 400 нА. Чтобы привести модуль в рабочее состояние, требуются доли миллисекунды [4].

Управление модулем BLE112 осуществляется через порты UART, USB, SPI с помощью бинарных команд (Binary command) на уровне

API (application programming interface). Кроме того, для прямого программирования центрального процессора можно использовать библиотеку кодов на языке C (стандарт ANSI). Следует особо подчеркнуть, что модуль BLE112 не имеет поддержки, привычного для Blueiga ASCII-интерфейса, позволяющего управлять модулем с помощью простых команд (стандартные коды обмена информацией). В серии BLE использована другая идеология управления — Binary Command, которая предоставляет разработчикам значительно больше возможностей для создания прикладного ПО.

Бинарные команды генерируют бинарные строки, разметка которых определяется строкой формата. Набор этих команд предназначен для управления потоками двоичных данных. Иными словами, в новых модулях серии BLE команды посылаются не в ASCII-кодировке, а формируются первоначально в определенные последовательности байтов, которые выглядят следующим образом: «команда 1 + параметр 1»; «команда 2 + параметр 2» и т. д. При работе с бинарными командами используются так называемые «бинарные таблицы», которые содержат двоичные коды для различных массивов данных и графических символов. С бинарными командами можно работать в среде Windows. Специальные программные приложения, функционирующие под управлением этой ОС, позволяют даже неспециалисту легко создавать свои собственные программы, предназначенные для стыковки модулей BLE с внешними устройствами. Подробнее об этом будет сказано ниже. Блок-схема модуля BLE112 показана на рис. 1 [4].

Основой модуля BLE112, определяющей всю идеологию и отличительные особенности, является базовый чипсет Texas Instrument CC2540, представляющий собой однокристалльную сборку (SoC — 65 нм/2,4 ГГц). На одном кристалле находятся элементы, необходимые для создания устройств с поддержкой технологии Bluetooth 4.0:

- АЦП, 12 разрядов, восемь каналов (дополнительный входной канал температурного датчика);
- интегральный высокоэффективный операционный усилитель;
- компаратор сверхнизкой мощности;
- таймеры общего назначения (один 16-разрядный и два восьмиразрядных);
- входы/выходы общего назначения (19 I/O — 4 мА; 2 I/O — 20 мА);
- таймер ждущего режима (32 кГц);
- два универсальных синхронно-асинхронных приемопередатчика с поддержкой нескольких протоколов последовательных портов (USART-0, USART-1);
- интерфейс USB 2.0;
- схема безопасности IR;
- прямой пятиканальный доступ к памяти DMA;
- сопроцессор безопасности с поддержкой симметричного алгоритма блочного шифрования AES;
- монитор заряда батареи;
- температурный датчик;
- CPU 8051;
- память Flash 128 или 256 кбайт;

- память SRAM 8 кбайт;
- встроенный стек низкого энергопотребления Bluetooth 4.0, SmArtRF с поддержкой компилятора IAR (SmArtRF — торговая марка Texas Instruments).

Напряжение питания модуля может меняться в диапазоне 2–3,6 В. Ядро микропроцессора, выполненное по известной схеме 8051 гарвардской архитектуры, позволяет выполнять операции за один цикл. В CPU есть три различные шины доступа к памяти: SFR (шина триггеров), DATA, DATA/XDATA (чтение и запись данных). Кроме того, имеется дополнительный интерфейс отладки и расширенный модуль прерывания. Контроллер приоритета доступа к памяти (memory arbiter, AR) является одним из основных узлов однокристалльной системы, поскольку подключает через шину SFR центральный процессорный модуль (CPU) и контроллер прямого доступа к памяти (DMA) с физической памятью и периферийными устройствами. SFR представляет собой стандартную шину, по которой осуществляется подключение DTU к различным внешним модулям. Кроме того, SFR обеспечивает доступ к радиорегистрам в рамках процесса обработки данных. Контроллер AR имеет точки доступа, через которые он может подключаться к памяти (SRAM, Flash, XREG/SFR). Память SRAM предназначена для записи и хранения данных. Это специально разработанная модель SRAM с ультранизким энергопотреблением. Она сохраняет работоспособность, когда цифровая часть модуля отключена. Запись в блок флэш-памяти выполняется через собственный контроллер, который позволяет выполнять постраничное редактирование и программирование.

Периферийные модули, такие, например, как ядро блочного шифрования (AES), контроллер флэш-памяти, USART, таймеры, АЦП и другие,

могут получать прямой доступ к памяти через контроллер DMA, выполняя передачу данных между отдельным каналом SFR (или адресом XREG) и флэш-памятью (или SRAM). Каждый чипсет CC2540 обладает уникальным 48-разрядным кодом IEEE, который может быть использован в качестве общедоступного адреса конечного Bluetooth-устройства. Разработчики вправе использовать в своих изделиях именно этот код IEEE либо запрограммировать свой собственный новый код.

Сервисная служба контроллера прерываний имеет в общей сложности 18 вводов прерывания, разделенных на шесть групп. Каждая из этих групп связана с одним из четырех приоритетов прерывания. Входы/выходы прерывания режима «сна» (sleep mode) обслуживаются, даже если устройство находится в режиме «сна» и отключены основные энергопотребляющие модули.

Отладочный интерфейс (debug interface) представляет собой отдельный двухпроводный последовательный интерфейс, который используется для внутрисхемной отладки и перепрограммирования чипсета. Через этот интерфейс можно стирать или программировать весь объем флэш-памяти, останавливать и запускать выполнение пользовательских программ, выполнять инструкции по обслуживанию ядра 8051. Кроме того, через отладочный интерфейс осуществляется управление кварцевыми генераторами частоты.

Контроллер ввода/вывода ответственен за все контакты ввода/вывода общего назначения (GPIO). Каждый из вводов/выводов соответствует определенному периферийному устройству или входному/выходному событию. Эти GPIO могут быть запрограммированы для работы в качестве ввода (I) или в качестве вывода (O).

Таймер режима «сна» (SM) также является специально разработанным устройством

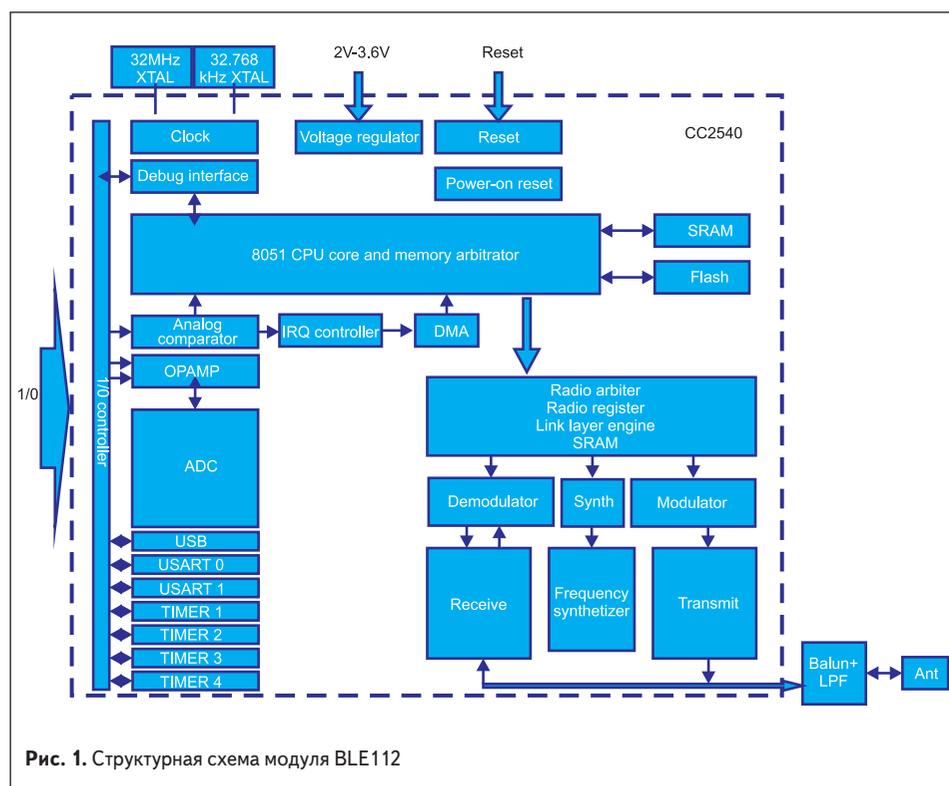


Рис. 1. Структурная схема модуля BLE112

со сверхнизким потреблением. Он может использовать как внешний кварцевый генератор на 32,768 кГц, так и внутренний осциллятор RC на 32,753 кГц. Таймер режима «сна» работает непрерывно в экономичных рабочих режимах. В режиме полной мощности используется другой кварцевый генератор и таймер. Типичным примером применения этого таймера является режим работы счетчика реального времени или таймера «пробуждения», предназначенного для обслуживания выхода модуля из экономичных режимов энергопотребления.

Встроенный сторожевой таймер предназначен для перезагрузки модуля в случае «зависания» программного обеспечения. Два кварцевых генератора с частотами 32,678 кГц и 32 МГц предназначены для работы модуля в различных режимах энергосбережения.

Таймер 1, представляющий собой 16-разрядный «таймер/счетчик», формирует импульсы заданной длительности в режиме реального времени. Он поддерживает 16-разрядный ШИМ (помехозащищенный, фазонезависимый). Кроме того, в этом таймере поддерживаются: буферизация регистров совпадения; фильтрации помех в режиме захвата; режим сброса при совпадении (автоперезагрузка); программирование параметров ШИМ; счетчик внешних событий.

Таймер 2 — это 40-разрядный таймер, который используется в режимах низкого энергопотребления. В нем есть 16-разрядный счетчик с программируемым периодом и 24-разрядный счетчик переполнения, отслеживающий прошедшее время. Таймер 2 также используется для контроля точного времени работы модуля.

Таймер 3 и таймер 4 являются восьмиразрядными таймерами с функциональностью «таймер/счетчик/ШИМ». В них есть программируемый делитель частоты и один программируемый встречный канал с восьмиразрядным калибровочным параметром. Период в этих таймерах также можно программировать.

Интерфейсы USART-0 и USART-1 можно использовать как SPI или как UART. При этом они могут быть конфигурированы для работы в качестве ведущего или ведомого устройства. Эти интерфейсы обеспечивают двойную буферизацию на приеме и на передаче данных, а также обеспечивают высокую пропускную способность в полнодуплексном режиме. В модуле BLE112 в качестве основного используется метод модуляции GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) — гауссовская частотная манипуляция. Этот метод частотной манипуляции с низкочастотным фильтром на входе дает сглаженный по закону Гаусса входной импульс. Оба USART обеспечивают скорости до 1 Мбит/с (модуляция GFSK) при работе в качестве SPI или UART. При использовании других методов модуляции скорости будут меньше: 250 кбит/с (FSK) и 500 кбит/с (MSK). Модуль может поддерживать от четырех до восьми соединений в режиме ведущего (master/slave). У каждого USART есть свой собственный высокоточный контроллер скорости передачи. Модули BLE112 поддерживают USB, Full Speed, 12 Мбит/с.

В модулях предусмотрена система высокоуровневой безопасности, включающая аутентификацию, авторизацию, шифрование и надежную защиту

от атак типа Man-in-the-middle. Этот тип несанкционированного доступа «человек посередине» обозначает ситуацию, при которой взломщик, подключившись к каналу между контрагентами, осуществляет активное вмешательство в протокол передачи, удаляя, искажая информацию или навязывая ложную. Ядро шифрования/дешифрования использует алгоритм AES с 128-разрядными ключами. Встроенная схема контроля и регулировки напряжения сглаживает пульсации, убирает наводки и обеспечивает точные значения напряжений питания.

Аналоговый компаратор сверхнизкой мощности может работать с ультранизкими напряжениями, что позволяет вывести модуль из режима «глубокого сна» при отключенных энергоемких узлах. Понижающий преобразователь (RF Front End) включает в себя объединенный симметрирующий трансформатор, фильтр нижних частот и керамическую встроенную или внешнюю антенну. Оптимальное соотношение этих компонентов обеспечивает чрезвычайно низкие внутреннюю, побочную эмиссию и вторичные гармоники.

Встроенная керамическая антенна модуля гарантирует высокую эффективность приема сигнала при работе на открытом воздухе в зоне прямой видимости. При использовании модуля в закрытых помещениях с экранированными стенами эффективность работы антенны будет меньше. Следует иметь в виду, что излучение в диапазоне 2,4 ГГц эффективно поглощается металлическими поверхностями. Поэтому, например, внутри железного гаража модуль со встроенной антенной работать не будет. В серии BLE использован метод адаптивной подстройки частоты AFH, который позволяет не только уменьшить помехи от устройств, работающих рядом на тех же частотах, но и определять переполненные диапазоны и избегать их.

Стек-протоколы BLE

Модули серии BLE112 имеют встроенный стек протоколов Bluetooth BLE, обеспечивающий режимы микропотребления. Структурная схема стека BLE приведена на рис. 2 [6].

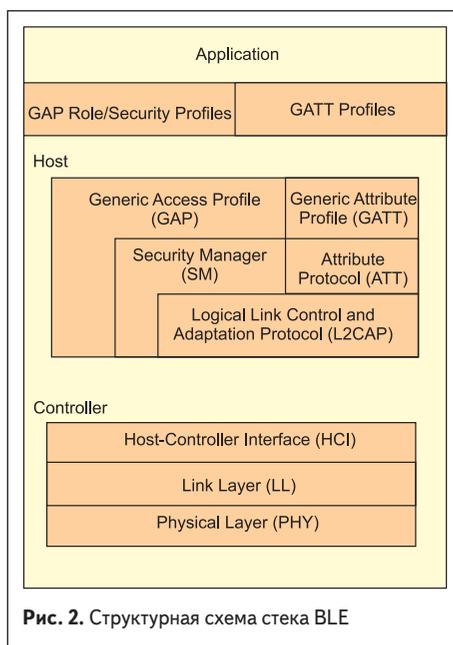


Рис. 2. Структурная схема стека BLE

Стек протокола BLE, состоящий из двух блоков (контроллер и хост), содержит следующие профили:

- GAP (Generic Access Profile);
- GATT (Generic Attribute Profile);
- L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol);
- SM (Security Manager);
- ATT (Attribute Protocol).

Такое разделение, в своем роде, является возвратом к старому стандарту Bluetooth 3 для устройств BR/EDR (Basic Rate/Enhanced Data Rate), в которых эти два блока рассматривались отдельно. На самом верху расположены уровни GAP и GATT. Физический уровень (PHY) соответствует передаче на центральной частоте 2,4 ГГц с использованием гауссовской частотной манипуляции GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying).

Канальный уровень (Link Layer) контролирует процесс работы радиоканала и управляет его состоянием. При этом устройство может находиться в одном из пяти состояний: ожидание, сканирование, идентификация, инициализация, процесс передачи. После того как устройство инициализировалось, оно может выступать в роли ведущего или ведомого (master/slave). Устройство, инициализировавшееся соединением, будет выступать как «мастер». Устройство, разрешившее соединиться с ним, будет выступать в роли «ведомого». В стандарте Bluetooth v.4.0, Single mode устройство «мастер» может одновременно поддерживать от четырех до восьми соединений с «ведомыми» устройствами.

Уровень HCI (Host controller interface) обеспечивает связь между хостом и контроллером, используя стандартные интерфейсы. Он может быть реализован с помощью программного обеспечения интерфейса прикладного программирования (API) или с помощью аппаратной части через интерфейсы UART, SPI или USB. При этом через эти интерфейсы управление модулем реализуется с помощью бинарных команд.

Уровень L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) обеспечивает инкапсуляцию данных для верхних уровней, в том числе и при логическом соединении «точка-точка». Этот протокол, реализующий логическое соединение поверх соединения по радиоканалу, позволяет протоколам более высокого уровня обмениваться пакетами данных длиной до 64 кбайт. Несколько логических каналов могут одновременно использовать одно и то же радиосоединение. При этом пакет протокола L2CAP, получаемый каналом, перенаправляется к соответствующему протоколу более высокого уровня. Узел L2CAP, как правило, всегда подключается к уровню HCI.

Уровень SM (Security Manager) определяет методы, с помощью которых реализуется соединение между устройствами. Кроме того, на этом уровне вырабатываются инструкции о мерах безопасности при соединении различных устройств и степени конфиденциальности передаваемых данных.

Уровень GAP организует связь с приложениями и внешними устройствами и контролирует их безопасное взаимодействие.

Протокол АТТ ограничивает передачу данных и позволяет модулю пересылать другим устройствам только ту часть данных, которые помечены как «атрибуты». В контексте этого протокола устройство, передающее «атрибуты», обозначается как «сервер». Устройство, принимающее «атрибуты», обозначается как «клиент». При этом определенные на уровне LL роли устройств в качестве «мастера» и «ведомого» не зависят от того, как эти устройства определены на уровне АТТ. Поэтому и «сервер» и «клиент» могут выступать как в качестве «мастера», так и в качестве «ведомого». Уровень GATT реализует сервисную службу, которая вырабатывает дополнительные детали инструкции, как именно должно быть реализовано взаимодействие между устройствами на уровне АТТ. Уровень GATT определяет структуру профилей. В стандарте BLE все данные, которые используются профилем или сервисными службами, обозначают как «характеристики». Весь процесс передачи данных между двумя устройствами в стандарте BLE реализуется только через уровень GATT. Поэтому абсолютно все приложения и профили в стандарте BLE, так или иначе, взаимодействуют с профилем GATT. Более подробную информацию о стеке BLE можно найти в работах [6–12].

Основные параметры модулей BLE112 и BLED112

Модули BLE112 работают в диапазоне открытых частот ISM: 2402–2480 МГц. Предусмотрено пять режимов работы модуля.

В активном режиме модуль работает с использованием всех заложенных функций. Включен внутренний стабилизатор напряжения. Питание подается как на ядро 8051, так и на все вспомогательные блоки. Включены все высокочастотные тактовые генераторы. Полностью реализован прямой доступ к памяти FLASH, SRAM. В этом режиме ток потребления распределяется следующим образом:

- Tx: 32 мА (+4 дБм);
- Tx: 27 мА (0 дБм);
- Tx: 24 мА (-6 дБм);
- Tx: 21 мА (-23 дБм);
- Rx: 19,6 мА;
- Rx: 22,1 мА (программируемый режим High gain mode).

Ток потребления в режиме передачи (TX) и режиме приема (RX) можно дополнительно снизить использованием внешнего стабилизированного источника питания.

Модуль BLE112 может работать в четырех режимах энергосбережения:

1. Ток потребления равен 235 мкА. Необходимо 4 мкс восстановления модуля из режима «сна» и возврата в активный режим работы. Нужно отметить, что время восстановления является особо критичным параметром для чипсетов, работающих в режимах энергосбережения. Чипсеты для беспроводной связи производства Texas Instruments обладают наименьшими значениями данного параметра. В режиме 1 схема контроля и регулировки напряжения включена. Кварцевые генераторы 16 МГц (RCOSC) и 32 МГц выключены. Метод RCOSC работает с макросом для подключения так-

товой частоты с внутреннего RC-генератора. Генератор 32,768 кГц (XOSC, POR) и таймер режима «сна» активны. Функция XOSC обеспечивает контроль сбоя в работе кварцевого генератора методом считывания флага отката. Генератор 32,768 кГц выдает частоты для контроллера перезагрузки питания (POR). В данном режиме доступны RAM и регистр хранения данных. Модуль перейдет в активный режим при получении одного из трех сигналов: RESET, сигнал внешнего прерывания, сигнал срабатывания таймера спящего режима.

2. Ток потребления меньше — 0,9 мкА. Необходимо 120 мкс для возврата модуля в активный полнофункциональный режим работы. В данном случае питание на ядро не подается. Контроль и регулировка напряжения выключены. Тактовые генераторы 16 МГц (RCOSC) и 32 МГц отключены. Генератор 32,768 кГц (XOSC, POR) и таймер режима «сна» включены. При этом работает либо RC-генератор, либо кварцевый генератор 32,768 кГц. Доступны RAM и регистр хранения данных. Модуль «просыпается» по сигналу RESET или по сигналу внешнего прерывания, а также при срабатывании таймера спящего режима. Информация о состоянии USB будет потеряна при вхождении в этот режим.

3. Это режим максимальной экономии. Питание на ядро не подается. Ни один из генераторов не работает. В данном режиме ток потребления составляет всего 0,4 мкА. Стандартный «таблеточный» аккумулятор CR2032 может работать в этом режиме без подзарядки несколько лет. Время перехода в активный режим составляет 120 мкс и осуществляется по сигналу RESET или по сигналу внешнего прерывания. Информация о предыдущем состоянии USB теряется. Существуют ограничения на доступ к RAM и регистру данных.

4. Данный режим характеризуется ограниченной функциональностью процессора MCU. В этом режиме процессор находится в ждущем режиме, то есть код не выполняется. Ток потребления равен 6,7 мА. Работает генератор 32 МГц (XOSC). Радиоканал и периферийные устройства отключены.

При решении конкретной задачи мощность передатчика может быть запрограммирована для трех различных вариантов работы. Например, если не нужны максимальные радиусы действия модуля, то можно переключить модуль на меньшую мощность и значительно увеличить срок службы батареи. В зависимости от используемого режима мощности будет меняться и дальность действия:

- в диапазоне от +4 дБм до -93 дБм — 150 м (на открытой местности);
 - в диапазоне от +0 дБм до -88 дБм — 40 м;
 - в диапазоне от +23 дБм до -88 дБм — 10 м.
- Чувствительность приемника может изменяться в диапазоне от -87 до -93 дБм. При средних значениях мощности передачи 0 дБм ток потребления равен 27 мА. Температура эксплуатации -40...+85 °С. Внешний вид модуля показан на рис. 3. Модуль выполнен в планарном конструктиве. Габаритные размеры и расстояние между выводами показаны на рис. 4.

Модули BLE Bluegiga выпускаются в нескольких модификациях. Для различных моделей используется следующая маркировка — BLE112-A/E-1.0:

- первая цифра обозначает поколение модулей (1);
- вторая цифра обозначает поддержку технологии Bluetooth (1 — только BLE, v.4; цифра 2 — поддержка v.4 и других версий);
- третья цифра обозначает соответствие классу Bluetooth (1 — class 1, 2 — class 2);
- буква соответствует антенне модуля (A — встроенная антенна; E — разъем U.FL для внешней антенны);
- последняя цифра обозначает версию программного обеспечения.

Модем BLED112 (рис. 5) выполнен в виде полностью законченного устройства с разъемом USB. Он содержит внутри себя модуль BLE112, имеет порт USB. Может быть подключен непосредственно к USB-разъему компьютера или



Рис. 3. Внешний вид модуля BLE112

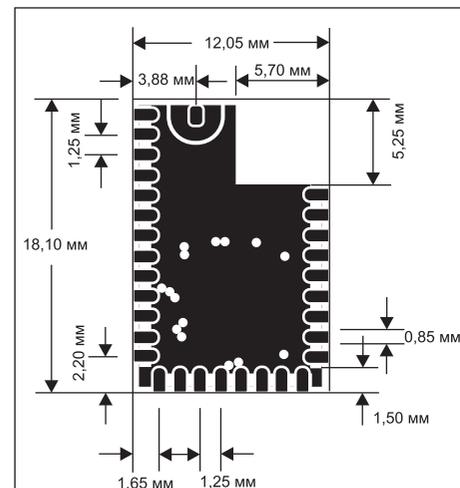


Рис. 4. Габаритные размеры модуля BLE112



Рис. 5. Модем BLED112

другого устройства, поддерживающего данный интерфейс. Модем USB BLED112 является идеальным устройством для беспроводного подключения к персональным компьютерам другого вспомогательного оборудования и аксессуаров. Два модема BLED112, подключенные к двум компьютерам, могут использоваться в качестве стартового комплекта для разработок на базе модулей BLE Bluegiga [5].

Модули серии BLE сертифицированы в соответствии с международными стандартами: ETSI EN 300 328 и EN 300 440 Классов 2 (Европа), FCC Часть 15 CFR47 (США) и STD-T66 ARIB (Япония).

Средства отладки модулей BLE112

Для отладки модулей BLE112 на ранней стадии процесса проектирования имеются несколько доступных программ и отладочных комплектов. В самом простом случае, когда разработчик только начинает знакомиться с модулями LTE Bluegiga, понадобятся два модема BLED112, подключенных к ПК, и отладочное программное обеспечение. Наиболее доступным и бесплатным ПО является Texas Instruments SmartRF Studio (TI SRFS) [6–12]. Программу можно бесплатно загрузить с сайта производителя [7]. Это ПО является Windows-приложением и может использоваться для настройки и конфигурирования модуля, а также для написания простых пользовательских приложений. Программа TI SRFS особенно полезна для выбора и тестирования значений параметров регистра конфигурации модуля, а также для оптимального выбора и стыковки внешних датчиков и вспомогательных устройств. Главное меню программы показано на рис. 6.

Приложение Texas Instruments SmartRF Studio обеспечивает поддержку следующих функций:

- тестирование канала передачи;
- отправка и получение данных;
- тест антенны и оценка ее параметров;
- выбор режима Tx/Rx;
- выбор режима энергосбережения;
- типовые настройки для внешних датчиков и периферийных узлов;
- подробная информация для каждого регистра;
- загрузка/сохранение файлов;
- конфигурация внешних портов UART, USB, SPI;
- поддержка до восьми USB-устройств на одном компьютере.

Для работы с модулями BLE112, изготовленными на базе чипсета CC2540, необходима версия Studio SmartRF7 v.1.4.9. Кроме того, потребуется драйвер USB для Windows x86 и x64.

Фирма Bluegiga выпускает свое собственное программное обеспечение, предназначенное для отладки модулей BLE112: BG Profile Toolkit, BG Script (C language). Графический интерфейс программы BG Script показан на рис. 7 [5].

Это программное обеспечение содержит интегрированную среду разработки и компилятор C/C++, позволяет создавать и обрабатывать приложения пользователя для ядра 8051 непосредственно в самом модуле. При этом для выполнения программы не нужен внешний ПК или контроллер. Работа с BG Script отличается

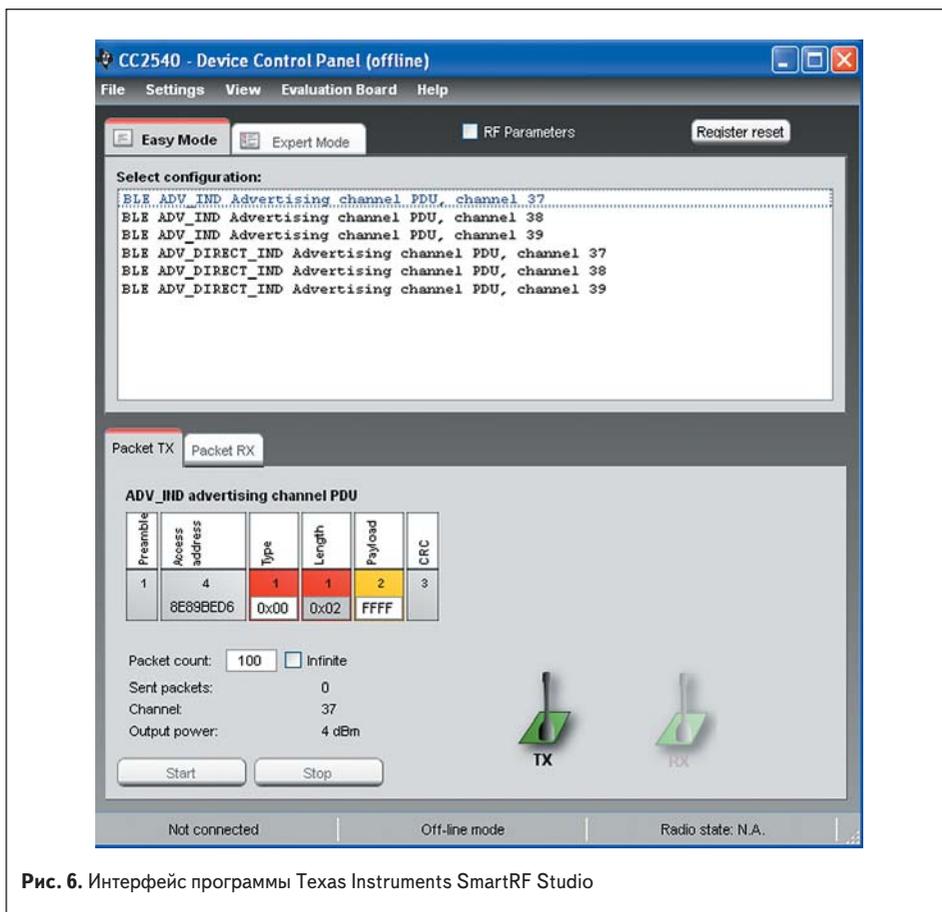


Рис. 6. Интерфейс программы Texas Instruments SmartRF Studio

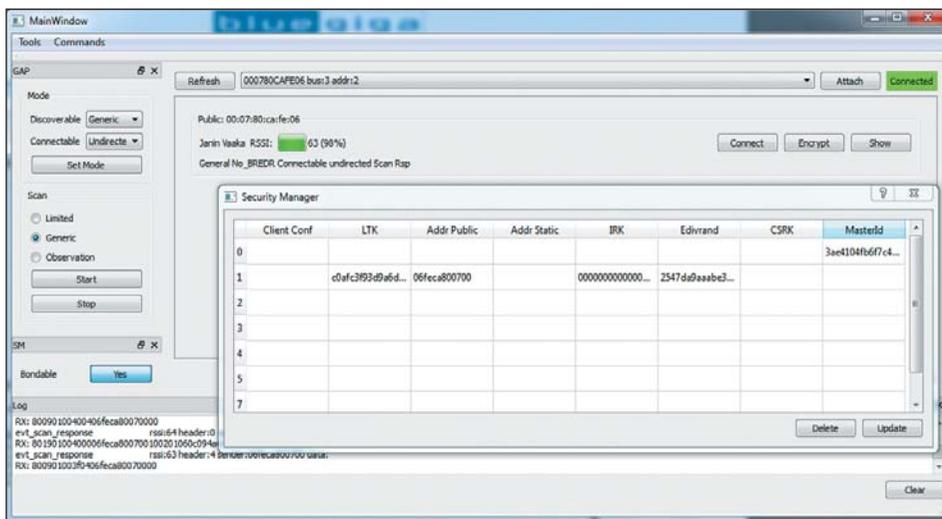


Рис. 7. Графический интерфейс программы BG Script

| Command | | | | | | |
|----------|-------|---------|--------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Length | Class | Command | Object | Parameters | | |
| 0x10 | 0x01 | 0x07 | 0x00 | BD_ADDR (6 bytes) | Connection interval (3 bytes) | Supervision time out (4 bytes) |
| Response | | | | | | |
| Length | Class | Command | Object | Parameters | | |
| 0x05 | 0x41 | 0x07 | 0x00 | handle (2 bytes) | | |

Рис. 8. Структура команд управления модулем BLE112 с помощью BG Profile Toolkit-BG Script

исключительной простотой. На графическом интерфейсе показаны подключенные модули, мощность сигнала, состояние менеджера безопасности, текущие события в реальном масштабе времени и другие характеристики BLE112.

Комплект ПО содержит готовые примеры и кодовые шаблоны для наиболее типичных приложений. Кроме того, по желанию пользователя Bluegiga может разработать прикладное ПО для любого индивидуального проекта. Это приложение будет отправлено пользователю в виде профиля, который легко подгружается в память модуля.

На рис. 8 приведен пример структуры команды, используемой BG Profile Toolkit-BG Script для установления соединения модуля BLE112 с удаленным внешним устройством.

На рис. 9 приведен пример реальной команды BG Profile Toolkit-BG Script, с помощью которой устанавливается соединение с устройством BA:DF:00:OD:CA:FC. Интервал соединения находится в промежутке 40–320 мс. Данные супервизора — 10:24 с. Если соединение установлено успешно, то будет получен ответ, показанный на рис. 10.

На рис. 11 приведен пример фрагмента программы для связи с Bluetooth-тонометром, написанной в формате Bluegiga-script.

В комплект ПО входит инструмент, позволяющий создавать приложения на GATT-уровне профиля BLE. В этом случае методы создания и формат приложений базируются на хорошо известной технологии XML (Xtensible Markup Language), используемой для разработки интернет-приложений. Встроенный компилятор позволяет преобразовывать XML-файлы

в BIN-формат. Фрагмент такой программы показан на рис. 12.

Программное обеспечение Profile Toolkit и BG Script поставляется в комплекте с оборудованием Bluegiga. Аналогичное ПО IAR Workbench for 8051, предназначенное для работы с ядром 8051 в чипсетах серии CC2540, поставляется фирмой IAR. На сайте этой фирмы можно бесплатно скачать 30-дневную тестовую версию [13].

Фирма Bluegiga выпускает программно-аппаратные отладочные комплекты. В состав стартового комплекта BLE112 Starter Kit входят:

- два модема BLE112 USB;
- два модуля BLE112;
- средства программирования для CC2540;
- комплект фирменного ПО Bluegiga для работы с модулем BLE112.

Отладочный комплекс BLE112 Evaluation Kit представляет собой законченную отдельную плату, которая содержит:

- модуль BLE112;
- полные интерфейсы RS232 и USB;
- тестовые внешние датчики с интерфейсами SPI/USART/AIO;
- линейку светодиодных индикаторов;
- клавиатуру;
- интерфейс доступа к пользовательским вводам/выводам;
- сетевой адаптер питания.

В комплекте с этим комплексом также поставляется и полный набор программного обеспечения Bluegiga.

Примеры практического использования BLE112

Серия Bluegiga BLE (Bluegiga Low Energy) позволяет производителям выйти на новый уровень

миниатюрных переносных Bluetooth-устройств с батарейным питанием. При этом отладочные средства Bluegiga позволяют адаптировать стек низкого энергопотребления для совместной работы с другими устройствами. Так, например, можно построить миниатюрные датчики для совместной работы с ноутбуками, смартфонами, портативными считывателями информации. В конце 2011 г. предполагается выпуск новых моделей со специальными уровнями Bluetooth, которые предназначены для работы с такими приложениями, как:

- информационная строка на наручных часах;
- датчики сердечного ритма;
- шагомеры;
- радионаблюдение;
- тонометры;
- глюкометры;
- медицинские весы;
- брелоки для ключей;
- датчики домашних хозяйственных устройств;
- датчики расхода воды, электричества, газа;
- датчики систем безопасности;
- беспроводные ключи;
- беспроводные банковские карточки;
- парковочные автомобильные датчики;
- клавиатуры, мыши и принтеры;
- гарнитуры для GPS-навигаторов.

Все эти приложения хорошо известны. Имеет смысл сказать несколько дополнительных слов об информационной строке на наручных часах. Уже сейчас эти аксессуары существуют в исполнении, где отдельной информационной строкой выводятся сообщения SMS или E-mail, поступившие на ваш ноутбук или

| Length | Class | Command | Object | Parameters |
|--------|-------|---------|--------|---|
| 0x10 | 0x01 | 0x07 | 0x00 | 0xFC 0xCA 0x0D 0x00 0xDF 0xBA 0x00 0x20 0x00 0x01 0x00 0x04 |

Рис. 9. Пример запроса модуля BLE112 на установление соединения с устройством BA:DF:00:OD:CA:FC

| Length | Class | Command | Object | Parameters |
|--------|-------|---------|--------|------------|
| 0x05 | 0x41 | 0x07 | 0x00 | 0x0001 |

Рис. 10. Пример ответа внешнего устройства на запрос модуля BLE112 об установке соединения

```

/* System initialization */
sub system_boot (version)
/* Begin advertizing and enable bonding mode */
gap_set_mode (2,2)
system_set_bondable_mode (1)
/* Configure IOs */
hardware_io_port_config_irq (0, 64, 0) end

/* Event listener for disconnect event */
sub connection_status (handle, flags, error, address, address_type, conn_interval, timeout, rssi)
/* Connection lost -> go back to advertizement mode */
gap_set_mode (2,2)
end

/* GPIO interrupt : calculate BPM value and write it to GATT DB */
sub hardware_io_port_status (delta, port, irq, state)
system_write_attribute (16, 2, 60*32768/delta)
end
    
```

Рис. 11. Листинг программы для связи с Bluetooth-тонометром, написанной в формате Bluegiga-script

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
- <configuration>
+ <service>
  <uuid>3a00</uuid>
  <description>Heartrate Service</description>
  - <characteristic id="heartrate">
    - <properties>
      <read />
      <notify />
    </properties>
    <uuid>3a01</uuid>
    <value type="UINT8" />
    <description>Beats per minute</description>
  </characteristic>
  - <characteristic id="rr_interval">
    + <properties>
      <uuid>3a02</uuid>
      <value type="UINT16" />
      <description>R-R Interval</description>
    </characteristic>
  - <characteristic>
    <uuid>3a03</uuid>
    + <properties>
      <value type="SFLOAT" unit="kJ" />
      <description>Energy Expended</description>
    </characteristic>
  - <characteristic>
    <uuid>3a04</uuid>
    + <properties>
      <value type="UINT8" />
      <description>Sensor Status</description>
    </characteristic>
  + <characteristic type="aggregate" />
</service>
</configuration>
    
```

Рис. 12. Пример фрагмента программы для связи с Bluetooth-тонометром в формате XML

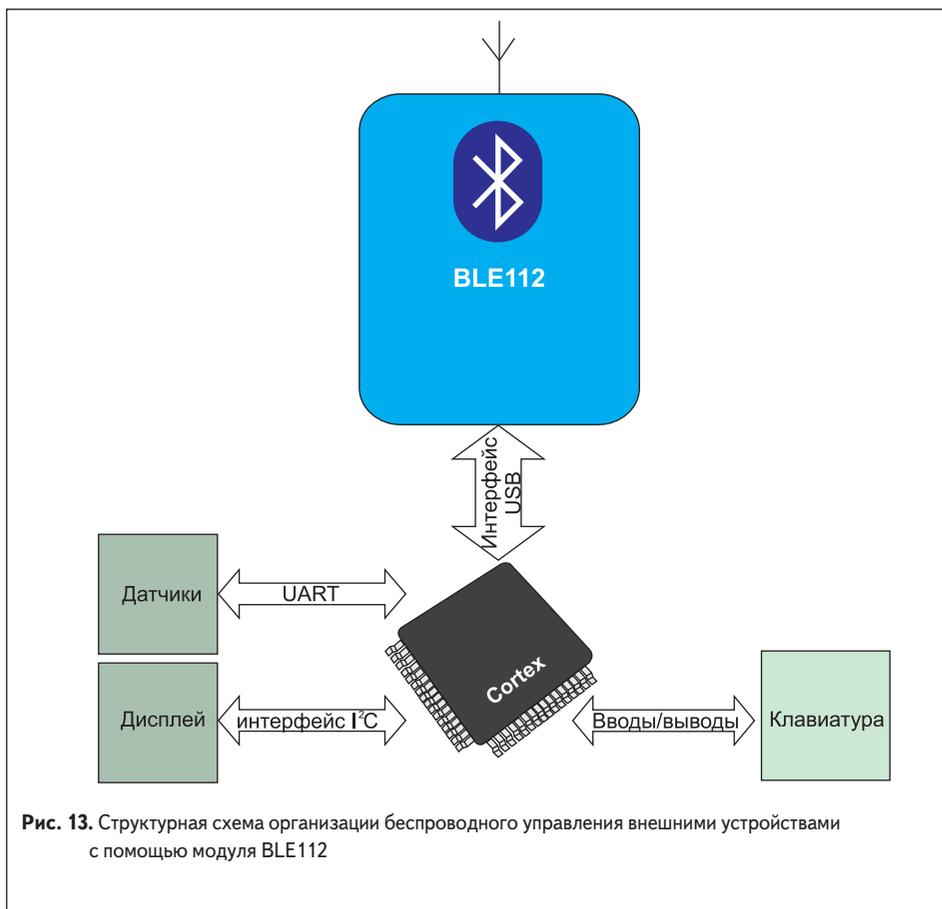


Рис. 13. Структурная схема организации беспроводного управления внешними устройствами с помощью модуля BLE112

смартфон. На наручные часы они дублируются по Bluetooth-каналу. Развитие подобных устройств сдерживалось из-за достаточно большого энергопотребления в Bluetooth-модулях предыдущих версий.

На рис. 13 приведен пример использования модуля BLE112 для управления внешним микроконтроллером, который, в свою очередь, координирует работу периферийных устройств. Структура организации беспроводного управления через Bluetooth-канал аналогична предыдущим решениям Bluegiga, в которых использовались модули WT11 и WT12, управляемые с помощью ASCII-команд и интерфейс iWRAP. В новых модулях вместо этих команд управление реализовано через бинарные команды. Продолжая развитие основной своей идеи «Bluetooth — это просто», Bluegiga вместо интерфейса iWRAP разработала новые средства

BG Profile Toolkit, BG Script. Эти законченные программные комплексы дают возможность разработчикам, не имеющим опыта работы с программированием Bluetooth-модулей, быстро и без особого труда создавать управляющие программы в форматах XML и BG Script.

Перечисленные выше направления возможных приложений BLE имеют огромный потребительский рынок. Поэтому будущее технологии Bluetooth 4 представляется достаточно перспективным. По оценкам специалистов, продукция с поддержкой Bluetooth 4.0 BLE, Dual-mode в ближайшие годы вытеснит с рынка оборудование, поддерживающее только предыдущие версии 1–3.

В настоящее время в серии BLE Bluegiga поддерживается только режим работы Single-mode. Модули выпускаются в модификациях со встроенной антенной и с разъемом для подключения

внешней антенны. Компания планирует выпустить в продажу модули BLE Bluegiga с поддержкой Dual-mode во второй половине 2011 г.

Технология низкого энергопотребления Bluetooth 4.0 является открытым стандартом, разработанным группой SIG для общего пользования. При разработке стандарта технология тестировалась на совместимость практически со всеми устройствами известных мировых производителей Bluetooth-оборудования. Поэтому у разработчиков, использующих серию BLE, не должно быть сомнений в том, что их оборудование не будет конфликтовать с другими изделиями, удовлетворяющими протоколам Bluetooth 4.

На сайтах [2, 14] можно посмотреть видеоклипы, иллюстрирующие различные области применения Bluetooth 4.

Модули серии BLE112 будут одними из наиболее дешевых среди других изделий Bluegiga. Так, например, предполагается, что ориентировочная цена на большие заказы (от 10 000 шт.) составит около \$10. ■

Литература

- <http://www.bluetooth.com>
- <http://www.bluetooth.com/Pages/Low-Energy.aspx>
- Texas Instruments: 2.4-GHz Bluetooth® low energy System-on-Chip. CC2540F128, CC2540F256, SWRS084. October 2010.
- Bluegiga, BLE112 Preliminary Data Sheet. 28 January 2011. Version 0.91.
- Nordman T. BLE112 Bluetooth® low energy module. Bluegiga Partner Briefing and Product Presentation. Finland. 2011.
- Texas Instruments. CC2540, Bluetooth® Low Energy. Software Developer's Guide v.1.0.
- <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/smartrfstudio.html>.
- Texas Instruments. SmartRF® Studio. User Manual. Rev. 6.13.1.
- TI. SmartRF HANDS ON User Manual.
- TI. Register View in SmartRF® Studio.
- TI. SmartRF™ Studio 7. Overview. Low Power RF Development Tools.
- Bluetooth® Low Energy, CC2540. Mini Development Kit. User's Guide.
- IAR Embedded Workbench® for 8051. <http://www.iar.com/website1/1.0.1.0/244/1/>.
- <http://www.ti.com/ww/en/analog/bluetooth/index.htm?DCMP=BluetoothLowEnergy&HQ S=NotApplicable+OT+bluetoothlowenergy>.