

Реализация преимуществ интерфейса Bluetooth во встроенных системах

Пётр Павлов (Москва)

Цифровые программируемые системы управления постепенно вытесняют контроллеры с жёсткой логикой. При этом в специализированных встроенных системах всё чаще используются компьютерные архитектуры, т.е. вычислительные модули на основе одноплатных компьютеров с архитектурой процессоров x86 и системами ввода/вывода на основе стандартных интерфейсов ПК. Одним из таких интерфейсов, внедряемых в промышленные встроенные системы, является Bluetooth.

ВВЕДЕНИЕ

Использованию интерфейса Bluetooth в промышленных приложениях способствует то, что при создании всех его версий специальное внимание уделяется преемственности и обеспечению целостности передачи данных. Уже в версии 1.2 была реализована технология адаптивной перестройки рабочей частоты, увеличена скорость передачи и добавлена технология сохранения целостности данных посредством повторения повреждённых пакетов.

В технологии Bluetooth предусмотрен механизм запроса уведомления передающего узла об успешности или сбое при передаче данных. Для этого в заголовке имеется 1-битовое поле автоматического запроса на повторение (Automatic Repeat Request, ARR). Правильность приёма данных проверяется с помощью стандартной технологии циклического избыточного кода (CRC), который вычисляется до передачи пакета на основе его содержания.

Говоря о пакетной передаче в стандарте Bluetooth, необходимо отметить наличие в ней DH- и DM-пакетов, ориентированных на различные скорости передачи данных. Пакеты типа DH5 могут включать наибольший объём данных, однако при заданном уровне BER = 0,04% они лишь с вероятностью 33% будут приняты без ошибки, что фактически втрое снижает теоретически достижимую для этого типа пакетов скорость передачи данных. В то же время пакеты типа DM5, поддерживающие на треть меньшую скорость передачи, обеспечивают её без деградации до уровня BER = 0,4%.

В стандарте Bluetooth предусмотрен механизм «интеллектуального» выбора типа пакета для передачи данных в зависимости от уровня помех в канале связи, получивший название CQDDR (Channel Quality Driven Data Rate). Механизм CQDDR позволяет приёмному узлу «договориться» с передающим узлом об изменении типа пакетов, используемых для передачи данных. При росте BER и ухудшении статистики ошибок происходит переключение на DM-пакеты, и, наоборот, при снижении уровня помех в канале вновь начинают использоваться «быстрые» пакеты.

В версии спецификации Bluetooth 2.0 основным нововведением стала поддержка технологии Enhanced Data Rate, позволившей утроить скорость передачи данных (теоретически – до 3 Мбит/с, реально – до 2,1 Мбит/с). Микросхемы, поддерживающие протокол EDR, потребляют меньше энергии и способны поддерживать большее число приложений по сравнению с версией Bluetooth 1.2.

В спецификацию Bluetooth 2.1 добавлена технология расширенного запроса характеристик устройства и энергосберегающая технология Sniff Subrating, которая позволяет увеличить продолжительность работы устройства от аккумулятора в 3...10 раз. Это достигается за счёт «интеллектуализации» процедуры обмена сообщениями о сохранении работоспособности устройств в сети: вместо оповещений с частотой несколько раз в секунду, устройства, поддерживающие Bluetooth 2.1, могут посылать такие сообщения один раз в 5...10 с.

Кроме того, спецификация Bluetooth 2.1 существенно упрощает и ускоряет

установление связи между двумя устройствами, позволяет производить обновление ключа шифрования без разрыва соединения, а также делает указанные соединения более защищёнными благодаря использованию технологии Near Field Communication (NFC). В основе системы информационной безопасности Bluetooth лежит сеансовый ключ, который создаётся в момент соединения и затем используется для шифрования и идентификации передаваемого трафика. При необходимости разработчик может шифровать трафик на уровне приложений.

В стандарте Bluetooth уделено большое внимание достижению совместимости оборудования от разных поставщиков при работе в единой системе, а также возможности работы устройств Bluetooth в единой коммуникационной среде с другими беспроводными интерфейсами (в первую очередь, с устройствами 802.11).

В качестве примера промышленного приложения интерфейса Bluetooth можно привести систему сбора данных (data logger) BlueCenter DL141E, которая позволяет собирать данные с производительностью до 51,6 Квыборок/с; систему связи Bluetooth I/O компании Phoenix Contact, обеспечивающую двунаправленную передачу/приём 16 цифровых и двух аналоговых сигналов между двумя станциями на расстояние до нескольких сотен метров; систему программирования контроллеров Bluetooth Management System компании Schneider Electric, устанавливаемых на вышках высоковольтных линий передачи электроэнергии, а также систему программирования контроллеров аварийных состояний на линиях передачи электроэнергии (Circuit Breaker), используемую компанией ABB.

Важной характеристикой любого беспроводного интерфейса является энергопотребление, которое не должно быть чрезмерным. Помимо связанных с энергопотреблением скорости передачи данных и достижимой дальности передачи, на привлекательность интерфейса для разработчиков влияет

наличие технологии поддержки целостности передачи данных и их защиты от несанкционированного считывания.

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ BLUETOOTH

К моменту написания статьи стандартизирующая Bluetooth организация – Bluetooth Special Interest Group – представила версию спецификации Bluetooth 3.0, которая обеспечит скорость в несколько раз больше 3 Мбит/с (2.0), что достаточно для передачи практически любых звуковых, графических и видеоданных.

В промышленных приложениях возрастающая скорость интерфейса Bluetooth может оказаться востребованной не только в связи с растущей популярностью графических интерфейсов, но и благодаря возможности одновременно использовать несколько Bluetooth-соединений одновременно (протокол EDR).

Вследствие интерференционных эффектов теоретический максимум пропускной способности редко достижим для беспроводной сети. Поэтому для поддержания приемлемого каче-

ства обслуживания (QoS) 40...50% составляют достаточный резерв пропускной способности. Протокол EDR уже сейчас решает задачу создания такого резерва для некоторых многоканальных приложений.

Но протокол EDR не только обеспечивает поддержку одновременной работы нескольких приложений по управлению, но и создаёт предпосылки для проектирования устройств с низким энергопотреблением. Поскольку потребление энергии пропорционально времени работы, протокол EDR, утраивая скорость передачи данных по сравнению с Bluetooth 1.2, уменьшает время нахождения системы в активном состоянии. Одним из требований к протоколу EDR было обеспечение обратной совместимости с оборудованием, созданным на основе стандарта Bluetooth 1.2. После принятия спецификации Bluetooth 2.0+EDR была обеспечена возможность построения сетей, в которых работают устройства разных поколений.

Протокол EDR

Особенностью протокола EDR является наличие дополнительных типов пакетов и использование новой моду-

ляционной схемы для передачи данных. Пакеты Bluetooth для стандартных скоростей передачи разбиты на четыре части:

- Access Code – код доступа, который позволяет получающему устройству распознать входящую передачу данных;
- Header – заголовок, который определяет тип пакета и его длину;
- Payload – данные;
- Inter-Packet Guard Band – информация о переходе на следующую частоту передачи.

В спецификации Bluetooth 1.2 все три передаваемых раздела используют технологию GFSK (Gaussian frequency-shift keying) для модуляции радиосигнала. При таком способе модуляции несущая частота изменяется на ± 160 кГц для индикации лог. 1 или лог. 0 и на один символ затрачивается один бит. Скорость передачи составляет 1 Мсимвол/с, что соответствует теоретической максимальной скорости передачи данных в 1 Мбит/с. Однако в связи с необходимостью передачи служебной информации в разделах Access Code, Header и Inter-Packet Guard Band реальная полезная пропускная способ-

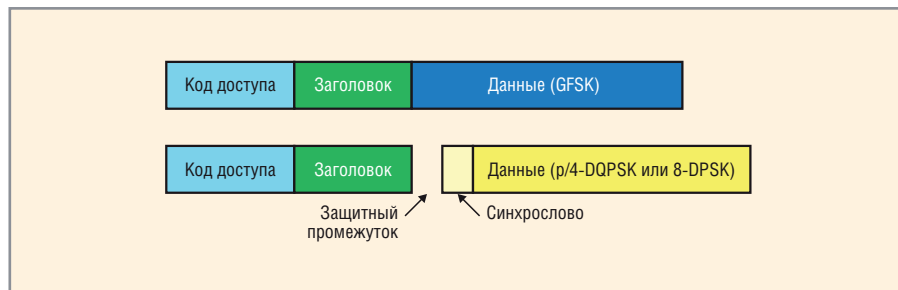


Рис. 1. Структура пакета EDR

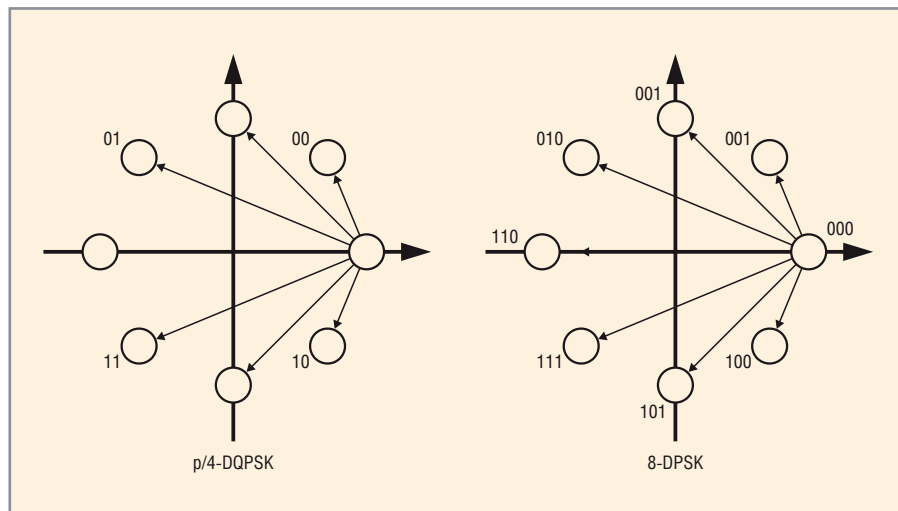


Рис. 2. Диаграммы направленности для схем модуляции 4-DQPSK и 8-DPSK

ность канала (payload data rate) не превышает 723 Кбит/с.

В спецификации Bluetooth 2.0 в пакетах EDR по-прежнему используется GFSK-модуляция для разделов Access Code и Header. Однако для передачи данных можно использовать два типа модуляции. При этом в новом протоколе приходится помещать небольшие последовательности, служащие для синхронизации и создания защитных промежутков Guard Band (см. рис. 1).

Повышение скорости передачи до 2 и 3 Мбит/с

Удвоение скорости передачи данных до 2 Мбит/с достигается за счёт технологии p/4-DQPSK (p/4 Differential Quaternary Phase-Shift Keying). Поскольку для каждого символа возможны четыре значения фазы, два бита информации возможно кодировать одним символом, что обуславливает двукратное увеличение скорости передачи данных. Модуляция p/4-DQPSK является дифференциальной, т.к. определяет фазовую позицию каждого символа относительно предыдущей позиции. Обозначение p/4 означает, что дифференциальный сдвиг составляет $\pm 3\pi/4$, $\pm\pi/4$, $\pi/4$ или $3\pi/4$ ($+135^\circ$, $+45^\circ$, -45° или -135°).

Теоретически возможны восемь фазовых позиций, разделённых интервалом 45° . Тем не менее, при разработке протокола EDR для кодирования символов были выбраны только позиции, разделённые интервалом 90° (см. рис. 2).

Утроенная скорость передачи данных (3 Мбит/с) достигается за счёт использования восьмиуровневой дифференциальной фазовой модуляции (8-phase Differential Phase-Shift Keying или 8-DPSK), в которой дифференциальный сдвиг обеспечивается на восемь возможных фазовых «уровней», разнесённых на 45° (см. рис. 2).

Передача сигнала с использованием 8-DPSK-модуляции более чувствительна к интерференционным помехам. Тем не менее, пиковая теоретическая скорость передачи данных по протоколу EDR может достигать 3 Мбит/с за счёт кодирования трёх битов данных одним символом.

«Быстрые» пакеты

Спецификация Bluetooth 2.0 определила десять новых пакетов данных: по пять для удвоенной и утроенной скорости передачи соответственно. Два из пяти пакетов предназначены для синхронного соединения и имеют три и

пять слотов (Synchronous Connection Oriented или eSCO). Их использование подразумевает наличие резервов полосы пропускания. Эти пакеты предназначены в основном для передачи голоса. Для асинхронной передачи данных предназначены пакеты с 1, 3 и 5 слотами (Asynchronous Connection-Less/ACL packets).

В новых пакетах не предусмотрена прямая коррекция ошибок (Forward Error Correction, FEC). Вместо этого расширены возможности существующего алгоритма управления скоростью передачи данных для поддержания качества передачи (алгоритм CQDDR). При необходимости последний обеспечивает переключение режима передачи в стандартный режим с поддержкой механизма FEC.

Интересным аспектом спецификации Bluetooth 2.0 является идентификация новых EDR-пакетов в заголовке (packet header), что позволяет приёмнику определять момент смены типа модуляции при переходе от заголовка пакета к его содержимому.

В заголовке пакета зарезервировано четыре бита для его идентификации. Этого достаточно для описания 15 типов пакетов, определённых спецификацией Bluetooth 1.1. Однако добавление 10 новых типов пакетов протокола EDR и трёх дополнительных eSCO-пакетов, поддерживаемых при стандартной скорости передачи данных (Bluetooth 1.2), исчерпывает ресурсы заголовка. Решение найдено введением «режима связи в канале» и созданием нового типа сообщения, которым узлы, поддерживающие режим EDR, обмениваются для переключения между режимами. Один из режимов связи характеризуется скоростью передачи 1 Мбит/с, соответствующей стандартной.

При работе узлов, поддерживающих протокол EDR, последние могут обмениваться сообщениями, подтверждающими их «согласие» на обмен данными со скоростью от 2 до 3 Мбит/с. В этих режимах одинаковая кодировка в заголовках пакетов интерпретируется по-разному. Например, в режиме, характеризующемся скоростью 1 Мбит/с, код 1011 обозначает трёхслотовый пакет, передаваемый на стандартной скорости без коррекции ошибок; в режиме работы со скоростью от 2 до 3 Мбит/с код 1011 обозначает трёхслотовый пакет, передаваемый на утроенной скорости.

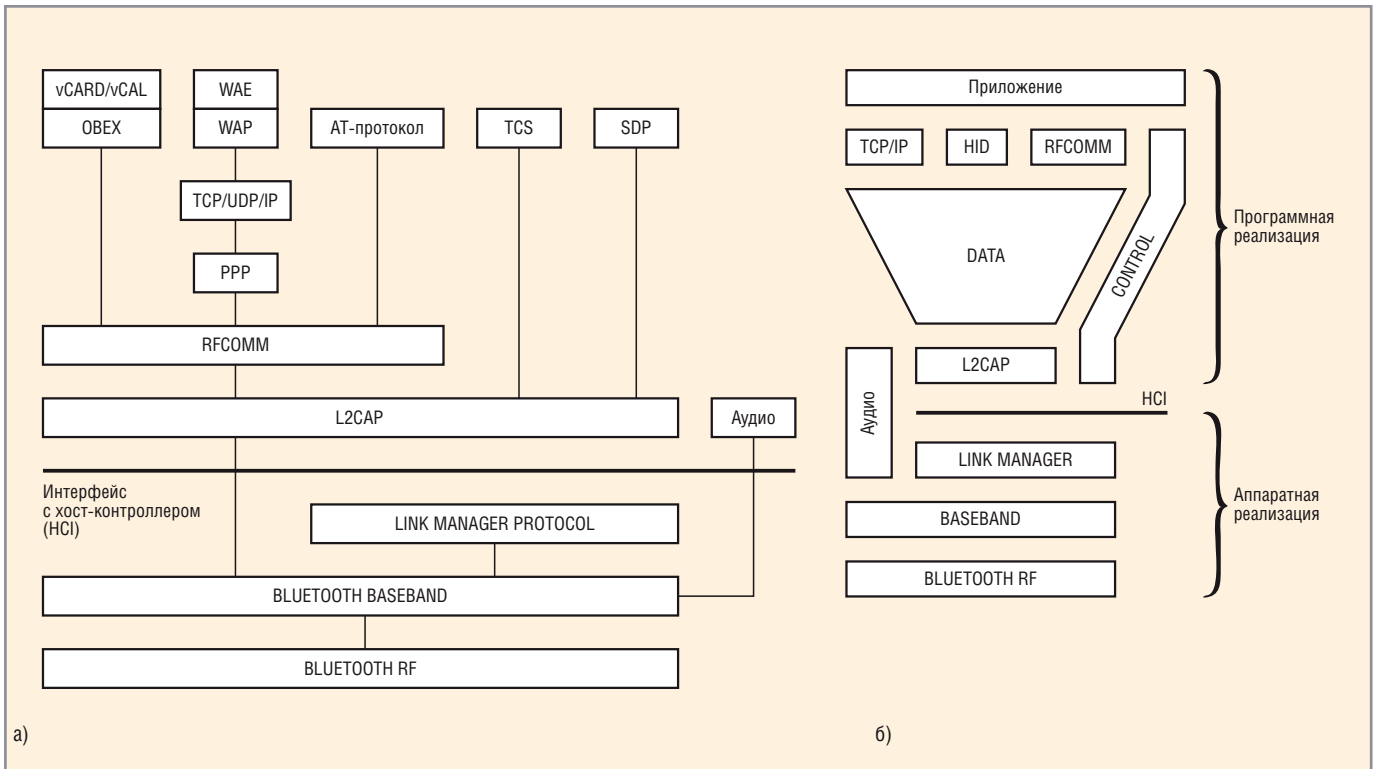


Рис. 3. Стек протоколов Bluetooth и принципы его реализации

Всё вышесказанное относится к уровням стека протоколов Bluetooth, расположенным ниже интерфейса HCI (Host Controller Interface) (см. рис. 3), и реализовано в специализированных ИС.

Воплощение интерфейса Bluetooth в «кремнии»

Продукты Bluetooth предлагаются на рынке как в виде ИС, так и в виде модулей, объединяющих несколько микросхем. В качестве примера можно рассмотреть микросхему PMB8753 компании Infineon, которая имеет блок-схему, изображённую на рисунке 3б. Микросхема PMB8753 содержит (см. рис. 4) универсальный процессор на основе ядра ARM7, который позволяет реализовать программный уровень (см. рис. 3б), а также специализированную связку процессора и трансивера, поддерживающую интерфейс Bluetooth на основе спецификации Bluetooth 2.0+EDR.

Важной особенностью ИС типа PMB8753 является аппаратная поддержка в соответствии со стандартом IEEE 802.15.2 (Packet Traffic Arbitration) «бесконфликтной» работы систем на её основе в случае их одновременного подключения к сети Bluetooth и к беспроводной локальной сети (WLAN): схема контроля ИС не допускает одновременную работу радиоканалов WLAN и Bluetooth.

Предварительное воплощение идей, заложенных в спецификацию Bluetooth 3.0, можно рассмотреть на примере микросхемы BCM2070 компании Broadcom (BCM2070 Bluetooth Processor) – однокристального решения на основе спецификации Bluetooth 2.1+EDR. В этой ИС реализованы:

- поддержка спецификаций Bluetooth 1.1, 1.2, 2.0 и 2.1, включая передачу данных со скоростью 1, 2 и 3 Мбит/с на основе протокола EDR;
- набор интерфейсов UART, USB, H4, H5, USB, SDIO, I²C и возможность работы с флэш-памятью по последовательному или параллельному интерфейсам;
- возможность поддержки приложений, которым необходимо работать в сетях WLAN и WiMAX;
- специальная схема маршрутизации пакетов для поддержки пяти одновременно работающих звуковых потоков (служба bluetooth voice базового стандарта может одновременно передавать три звуковых потока).

Для OEM-производителей промышленных встроенных систем компания lesswireAG в качестве универсального модуля связи Bluetooth предлагает плату BlueSy, которая позволяет интегрировать во встроенную систему интерфейс на основе спецификации Bluetooth 2.0+EDR, обеспечивающий связь на расстоянии до 500 м с временем задержки до 5 мс. В основе конструкции

платы BlueSy лежит набор ИС CSR-BC04 и ядро процессора ARM7 (см. рис. 5).

Особенностью данного модуля являются «промышленные» характеристики дальности связи и времени задержки при умеренном энергопотреблении (3,3 В/140 мА (макс.)). Конструктивные особенности модуля BlueSy компании lesswireAG приведены в таблице.

По данным IMS Research, рынок Bluetooth-микросхем растёт, а цены на кристаллы падают (снижение цен может составить 40% до 2013 г.). Лидерами рынка «кремния» для Bluetooth являются компании CSR, Broadcom и Texas Instruments. По данным IDC, в 2008 г. объём рынка Bluetooth-микросхем составил 1,9 млрд. долл. и может достичь 2,2 млрд. долл. в 2009 г. Эксперты компании IDC предполагают, что продажи на этом сегменте рынка в период 2007–2012 гг. вырастут с 1,7 млрд. долл. до 3,3 млрд. долл.

Значительная доля этого рынка определяется потребительской электроникой и компьютерной техникой, однако разработчики промышленных приложений всё чаще обращают внимание на технологию Bluetooth. Этот рынок выглядит привлекательным для новых компаний развивающихся рынков благодаря не только своей ёмкости, но и открытости стандарта Bluetooth, и организационной опеке развития стандарта со стороны Bluetooth Special Interest

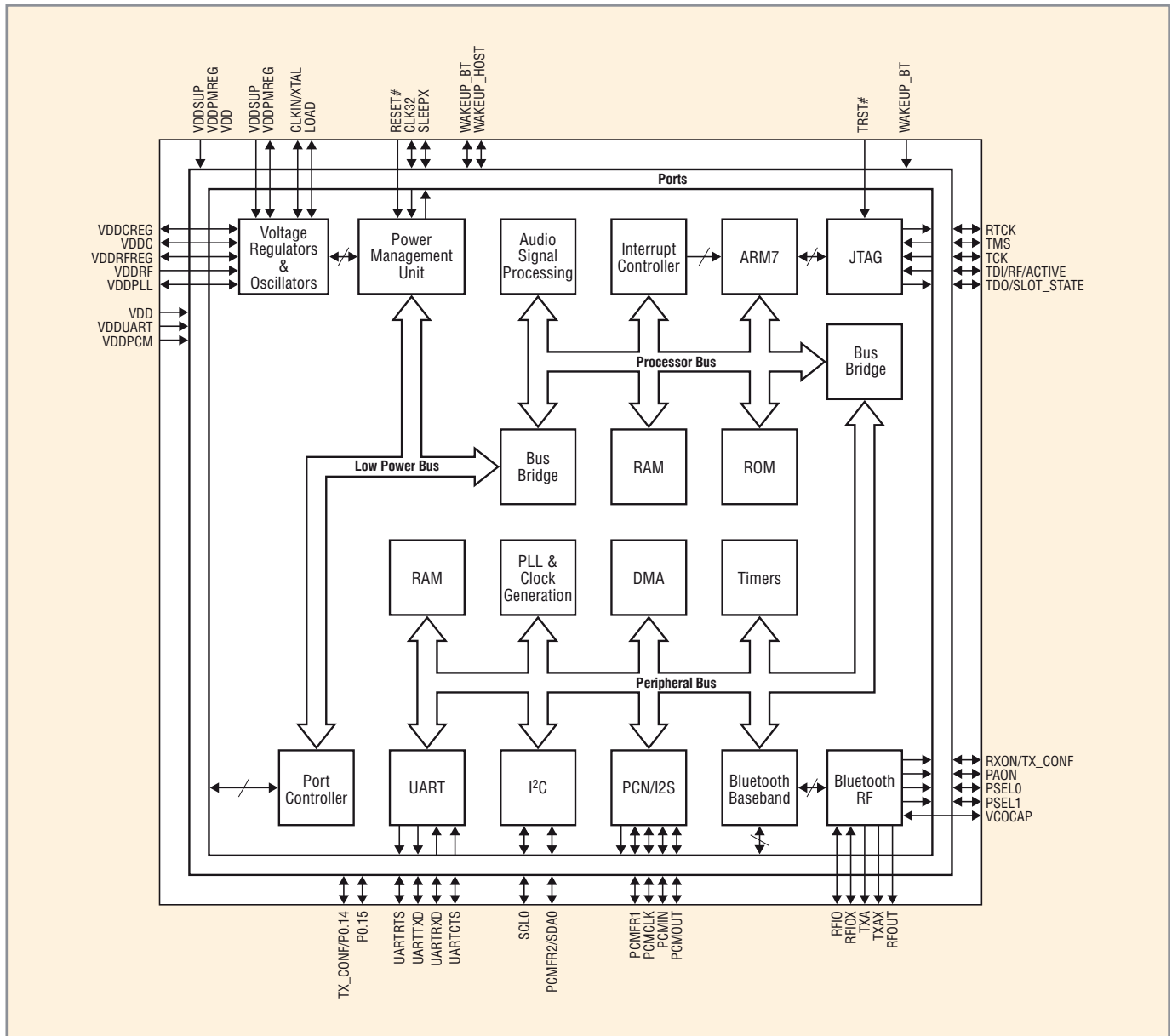


Рис. 4. Блок-схема интегральной микросхемы PMB8753 компании Infineon

Group. Заботами этой организации обеспечивается совместимость реализаций технологии Bluetooth в микросхемах и модулях разных производителей за счёт стандартизации т.н. профилей – протоколов и функций, через которые Bluetooth-устройства

взаимодействуют с другими устройствами.

Основой для создания всех профилей служит профиль общего доступа (Generic Access Profile, GAP). Профили передачи данных строятся на базе профиля Generic Object Exchange Profile (GOEP),

который основан на протоколе обмена объектами OBEX (Object EXchange). Профиль File Transfer Profile (FTP) обеспечивает доступ к файлам, поддерживая стандартный набор команд FTP. Профиль Human Interface Device Profile (HID) отвечает за работу с джойстиком, клавиатурой и т.п. Стандартное соединение по RS-232 позволяет реализовать профиль Serial Port Profile (SPP), а профиль Personal Area Networking Profile (PAN) обеспечивает использование протокола Bluetooth Network Encapsulation в качестве транспортного через канал Bluetooth. Всего существует около трёх десятков профилей, охватывающих наиболее популярные задачи; их набор постоянно пополняется.

Если говорить о конкретных участниках рынка встраиваемых Bluetooth-систем для промышленных приложений, то, наряду с несколькими десятками ки-

Конструктивные особенности модуля BlueSy компании lesswireAG

Bluetooth Radio	Class 1
Выходная мощность	Макс. +21 дБм (Class 1) (регулируемая)
Чувствительность на входе	-94 дБм (типичное значение), BER < 0,1%
Рабочие температуры	-40...85°C
Питание	3,3 В/140 мА (макс.)
Обновление микропрограммы	Через порт SPI
Информационная безопасность	PIN Code
Уровень защиты	Security level 3 (защита инициализируется в процессе установления и настройки соединения; в случае, если второе устройство не может выполнить требования безопасности, соединение разрывается)
Шифрование	128-битное
Габариты, мм	45,0 × 20,0 × 3,0

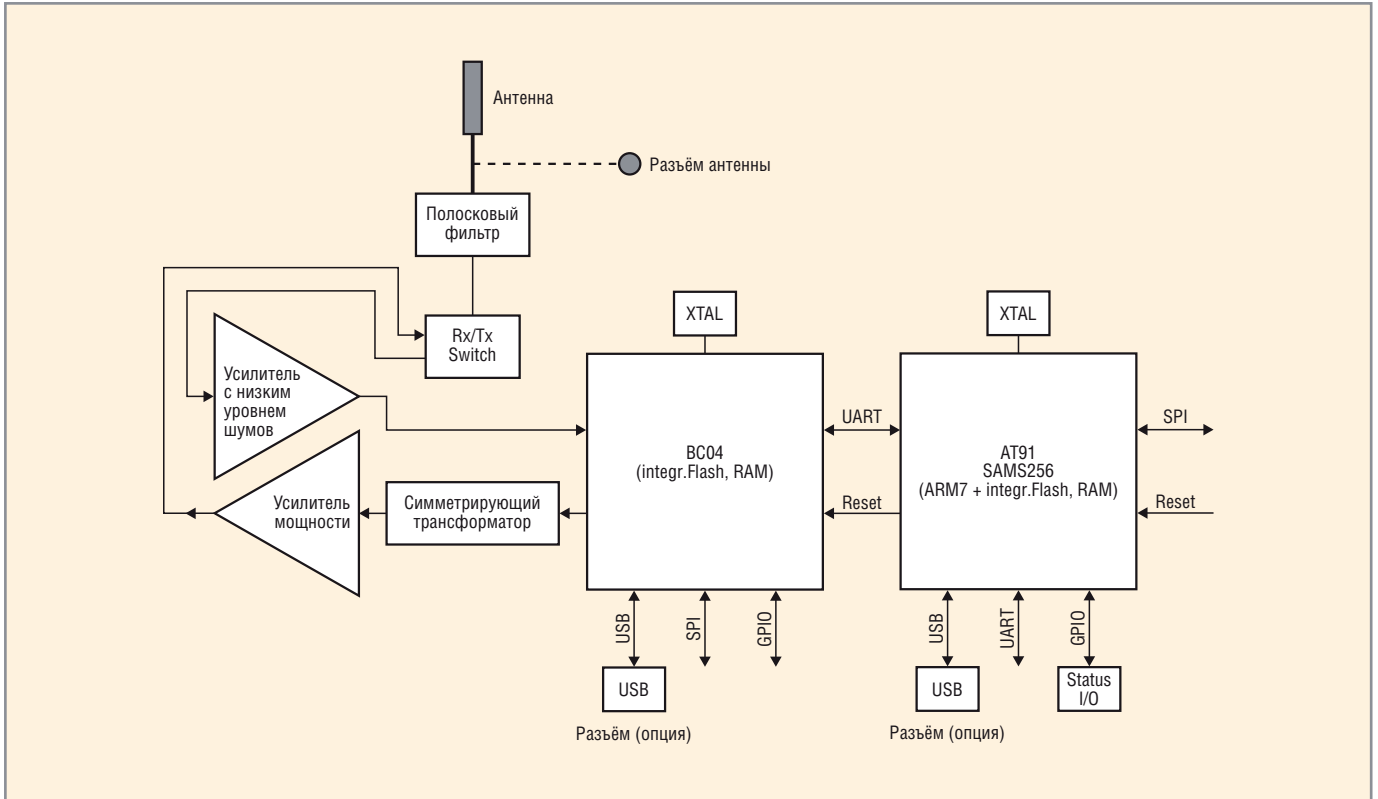


Рис. 5. Блок-схема универсального модуля связи Bluetooth для OEM производителей компания lesswireAG

тайских компаний (<http://www.global-sources.com/gso1/I/Bluetooth-module-manufacturers>), на нём присутствуют

компании из Европы и США: lesswireAG из Германии, финская Bluegiga, Grid Connect из США и ряд других, существующих

на рынке столько же времени, сколько существует сам стандарт Bluetooth.