

Интерфейс USB во встраиваемых системах: применения, достоинства, ограничения, перспективы

Пётр Павлов (Москва)

В статье дана объективная картина развития технологии USB, представлены рыночные и дизайнерские тенденции, показано, почему в ближайшее время эта технология будет находить всё более широкое применение во встраиваемых приложениях.

Последовательные технологии для передачи данных стали одним из инструментов SWaP-оптимизации встраиваемых систем. SWaP (Size, Weight and Power – габариты, масса и энергопотребление) – относительно новая аббревиатура, превратившаяся по сути в термин. Его появление указывает на важность комплексного решения задачи минимизации массогабаритных характеристик и энергопотребления встраиваемых систем. Одним из инструментов для решения этой задачи стали современные технологии последовательной передачи данных. Они не только обеспечивают высокую пропускную способность, но и компактны в «кремневой» реализации, имеют малогабаритные разъёмы, а также зачастую поддерживают управление питанием. Одной из таких технологий является USB (Universal Serial Bus – универсальная шина для последовательной передачи данных).

Предлагаемые сегодня материнские платы для промышленных компьютеров имеют 6 – 8, а в ряде конструкций и более десятка портов USB. Интерфейс USB 2.0 поддерживается всеми пятью спецификациями разъёмов одноплатных компьютеров стандарта COM Express и стандартом COMIT (Computer-On-Module Interconnect Technology – технология подключения COM-модулей). Он включён в спецификацию SUMIT (Stackable Unified Module Interface Technology – унифицированная интерфейсная технология для «этажерочных» конструкций встраиваемых систем), в новый стандарт COM-модулей QSeven и в спецификацию MiniBlade. Последняя спецификация позволяет интегрировать в состав встраиваемой системы твердо-

тельный накопитель или расширить систему ввода/вывода.

Технологии StackableUSB и MiniBlades позволяют использовать интерфейс USB в приложениях рынка встраиваемых систем для жёстких условий эксплуатации. Для подобных приложений предлагаются также решения на основе кабельного подключения по технологии USB модулей форм-фактора PC/104. При этом используются специальные разъёмы, обеспечивающие большое усилие для механического формирования контакта.

Интерфейс USB является иерархическим и использует разделение устройств на «ведущие» (host, «мастер») и «ведомые» (slave, device). Сегодня функции хоста USB (Host USB) поддерживаются не только компьютерными процессорными платформами и специализированным «кремнием» для ПК и одноплатных COTS-компьютеров (Commercial Off-The-Shelf – готовые к применению модули коммерческого исполнения) для встраиваемых систем, но и COTS-микроконтроллерами, что позволяет интегрировать технологию USB практически в любую встраиваемую систему. Для интеграции USB-технологии во встраиваемую систему требуется микроконтроллер, поддерживающий режимы USB Host или USB On-The-Go (OTG). Последний позволяет одному и тому же устройству выступать как в роли хоста, так и в роли «ведомого» устройства. Микроконтроллер, поддерживающий только режим USB Device, может быть использован лишь для создания периферийных (подключаемых, «ведомых») подсистем. В качестве примера микроконтроллеров, поддерживающих возможность создания хоста технологии USB во встраиваемой системе можно на-

звать микроконтроллеры PIC24F (16-разрядные) и PIC32 (32-разрядные) компании Microchip Technology. После приобретения компанией Texas Instruments линейки ARM-микроконтроллеров компании Luminary Micro (вместе с самой компанией) Texas Instruments вошла в число главных поставщиков микроконтроллерных USB-платформ для интеграции этой технологии во встроены системы. Речь идёт о семействах LM3S3000 и LM3S5000, поддерживающих режимы USB On-The-Go и USB Host/Device.

Дополнительным достоинством многих из таких современных микроконтроллеров является их программируемость на языке C, что упрощает написание приложения. И уж совсем облегчается подобная задача при использовании готовых программных модулей, реализующих работу протоколов USB, файловой системы (FAT16 или FAT32) и т.п. В этом случае первая итерация по написанию приложения занимает считанные часы, тогда как написание кодов «с нуля» может потребовать нескольких месяцев. В качестве примеров коммерческих программных стеков для поддержки технологии USB во встраиваемых системах можно назвать пакет smxUSB от компании Micro Digital, предназначенный для ряда микроконтроллеров компаний Atmel, NXP, Freescale, или же набор программного обеспечения CMX-USB от компании CMX Systems для микроконтроллеров Atmel (микроконтроллеры SAM9, RM92XX), NXP (микроконтроллеры LPC2XXX), Freescale (микроконтроллеры ColdFire), программное обеспечение Stellaris USB Library, которое компания TI предлагает для линейки микроконтроллеров, приобретённой вместе с Luminary Micro.

ИНТЕРФЕЙС USB В ОДНОПЛАТНЫХ КОМПЬЮТЕРАХ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Помимо разработок встраиваемых систем, использующих возможности

интерфейса USB, что называется, «с чистого листа», возможна интеграция таких систем на основе одноплатных компьютеров класса COTS. Их конструкция включает несколько (6 – 8), а в ряде промышленных материнских плат и более десятка портов USB, внутренних и внешних. Два-три порта USB 2.0 в таких изделиях – скорее исключение, чем правило. До восьми портов USB 2.0 поддерживают модули формата COM Express ETXexpress-PM от Kontron, пять портов USB 2.0 можно найти на одноплатных компьютерах TP A40/30x формата 3U CompactPCI компании Concurrent Technologies, шесть портов USB 2.0 имеет модуль CC40x компании General Micro Systems (это также одноплатный компьютер формата 3U CompactPCI). Одноплатный компьютер F19P на основе стандарта CompactPCI Plus (форм-фактор 3U) в стандартной комплектации поддерживает фронтально два порта USB 2.0, а четыре порта USB 2.0 отведены в его конструкции для тыльного подключения. Спроектированная под процессор Intel Atom Z530/1,6 ГГц и чипсет Intel US15, материнская плата KTUS15 форм-фактора Mini-ITX имеет восемь портов USB 2.0, а у материнской платы KTGM45/mITX на основе чипсета (Intel Mobile 82GM45 + ICH9EM) их уже 12 (8 внутренних и 4 внешних).

Интерфейс USB стал обязательным компонентом современных стандартов встраиваемых плат компактных габаритов (Small Form Factor Board, SFFB). Спецификация разъёма SUMIT (Stackable Unified Module Interface Technology – технология построения коммуникаций в системе унифицированных модулей при создании «этажерочных» (stackable) конструкций встраиваемых систем) поддерживает технологию USB. Стандарт QSeven предусматривает использование шести интерфейсов USB 2.0.

В задачах внешнего подключения интерфейс USB всё чаще заменяет во встраиваемых системах промышленного уровня устаревшие интерфейсы COM (RS232/422/485), LPT, PS/2. Интерфейс USB превратился в универсальную технологию подключения как стандартных периферийных подсистем (например, клавиатуры), так и специализированного внешнего оборудования, вроде считывателя штрих-кодов или специализированной системы сбора данных. Стандарт RNDIS

(Remote Network Driver Interface Specification – спецификация интерфейса драйвера для работы с сетью в дистанционном режиме) позволяет эмулировать технологию Ethernet на основе USB-интерфейса. Эта спецификация не включена в базовый стандарт USB, однако она поддерживается такими операционными системами, как Windows и Linux. Используя специальный драйвер для поддержки технологии RNDIS, можно обеспечить интерфейс стека протоколов USB со стеком протоколов TCP/IP, поддерживающих web-сервер USB-устройства. При этом браузер компьютера, к которому подключается USB-устройство, может работать с web-сервером USB-устройства даже в отсутствие Ethernet-соединения. Этот приём может быть использован для поиска неисправностей или конфигурирования встраиваемой системы в полевых условиях с помощью рабочего ноутбука обслуживающего персонала. Устройство, поддерживающее функции хоста USB, можно подключить через адаптер USB to Ethernet к локальной сети, используя для этого интерфейсы драйверов класса USB to Ethernet к стеку протоколов TCP/IP из стека USB-хоста.

Весьма популярным применением технологии USB во встраиваемых системах является подключение твердотельных флэш-накопителей ёмкостью в несколько гигабайт, что позволяет создавать встроенные системы сбора данных, устойчивые к неблагоприятным внешним механическим воздействиям, при которых системы на основе жёсткого диска могут выйти из строя. Спецификация MiniBlade позволяет интегрировать в состав встраиваемой системы твердотельный накопитель (рис. 1), на основе этой же технологии может быть организовано расширение системы ввода/вывода встраиваемой системы.

Стандарт MiniBlade определяет габариты разъёма и отнесение выводов компактной встраиваемой системы хранения данных. «Электрический интерфейс» MiniBlade включает, помимо шин PCI Express, SATA, SDIO, MMC, ещё и USB (в т.ч. зарезервированы контакты для поддержки USB 3.0). В зависимости от приложения и конкретной конструкции, в разъёме может быть использован один из этих интерфейсов или их комбинация. Установка твердотельного накопителя возможна в «горячем» режиме одной рукой.



Рис. 1. Твердотельный накопитель в разъёме MiniBlade

Для извлечения модуля необходим специальный инструментарий. На плате можно разместить как один разъём MiniBlade, так и несколько. В последнем случае необходимо использовать микросхему специализированного коммутатора.

О СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ШИНЕ USB

Интерфейс USB был представлен рынку в 1995 г. Уже его первая версия USB 1.1 обеспечила вполне приличную теоретическую скорость передачи данных в 12 Мбит/с для подключения периферийных устройств (от клавиатуры и «мыши» до принтеров). Вторая версия стандарта, поддерживающая три скоростных режима – High-Speed (480 Мбит/с), Full-Speed (12 Мбит/с) и Low-Speed (1,5 Мбит/с), – заставила обратить внимание на технологию USB разработчиков мультимедийных приложений и систем хранения данных. Режим Full-Speed нашёл применение при работе с принтерами, флэш-дисками для хранения данных или обновления встраиваемого программного обеспечения, а также для работы с джойстиком или «мышью», а режим High-Speed – для работы с сетью и потоковым видео. Последняя версия стандарта USB 3.0 с заявленной теоретической скоростью передачи данных до 5 Гбит/с подтянула уже привычный всем интерфейс до потребностей самой современной мультимедийной бытовой электроники. При использовании USB 3.0 перекачка данных для нужд современных видеокамер и MP3-плееров по интерфейсу будет осуществляться практически мгновенно. Однако считать, что для выяснения скорости передачи данных в байтах достаточно поде-

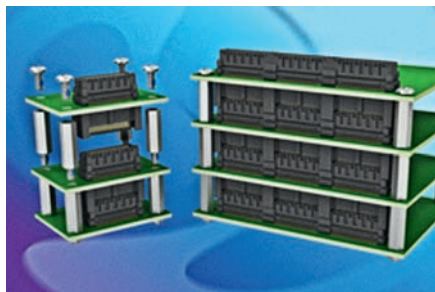


Рис. 2. Разъёмы компании Samtec, позволяющие использовать технологию StackableUSB

лить эти числа на 8, было бы неправильно. При таком академическом подходе результат будет не слишком отличаться от истины, если только использовать процессор с гигагерцовой рабочей тактовой частотой и контроллером USB, поддерживающим технологию DMA (Direct Memory Access – прямой доступ к памяти).

Особенности протокола передачи по интерфейсу USB сами по себе уменьшают реальную пропускную способность. В составе служебной информации – маркерные пакеты (Token Packets), пакеты подтверждения (Handshake Packets) для контроля результатов пересылки данных. Протокол также должен обеспечивать контроль с использованием циклического избыточного кода CRC (Cyclic Redundancy Code), что тоже сокращает объём полезной информации в передаваемом потоке. В результате 12 Мбит/с, например, могут выродиться в 10 Мбит/с или 1,25 Мб/с, да и то, если использовать пакеты данных в 64 Кб. При меньших пакетах деградация полезной пропускной способности будет ещё большей.

Свой вклад в уменьшение пропускной способности интерфейса USB может внести и само приложение. Так, при работе со SCSI-устройствами перегруженность служебной информацией может составлять от 0,5% (при размере блоков данных в 8 Кб) до более чем 8% (при размере блоков в 512 байт). Ну а объём используемых блоков определяется в том числе и объёмом отведённой для их обработки памяти RAM.

При работе с твердотельными дисками на максимально возможной скорости передачи данных на пропускную способность влияют не только особенности протокола USB, но и физические ограничения на скорость записи.

Поэтому для оценки можно считать, что процессоры «среднего класса» (микроконтроллеры на основе ядра ARM7 или семейства ColdFire с рабочей тактовой частотой до 80 МГц) могут обеспечить передачу данных со скоростью 800 Кб/с в режиме Full-Speed и 2500 Кб/с в режиме High-Speed. В связи с обособленной популярностью беспроводных технологий ряд производителей «кремния» предлагает чипсеты адаптеров USB to WiFi, которые поддерживаются специальным программным обеспечением и позволяют осуществлять обмен данными на скорости 200 Кб/с при использовании процессоров среднего класса.

ИНТЕРФЕЙС С ФУНКЦИЯМИ ПИТАНИЯ ПОДКЛЮЧЁННЫХ УСТРОЙСТВ

Говоря о достоинствах применения технологии USB на рынке встроённых систем, следует принимать во внимание не только возможность быстрых коммуникаций по этому интерфейсу и его компактность, но и возможность питания подключённой периферии.

В технологии USB 2.0 устройства с собственным источником питания могут потреблять от шины ток, не превышающий 100 мА, а остальную мощность они потребляют от собственного блока питания. Ток потребления устройства, не имеющего собственного источника питания, от шины USB может составлять до 500 мА. Такое устройство должно поддерживать режим Suspend Mode (режим низкого энергопотребления).

В стандарте USB 3.0 допустимый ток питания доведён до 900 мА, при этом поддерживается схема управления питанием, которая включает три уровня. Они относятся к управлению питанием линий связи, USB-устройств и USB-функций. Согласно новой спецификации USB 3.0, порты Up Stream и Down Stream могут инициировать перевод линии в режим пониженного энергопотребления. Технология USB 3.0 позволяет решить проблему распознавания подключённых устройств с разряженными аккумуляторами и создавать эффективные системы зарядки аккумуляторов периферийных устройств. Такие системы могут производить зарядку даже при наличии хост-компьютера в режиме sleep. Все эти новые возможности технологии USB можно использовать для по-

вышения гибкости управления энергопотреблением встраиваемой системы и повышения надёжности системы питания.

При самостоятельной аппаратной реализации технологии USB Host во встраиваемой системе необходимо принимать во внимание, что хост должен выдавать как минимум 8 мА по шине VBUS. А так как важным достоинством технологии USB является возможность питания от хоста подключаемого оборудования с выдаваемым током до 500 мА, то не стоит исключать и эту возможность. Для этого следует обратить внимание на выбор правильных пределов напряжения на шине VBUS. Оно может не превышать 4,4 В, если выдаваемый ток будет не больше 100 мА, а вот для реализации полной возможности хоста с точки зрения питания (500 мА) это напряжение должно составлять 4,75 В. Необходимо также предусмотреть наличие развязывающего конденсатора ёмкостью не менее 120 мкФ для шины VBUS хоста и конденсатора ёмкостью в диапазоне 1,0...6,8 мкФ для шины VBUS устройств USB OTG.

СТАНДАРТ STACKABLEUSB И ПЛАТФОРМА INCA

В рамках проекта StackableUSB, инициатором которого выступила компания Micro/sys, интерфейс USB 2.0 был адаптирован для применения в качестве системного интерфейса при построении стеков модулей на основе механической архитектуры, к которой привыкли создатели встроённых систем на основе стандартов семейства PC/104. Специально разработанный в рамках проекта StackableUSB разъём (рис. 2), обеспечивающий технологию подачи дифференциального сигнала интерфейса USB, имеет повышенную стойкость к вибрациям и ударным нагрузкам, которые могут возникнуть при эксплуатации встроённой системы в жёстких условиях.

Предложенный для модулей StackableUSB разъём и специальная адаптация возможностей технологии USB 2.0 обеспечивают широкий диапазон масштабирования стека: возможно использование до восьми периферийных плат расширения, стекируемых «вверх» от процессорного модуля и/или до восьми периферийных плат расширения, стекируемых «вниз» (всего до 16 периферийных модулей, подключаемых по интер-

фейсу USB без использования концентратора). При использовании плат-концентраторов (до 10 штук), стандартом StackableUSB обеспечивается поддержка до 76 периферийных модулей.

В спецификации StackableUSB поддерживаются все предусмотренные для технологии USB 2.0 режимы передачи данных: High-Speed, Full-Speed и Low-Speed, а также автоматическое определение параметров подключаемых USB-устройств и установка необходимых драйверов без участия человека. Стандартом StackableUSB обеспечиваются также возможности, не реализуемые в стандарте USB 2.0. Так, в части управления питанием расширен диапазон возможных токов питания периферийных модулей. Максимальная величина тока может составлять 930 мА на каждую плату (напомним, что стандарт USB 2.0 предусматривает возможность подачи лишь 500 мА на каждое устройство).

В числе первых изделий, выпущенных на основе нового стандарта StackableUSB, – три одноплатных контроллера – USB1132, USB1124 и USB1108. При подключении к центральному в

стеке одноплатному компьютеру эти модули могут брать на себя ряд функций управления, не требующих слишком больших вычислительных ресурсов, обеспечивать функции аналого-цифрового преобразования сигналов, цифрового ввода/вывода, поддержки портов RS232 и таймерных функций. Среди StackableUSB-модулей форм-фактора PC/104 на рынке предлагаются также изделия, реализующие до 196 линий цифрового ввода/вывода с гальванической опторазвязкой. На основе предлагаемых модулей StackableUSB возможно расширение ресурсов памяти для хранения информации основных процессорных плат за счёт съёмного диска объёмом 16 Гб или «диска» твердотельной памяти объёмом 8 Гб.

Важным достоинством стандарта StackableUSB является возможность управления стоимостью модулей расширения в больших пределах, чем раньше. Это достигается за счёт более широкого распространения на рынке чипсетов и микроконтроллеров, поддерживающих технологию USB, и дешевизны этих микросхем по сравнению с микросхемами, поддерживаю-

щими технологии PCI Express и PCI. Свой вклад в управление ценой вносит и введение двух новых маленьких (в два и четыре раза меньших по площади) форм-факторов в стандарт StackableUSB, не только ориентированных на использование недорогих микроконтроллеров, но и позволяющих экономить на материале печатных плат и стоимости их производства.

Компанией Advantech интерфейс USB включён в число базовых, поддерживаемых новой вычислительной платформой INCA (Industrial and Network Computing Architecture – компьютерная архитектура для промышленных и сетевых приложений), которую предлагается развивать в рамках процедур «открытой» стандартизации как клон платформы MicroTCA.

Системный модуль этой платформы – PMCH, объединяющий функции системного контроллера платформы MicroTCA и центрального процессорного модуля, должен поддерживать в числе прочих возможностей USB-подключение на основе технологии plug-and-play. Этот же интерфейс, наряду с популярными PCI Express и Gigabit Ethernet, должен поддерживать

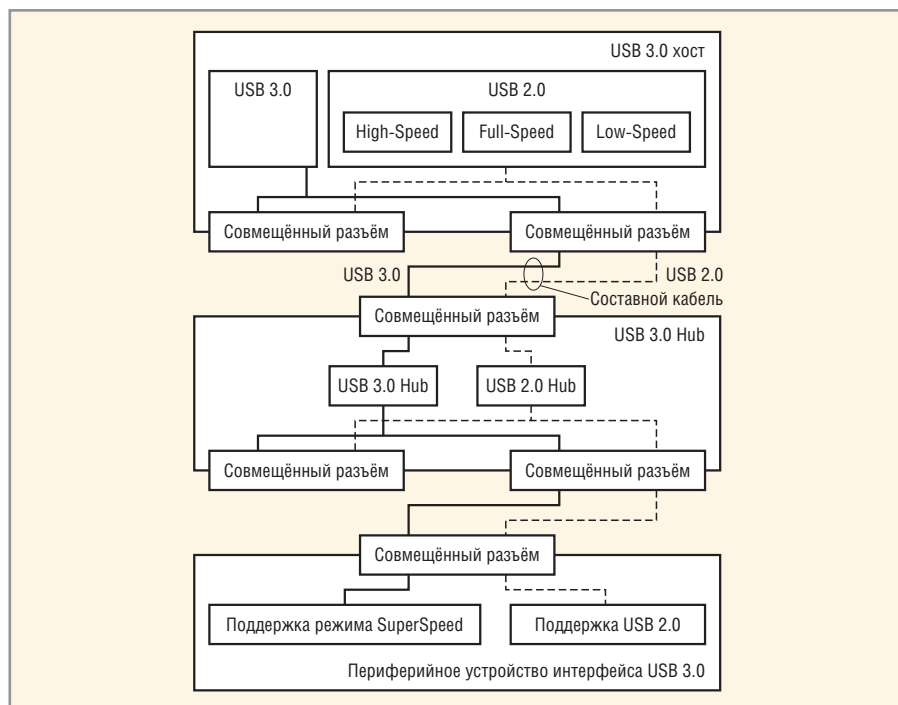


Рис. 3. Блок-схема интерфейса USB 3.0

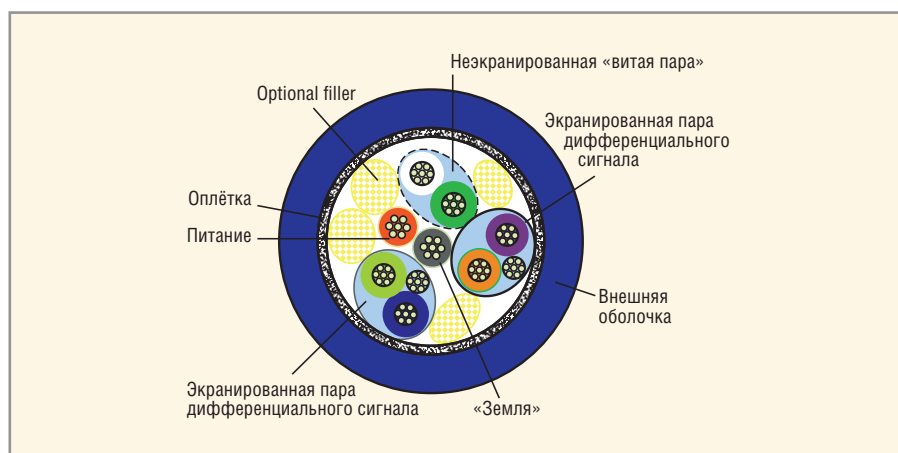


Рис. 4. Сечение кабеля для интерфейса USB 3.0

и упрощённые модули ввода/вывода, пассивно управляемые модулем PMCH, – модули LMC (Lean Mezzanine Card – упрощённый мезонин). По мнению авторов проекта нового стандарта, введение в состав архитектуры интерфейса USB позволяет ещё больше снизить стоимость системы и упростить миграцию на INCA-платформу. Технология USB оптимальна с точки зрения стоимости её использования. Микросхемы, поддерживающие этот интерфейс, достаточно дешёвы и выпускаются большим количеством вендоров. Рынок предлагает массу периферийных систем, поддерживающих подключение к USB-хосту, которые можно использовать в конструкции LMC-модулей. Технология USB в платформе INCA может обеспечить также наименее затратный путь добавления портов последовательной

передачи данных в систему за счёт использования микросхем преобразования интерфейса USB с драйверами для всех наиболее распространённых операционных систем. Это открывает дорогу для упрощения интеграции USB-периферии (считывателей смарт-карт, модемов беспроводной связи и других устройств). Такая возможность особенно интересна для ситуаций, когда габариты таких периферийных устройств превосходят габариты LMC-модулей и когда такие устройства поставляются уже корпусированными и сертифицированы в таком виде.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ USB

Спецификация USB 3.0 была закончена в ноябре 2008 г., а практические возможности устройств на основе это-

го стандарта были продемонстрированы в январе 2009 г. Технология USB 3.0 в демонстрационных образцах класса high end обеспечивала на прикладном уровне передачу данных со скоростями 300...350 Мб/с.

Интерфейс USB 3.0 по сути представляет собой два интерфейса – USB 2.0 и USB 3.0, которые работают параллельно. Реально в нынешней реализации эти интерфейсы разделены на уровне «кремния», разъёма и кабеля (рис. 3).

Контроллеры технологий USB 3.0 и USB 2.0 являются отдельными устройствами, и если устройство, поддерживающее технологию USB 2.0, подключить к разъёму USB 3.0, то оно будет взаимодействовать лишь с USB 2.0-контроллером. По этой причине устройства типа USB 3.0 Host и USB 3.0 Device полностью обратно совместимы со стандартом USB 2.0.

Разъём USB 3.0 включает в свою электрическую конструкцию пять дополнительных контактов. Расположение этих контактов таково, что при подключении в разъём USB 3.0 устройства на основе USB 2.0 задействованы будут только USB 2.0-контакты, а при подключении USB 3.0-устройства задействованы будут и USB 2.0-, и USB 3.0-контакты, обеспечивающие параллельную работу интерфейсов.

Для передачи USB 3.0-сигналов используется кабель на основе пяти жил, три из которых сами по себе имеют композитный состав: две трёхпроводные и одна двухпроводная (рис. 4). В разъёме для USB 3.0 появилось пять новых контактов (рис. 5).

К достоинствам технологии USB 3.0 относятся:

- использование протокола на основе управления прерываниями вместо технологии опроса устройств и использование коммуникаций точка–точка вместо широковещательной посылки данных всем подключённым устройствам;
- многоуровневая схема управления питанием;
- возросшая возможность запитывания устройств (ток до 900 мА).

По оценкам экспертов, к 2012 г. можно ожидать появления 500 млн. устройств, использующих технологию USB 3.0, а сама эта технология может стать катализатором появления новых приложений и продуктов для «цифрового» дома и систем хранения данных.

Хотя ещё рано давать надёжные оценки графика выхода технологии

USB 3.0 на потребительский рынок, скорость освоения интерфейса USB 3.0 на рынке встраиваемых систем может превысить темпы принятия её предыдущей версии. Свою роль в этом должна сыграть не только традиционная обратная совместимость, но и тесная генетическая связь с технологией PCI Express. При создании новой технологии для минимизации рисков проекта было решено использовать в качестве основы для USB 3.0 PHY стандарт физического уровня PCI Express (PCIe). На сегодняшний момент разработана спецификация PIPE (PHY Interface for PCI Express and USB SuperSpeed Architectures), описывающая стандартизованный интерфейс между реализациями MAC-уровня и PHY-уровня технологий PCIe Gen2 и USB 3.0.

Однако разработчикам встраиваемых систем, как и разработчикам компонентов, поддерживающих стандарт USB 3.0, придётся потрудиться и потратиться для внедрения новой технологии. На первых порах большее значение может играть стоимость «кремния», который придётся изготавливать на основе технологии с проектной нормой

90 нм, тогда как микросхемы для USB 2.0 производятся по технологии с проектной нормой 180 нм. По некоторым оценкам, канал USB 3.0 будет стоить в пять раз дороже канала USB 2.0, потребляя при этом на 30...40% больше энергии, однако технология USB 3.0 превосходит USB 2.0 по показателю мВт/Тбит. Повышенное энергопотребление нового интерфейса, наряду с возможностью подачи по нему больших токов для питания периферийных устройств, требует подведения повышенного питания к порту. Необходимо также осваивать новые режимы управления питанием в технологии USB 3.0. Однако затраты окупятся сторицей. Использование USB 3.0 позволяет решить такую проблему пользователей технологии USB 2.0, как неспособность последней распознать устройства с разряженными аккумуляторами. Порт USB 3.0 способен сделать это. На основе USB 3.0 можно создавать более эффективные системы зарядки периферийных устройств. Так, представленная на Форуме Intel осенью 2009 г. микросхема PI5USB5X от компании Pericom Semiconductor для реализации USB-зарядника позволяет производить

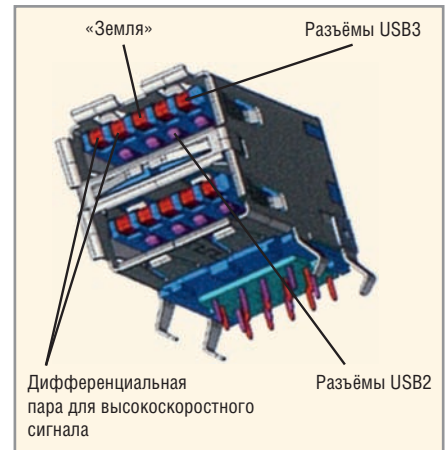


Рис. 5. Модельная конструкция разъёма для интерфейса USB 3.0

зарядку даже при нахождении компьютера в режиме sleep state.

При внедрении USB 3.0 необходимо учитывать и задержку по времени в поддержке этой технологии распространёнными операционными системами. На первых порах, если быстрое использование технологии USB 3.0 окажется критически важным, придётся использовать проприетарные или заказные программные продукты.

