

# Декодирование сигналов стандарта USB 2.0 с помощью осциллографов Rigol серии DS70000

**Николай ЛЕМЕШКО**,  
д.т.н., гл. науч. сотр.,  
АО «Корпорация «Комета»,  
nlem83@mail.ru  
**Андрей САВКИН**,  
инженер по применению,  
andrey.savkin@rigol.com

**В статье рассмотрен вопрос об анализе сигналов стандарта USB 2.0 с декодированием битовых пакетов. На основе анализа топологических и схемотехнических особенностей подключения устройств с таким интерфейсом, а также установленного в стандартах порядка передачи пакетов выявлены особенности измерительной оснастки, необходимой для декодирования сигналов стандарта USB 2.0. Рассмотрена функциональность опции декодирования сигналов USB 2.0 осциллографов Rigol серии DS70000. Представлены примеры проведения измерений для интерфейса USB 2.0 при его работе в режимах High-Speed и Full-Speed, включая построение глазковой диаграммы для скорости передачи 480 Мбит/с.**

## Введение

Стандарт передачи данных USB (Universal Serial Bus), являющийся совместной разработкой ведущих фирм-производителей компьютерной техники [1], в первой версии был создан в 1995 г. Совершенствование вычислительных средств, а также появление новых устройств, требующих высокоскоростного подключения к компьютеру, привело к эволюционному развитию USB, в первую очередь, в направлении повышения скорости передачи данных. К настоящему времени в компьютерах используются интерфейсы USB 2.0, 3.0, 3.1, 3.2. При этом интерфейсы USB 3.0, 3.1, 3.2 реализуются, в основном, для внешних жестких дисков и SSD-накопителей информации, обеспечивая скорости передачи данных до 5–20 Гбит/с в зависимости от модификации, а USB 2.0 [2] используется для подключения прочих устройств – принтеров, сканеров, флэш-накопителей и т. д. В 2019 г. вышла официальная спецификация на интерфейс USB4, который в первом и втором поколениях обеспечивает скорости передачи до 40 и 80 Гбит/с, то есть имеет производительность на уровне Thunderbolt, но он пока не получил распространения в технических средствах массового сегмента.

Несмотря на несомненное превосходство интерфейсов USB следующих поколений, USB 2.0 остается наиболее распространенным и востребованным. Помимо своих классических, ставших для всех привычными, применений интерфейс USB 2.0 используется и в других областях. Так, например, им оснащены некоторые датчики, формирующие большой поток информации. Он используется при программировании и сервисном обслуживании электронных устройств на контроллерном управлении, начиная с телевизионных приставок и заканчивая банкоматами. На основе USB 2.0 иногда строятся локальные компьютерные сети, включающие обычно два компьютера и предназначенные для передачи файлов со скоростью до 20 Мбит/с [3].

Таким образом, среди всех прочих интерфейсов USB 2.0 по широте применения в устройствах разного назначения стоит на первом месте. Инженеров привлекает отлаженность технологии и скорость передачи данных, достаточная для подавляющего большинства практических приложений, а также хорошо развитая компонентная база.

Тем не менее в зависимости от конкретного проекта при передаче данных через USB-интерфейс могут наблюдаться те или иные ошибки, особенно в режиме High-Speed. Причинами их появления могут являться погрешности программирования хостов и устройств USB, отклонения схемотехники интерфейсов от рекомендуемой стандартами, ошибки трассировки проводников, недопустимые для высокоскоростной передачи сигналов [4].

Процесс проектирования устройств с USB 2.0 должен включать этап отладки с использованием современных средств измерений. Однако сложность организации передачи данных в USB 2.0 и необходимость проверки не только сигналов на соответствие требованиям спецификации, но и состава, структуры передаваемых пакетов делает использование осциллографии в ее классическом виде недостаточно эффективным, и поэтому для анализа сигналов USB 2.0 необходимо использовать специальные опции, функционирующие на базе современных осциллографов и позволяющие декодировать передаваемые пакеты битов.

## Схемотехнические и топологические особенности подключения устройств с интерфейсом USB 2.0

К основным средствам обеспечения функционирования интерфейса USB 2.0 в составе, например, персонального компьютера принято относить USB-хост, выполненный в виде программно-управляемого контроллера или микросхемы с жесткой логикой, а также корневой концентратор, к которому могут подключаться вспомогательные разветвители либо внешние устройства через USB-порты. Структура взаимосвязей в интерфейсе USB 2.0 предполагает использование древовидной топологии (рис. 1). Назначение разветвителей состоит в электрическом согласовании подключений, коммутации пакетов данных, обнаружении подключения/отключения устройств, а также в их переводе в активный или пассивный режим, в обеспечении устройств электропитанием. При этом утверждение, что конечное устройство не является разветвителем, не является верным в полной мере, поскольку стандарт USB 2.0 способен обеспечивать и субадресацию внутри устройств, если это необходимо.

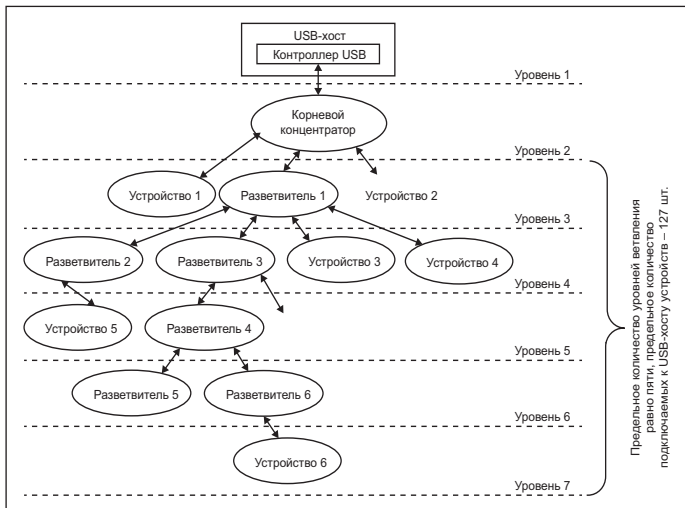


Рис. 1. Структура технических средств интерфейса USB 2.0

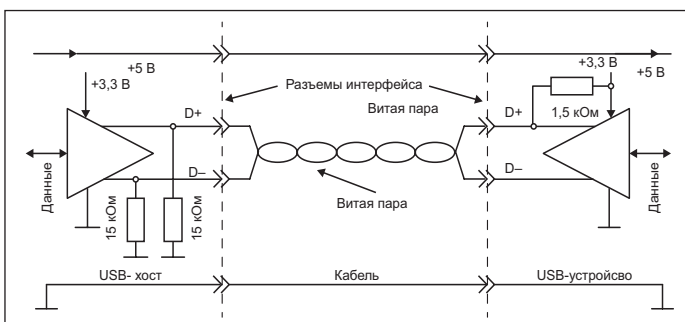


Рис. 2. Упрощенная схема подключения устройства к USB-хосту (режимы Full-Speed и High-Speed)

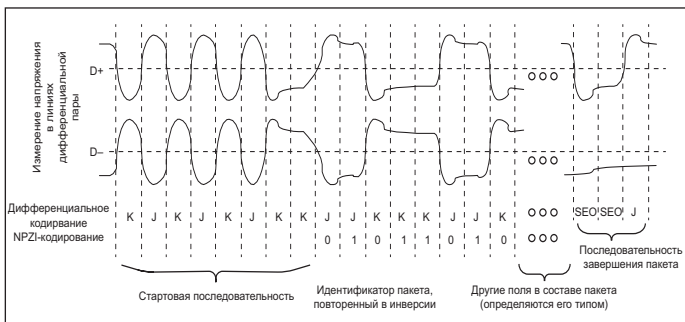


Рис. 3. Принцип формирования сигналов для передачи данных по стандарту USB 2.0 с использованием NRZI-кодирования и состав типовых полей в пакетах (Full-Speed)

Корневой концентратор обычно встроен в контроллер USB, являющийся частью южного моста материнской платы компьютера, и обеспечивает управление процессом передачи данных. Максимальное количество уровней ветвления, не считая корневого концентратора, не превышает пяти. При этом к одному хосту можно подключить до 127 USB-устройств, включая разветвители, что с избытком перекрывает стандартные потребности пользователей компьютеров. Прямое электрическое соединение USB-хостов запрещено, и потому при локальном соединении двух компьютеров по данному интерфейсу между ними устанавливается специальный логический модуль, являющийся ведомым USB-устройством для обоих хостов.

Стандарт USB 2.0 поддерживает три диапазона скоростей передачи: Low-Speed (10–1500 Кбит/с), Full-Speed (0,5–12 Мбит/с), High-Speed (25–480 Мбит/с) и устанавливает допуски на скорости передачи, которые для этих режимов составляют, соответственно,  $\pm 1,5$ ;  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,05\%$ . Такие требования к поддержанию битовой скорости обусловлены тем, что сигналы тактирования обработки битов не переда-

ются вместе с пакетами, а вырабатываются самостоятельно каждым USB-устройством на основе слежения за переходами между уровнями напряжений. Дуплексная передача данных обеспечивается за счет попеременного использования сигнальных линий хостом и подключаемым устройством. Предельная односторонняя скорость передачи для шины USB 2.0 составляет до 20 Мбайт/с и редко достигает больших значений.

Интерфейс USB 2.0 на физическом уровне реализуется кабельным соединением, включающим в себя экран и четыре медных проводника, два из которых служат для электропитания подключаемых устройств. Два других проводника объединены в витую пару с волновым сопротивлением 90–120 Ом. Сплошной либо сетчатый экран, охватывающий все проводники, предназначен для защиты передаваемых напряжений и сигналов от радиопомех, наводимых внешними электромагнитными полями. Кабели USB ориентированы, то есть имеют неодинаковые разъемы на концах [4]. Возможность «горячего» подключения устройств – помимо самой логики работы интерфейса – обусловлена удлинением заземляющего контакта, в результате чего вначале выравниваются потенциалы заземления и только после этого подключается электропитание, что защищает электрические цепи от переходных процессов, способных вывести из строя соединяемые устройства.

Интерфейс USB 2.0 предусматривает два режима электропитания подключаемых устройств. Непосредственно после подключения устройства к USB-порту ему обеспечивается токопотребление до 100 мА, а после согласования с USB-хостом – до 500 мА при напряжении питания 5 В. Схематика подключения устройства USB к хосту в упрощенном виде представлена на рис. 2. Когда к хосту ничто не подключено, обе сигнальные линии D+ и D- подтянуты резисторами 15 кОм к шине питания отрицательной полярности. При подключении устройства одна из линий подтягивается к +3,3 В через резистор 1,5 кОм. Устройства с режимом Low-Speed подтягивают линию D-, а устройства с режимами Full-Speed и High-Speed – D+, причем высокоскоростной режим включается после обмена пакетами-визитками. Таким образом, хост определяет факт подключения устройства и предельно поддерживаемый им режим передачи данных на физическом и логическом уровнях.

После подключения устройства к USB-хосту и подтяжки информационных линий D+ и D- сообразно поддерживаемому режиму передачи образуемая ими дифференциальная пара переводится в состояние Idle (отсутствие активности). У подключения имеются еще два состояния, характеризующиеся отсутствием обмена данными – замыкание обеих линий на минус (SE0) и на плюс (SE1), инициируемые USB-хостом. Состояние SE0, длящееся более 10 мс, должно восприниматься устройством как команда сброса. Состояние Idle длительностью более 3 мс сообщает устройству о необходимости перехода в режим энергосбережения. Состояние SE0 используется в составе последовательности завершения пакета.

Как видно из представленного описания, а также из общеизвестных сведений о USB, при контроле качества сигналов и достоверности извлекаемой информации могут использоваться разные измерительные сечения – на уровне разъемов для подключения устройств, а также на уровне интегральных компонентов, обеспечивающих логику функционирования USB. Контроль первого типа применяется при сертификации USB-устройств, а второго – для тестирования интегральной компонентной базы. В обоих случаях для сохранения требований по топологии электрических подключений необходимо применять специальную измерительную оснастку.

### Порядок передачи данных по стандарту USB 2.0

Для передачи пакетов в витой паре используется код без возврата к нулю (non-return-to-zero invertive, NRZI) с переменной битовой скоростью. Сигнал является дифференциальным. Метод кодирования поясняется на рис. 3 для режима Full-Speed. Каждому нулевому биту входных данных соответствует изменение уровня дифферен-

циального напряжения ( $J \rightarrow K$  или  $K \rightarrow J$ ), а при передаче единичного бита изменения нет. Чтобы исключить потерю синхронизации на длительных единичных последовательностях, применяется битстаффинг, то есть принудительная вставка в поток данных ноля подряд на каждые 6 бит. Использование NRZI-кодирования снижает вероятность ошибки за счет уменьшения изменений количества состояний и сокращает энергопотребление, но в то же время усложняет сохранение синхронизации между хостами и подключенными USB-устройствами.

На логическом уровне устройство USB поддерживает транзакции приема и передачи данных. Каждый пакет транзакции содержит в себе номер оконечной точки (endpoint) в устройстве. При его подключении программы-драйверы читают из памяти устройства список оконечных точек и создают управляющие структуры данных для обеспечения двухсторонней связи с каждой оконечной точкой устройства. Совокупность оконечной точки и таких управляющих структур принято называть каналом. Соответственно, некоторые оконечные точки могут быть связаны с USB-хостом несколькими каналами разного типа и требовать передачи пакетов данных разных типов и длины. Спецификация USB 2.0 предполагает наличие каналов четырех видов – поточного, управляющего, изохронного и прерывания.

Поточный канал дает гарантию доставки каждого пакета, поддерживает автоматическую приостановку передачи данных при невозможности ее осуществления, но не дает гарантию по скорости и задержке доставки и применяется в подключении принтеров, сканеров и внешних накопителей информации. Управляющий канал предназначен для обмена с устройством короткими пакетами «вопрос – ответ» и служит, в основном, для корректной работы программы-драйвера. Изохронный канал позволяет передавать пакеты без гарантии доставки и без подтверждения, но с заданной скоростью доставки, что применяется в подключении аудио- и видеоустройств. Канал прерывания позволяет доставлять короткие пакеты в обоих направлениях без подтверждения, но не позже заданной задержки, что используется в устройствах ввода-вывода.

Транзакции между хостом и USB-устройством представлены неразрывными последовательностями из нескольких пакетов. Инициатором обмена всегда является хост. Он передает короткий пакет, уведомляющий о начале новой транзакции, с указанием ее направления, адреса устройства и номера оконечной точки. Одна транзакция может содержать несколько пакетов с данными, если каждый из них имеет максимальную допустимую для этого устройства длину данных. Окончание пересылки данных определяется по длине пакета, не равной максимальной. Как только приходит укороченный пакет, принимающая сторона немедленно передает ответный пакет – подтверждение с характеристикой состояния приема. Все пакеты в транзакции передаются практически слитно с максимальной паузой не выше 1 мкс для режима Full-Speed. Аналогично происходит передача данных от устройства к хосту.

Протокол USB 2.0 предполагает возможность использования 16 разновидностей пакетов для передачи команд управления и данных. Состав этих пакетов определяется их типом [2], однако у всех пакетов имеются общие черты. В режиме Full-Speed каждый пакет начинается с последовательности Start of Packet вида KJKJKKK. Далее следует идентификатор пакета PID, состоящий из 4 бит и определяющий тип пакета. Поскольку идентификация типа пакета является ответственной операцией, то в состав поля PID включается 8 бит – PID повторяется дополнительно в инверсном виде, как это показано в примере на рис. 3. Далее в непрерывном режиме следуют поля, последовательность, содержание и размер которых определяются типом пакета, режимом и скоростью передачи данных. К основным типам полей относятся:

- поле адреса устройства, которое должно принять пакет (7 бит);
- поле, указывающее оконечную точку в устройстве (4 бита);
- поля данных и контроля их целостности в виде контрольной суммы (включают до 1024 бит данных в зависимости от типа устройства и поддерживаемой скорости передачи);

- поле фрейма (для режимов Low-Speed и Full-Speed) или микрофрейма (для режима High-Speed), повторяющееся с периодом 1 мс или 125 мкс, соответствующее, служащее для синхронизации передачи данных по времени. Длина этого поля определяется текущей битовой скоростью.

Завершается передача пакета, как это показано на рис. 3, последовательностью End of Packet: SE0, SE0, J. Минимальный интервал между пакетами установлен равным 0,1 мкс.

Таким образом, схемотехника, кодовые конструкции и принципы формирования пакетов, используемые в USB 2.0 для передачи данных, оказываются достаточно сложными, в особенности если учесть возможное многоуровневое ветвление и широкий диапазон поддерживаемых скоростей передачи. Это создает ряд потенциальных причин для возникновения ошибок в передаче данных, в первую очередь, вызванных ошибками в микропрограммах контроллера и подключаемых устройств. По этой причине спецификация [2] предусматривает всестороннее тестирование устройств с интерфейсом USB 2.0 на сигнальном и логическом уровнях. Для логического тестирования целесообразно использовать специальные опции анализа сигналов USB 2.0, функционирующие на базе осциллографов, например Rigol DS70000.

### Особенности измерительной оснастки для декодирования сигналов стандарта USB 2.0

Как следует из приведенного выше описания, передача данных по стандарту USB осуществляется с битовой скоростью до 480 Мбит/с, что определяет необходимость использования специальной измерительной оснастки для подключения средств измерений. При этом сам стандарт [2] не предполагает каких-либо искажений, связанных с разветвлением дифференциальной линии. Требуемая полоса пропускания такой оснастки должна быть в 3–5 раз больше предельной битовой скорости, то есть составлять 1500–2500 МГц. Не менее 1500 МГц должна составлять и полоса пропускания используемого осциллографа и применяемых пробников.

В качестве подходящей измерительной оснастки на рынке можно встретить платы, оснащенные двумя разъемами для подключения к хосту и к USB-устройству. Пример такой платы показан на рис. 4. Это плата TF-USB-D-STP, которая может использоваться для комплексного тестирования устройств USB 2.0. Она имеет дифференциальную линию с сильной электрической связью близко расположенных проводников, что обеспечивает стабильность волнового сопротивления. Волновое сопротивление линии составляет 90–100 Ом, и она хорошо согласуется с витой парой в кабеле, подключающем устройство к USB-хосту. Конструкция полосковой линии предусматривает наличие врезки в виде микроразъемов с паразитными параметрами, которые не оказывают критичного влияния на целостность

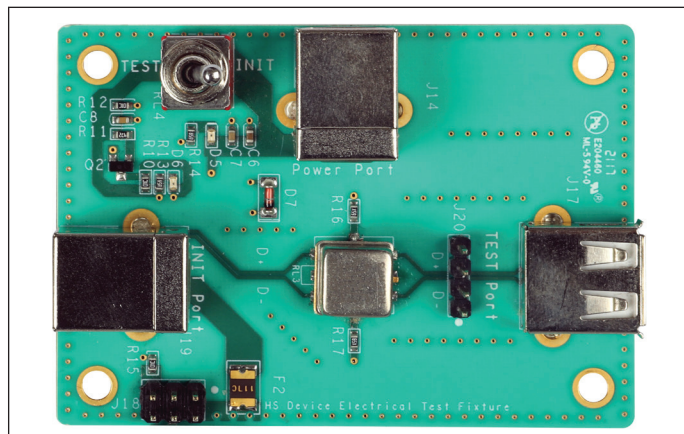


Рис. 4. Плата TF-USB-D-STP для тестирования устройств USB 2.0

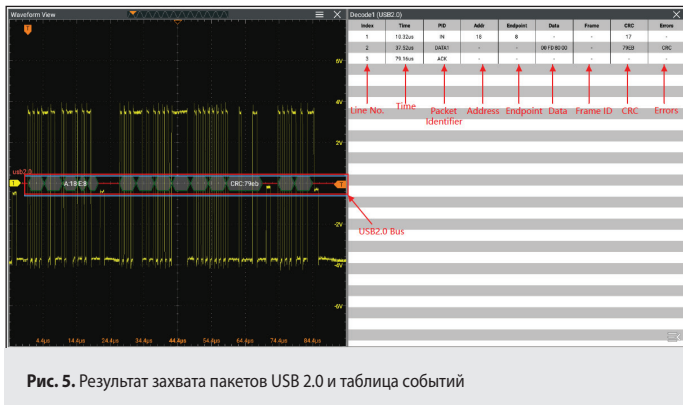


Рис. 5. Результат захвата пакетов USB 2.0 и таблица событий

сигналов. Дополнительные элементы на плате улучшают условия согласования с учетом наличия такого разветвления.

Не менее важным вопросом является выбор средства подключения тестовой платы к осциллографу. Известно [4], что дифференциальная передача оказывается критичной к сохранению одинакового запаздывания для основного сигнала и его дополнения. Это достигается за счет одинаковых условий их распространения в линиях, образующих дифференциальную пару. При передаче дифференциального сигнала в осциллограф это правило должно сохраняться. Таким образом, плата на рис. 4 предполагает подключение дифференциального высокоомного активного пробника, а не двух несимметричных, хотя и такой вариант теоретически возможен, если в дальнейшем будут компенсирована разность запаздывания. Использование активных пробников позволяет также снизить влияние потерь, а также отраженных волн, способных нарушить целостность сигналов.

### Функциональность опции декодирования сигналов USB 2.0 осциллографов Rigol серии DS70000

Осциллографы Rigol серии DS70000 с полосой пропускания до 5 ГГц позволяют анализировать с декодированием сигналы последовательных шин RS232/UART, I2C, SPI, LIN, CAN, CAN-FD, FlexRay, I2S, MILSTD-1553, MIPI-RFFE, а также USB2.0, причем такое декодирование возможно одновременно в каждом из каналов.

Для декодирования пакетов необходимо выбрать USB 2.0 в соответствующем меню выбора шин и включить декодирование. Для настройки опции указывается канал, сигнал в котором подвергается анализу, а также пороговое напряжение, переход через которое означает передачу нулевого бита в соответствии с рис. 3. Поскольку шина USB 2.0 использует дифференциальный сигнал, триггерный уровень следует выбирать вблизи нулевых значений. Его смещение может потребоваться разве что для выравнивания битовых интервалов в случае асимметрии линий дифференциальной пары, но это

при качественной измерительной оснастке встречается крайне редко. Дополнительно указывается режим работы соединения USB – Low Speed, High Speed или Full Speed, а также положительная или отрицательная полярность в зависимости от подключения линий дифференциальной пары ко входу осциллографа. Заметим, что неправильный выбор полярности приведет к невозможности декодирования сигналов и к постоянным ошибкам.

Как отмечалось выше, битовые пакеты USB 2.0 состоят из нескольких полей, каждое из которых может представлять интерес для анализа. Для удобства отображения опция позволяет настраивать формат вывода данных – шестнадцатеричный, десятичный, двоичный или ASCII. На рис. 5 слева показана осциллограмма сигнала USB 2.0 в режиме декодирования. Поскольку оно может потребоваться одновременно для большого количества пакетов, ручной поиск их непосредственно по осциллограмме будет долгим и нерациональным. Ввиду этого опция предусматривает возможность вывода данных о пакетах в виде таблицы событий, показанной с правой стороны рисунка. Содержимое таблицы синхронизовано с окном отображения осциллограммы и меняется при изменении его масштаба. В таблице приводятся данные о порядковом номере пакета, времени его начала по шкале осциллографа, идентификатор пакета, сведения об адресации, передаваемые данные, контрольная сумма и обозначения обнаруженных ошибок. Таблицу событий можно сохранить в формате CSV, когда развертка и захват пакетов остановлены.

Заметим, что у осциллографов Rigol серии DS70000 помимо рассмотренной имеется еще одна опция – DS70000-USBA, предназначенная для тестирования хостов и устройств USB на соответствие требованиям стандарта на сигнальном уровне. Тем не менее при наличии ошибок в функционировании интерфейсов USB в значительной доле случаев причина кроется именно на физическом уровне, а именно в нарушении временных и амплитудных соотношений в дифференциальном сигнале. Исходя из этого, такую опцию можно рекомендовать к применению в тех случаях, когда USB-соединение не работает как следует, даже если анализ пакетов с декодированием не свидетельствует о наличии ошибок в битовых пакетах.

### Пример реализации декодирования сигналов USB 2.0 с помощью осциллографов Rigol серии DS70000

#### Состав измерительной установки

Задачами эксперимента являлись:

- в режиме High-Speed – демонстрация декодирования синхронизационной посылки (Hand Shaky) и построение глазковой диаграммы при нахождении USB-устройства в пассивном состоянии;
- в режиме Full-Speed – декодирование передаваемых пакетов при обмене данными между USB-устройством и хостом.

Ключевым элементом измерительной установки (рис. 6) являлся осциллограф Rigol DS70504 с опцией DS70000-USBA, которая

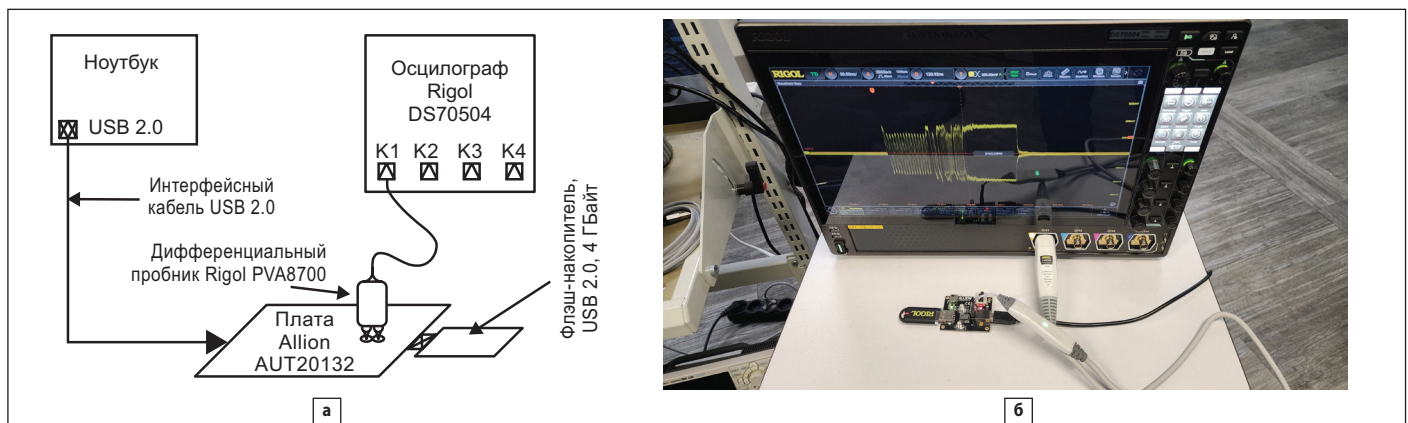


Рис. 6. Измерительная установка: а) схема; б) фотография

обеспечивает поиск и декодирование пакетов на основе анализа данных, передаваемых в дифференциальной паре. Полоса осциллографа с четырьмя каналами составляет 5 ГГц. В качестве согласующего звена, позволяющего подключать средство измерений к линии USB, использовалась специальная тестовая плата Allion AUT20132 [7], предназначенная для проведения тестирования USB-устройств на уровне электрических сигналов (рис. 7). К ее специальному выходу, как показано на рис. 6, был подключен дифференциальный пробник Rigol PVA8700 с полосой рабочих частот до 7 ГГц. За счет такой структуры схемы измерений обеспечивалось минимальное влияние ослонки на целостность передаваемых сигналов. При проведении измерений обмен пакетами в шине USB выполнялся между флэш-накопителем объемом 4 Гбайт и хостом ноутбука.

Результаты измерений в режиме High-Speed получены в условиях отсутствия активной передачи между хостом и USB-устройством. Результат декодирования синхронизационной посылки представлен на рис. 8. Она определяется в соответствии со структурой битовых слов USB 2.0 как 7fffffff. В правой части рисунка показана таблица, где отмечается время начала битового пакета. Поскольку посылка является синхронизационной и не имеет в своей структуре ни адреса, ни идентификатора, это указывается в крайнем поле таблицы пометкой SYNC. Использование синхросылок удобно для измерения электрических параметров сигналов USB 2.0, поскольку не требует дополнительных действий по работе с USB-устройством. На рис. 9 показана глазковая диаграмма (ГД), построенная по синхросылкам. Вверху указана скорость следования битов, а также количество реализаций развертки. Наличие широкой горизонтальной линии соответствует случаю, когда дифференциальное напряжение равно нулю. Раскрыв ГД по амплитуде составляет около 600 мВ, что является минимально достаточным для этого интерфейса. Минимальный горизонтальный раскрыв ГД по уровню нулевого дифференциального напряжения составляет 1,7 нс, что также соответствует требованиям стандарта USB 2.0. На основе использования ГД может осуществляться тестирование по маске, ключевые точки которой зависят от измерительного сечения и тестируемого объекта – хоста или устройства. Тестирование по маске является обязательным для USB-устройств, так как определяет их пригодность к использованию на сигнальном уровне.

Результаты измерений в режиме Full-Speed получены при активной передаче данных между флэш-накопителем и хостом. На рис. 10а представлены результаты декодирования единичного пакета данных. Опция декодирования, как следует из таблицы в правой части рисунка, определяет тип пакета и данные в 16-ричной системе исчисления. Увеличивая масштаб, можно увидеть биты, распределенные по 5 шт. между каждым символом данных. В таблице также отмечено, что передаче пакета данных предшествовали две синхросылки.

На рис. 10б показан результат захвата двух пакетов данных, разделенных синхросылками, с выделением той же информации о них. Наличие синхросылок между пакетами имеет своей целью не только поддержание битовой синхронизации для выделения тактовой частоты в USB-устройстве, но и недопущение его перехода в режим энергосбережения в промежутках между пакетами служебного и информационного назначения.

Таким образом, использование опций анализа сигналов USB 2.0 позволяет организовать проверку ряда пакетов битов на наличие логических и иных ошибок, что необходимо при отладке устройств с таким интерфейсом.

## Заключение

Анализ сигналов стандарта USB 2.0 является важной многогранной задачей, которая должна решаться с помощью средств автоматизации измерений. Их применение является залогом полного, всеохват-

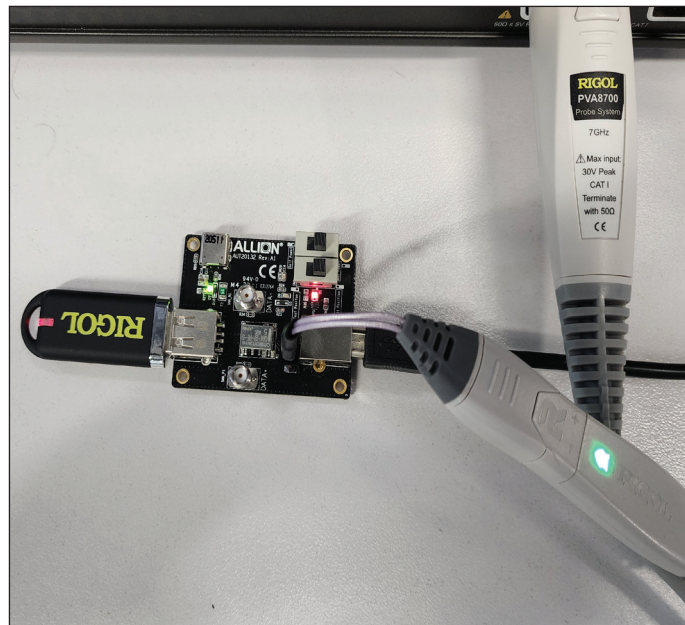


Рис. 7. Фотография тестовой платы Allion AUT20132

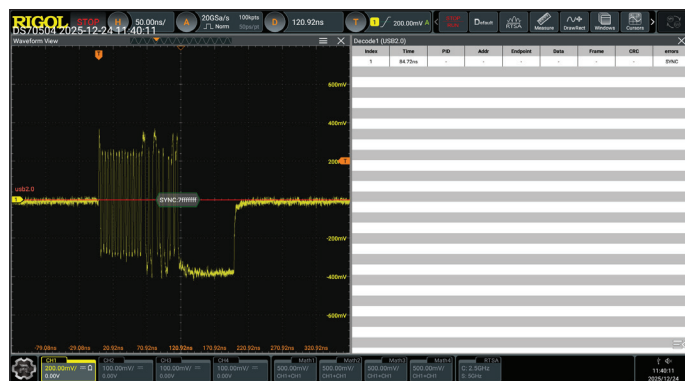


Рис. 8. Режим High-Speed. Результат обнаружения и декодирования синхронизационной посылки

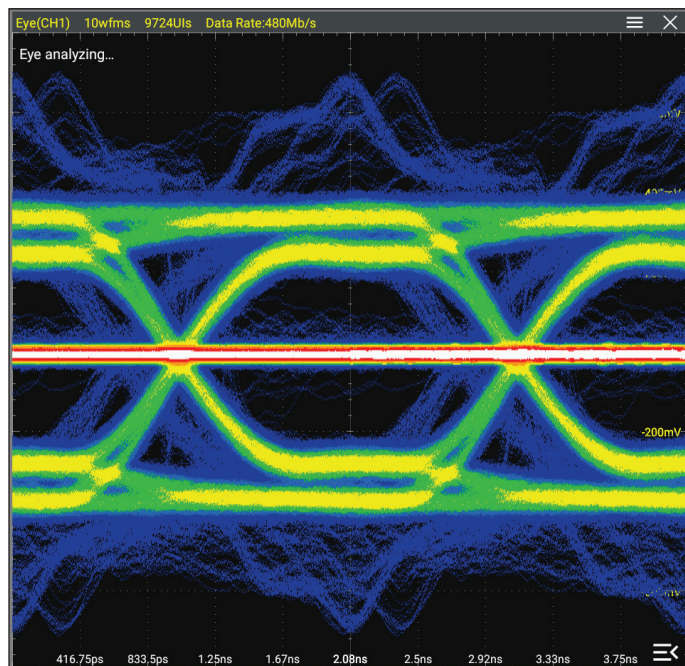


Рис. 9. Режим High-Speed. Глазковая диаграмма дифференциального сигнала

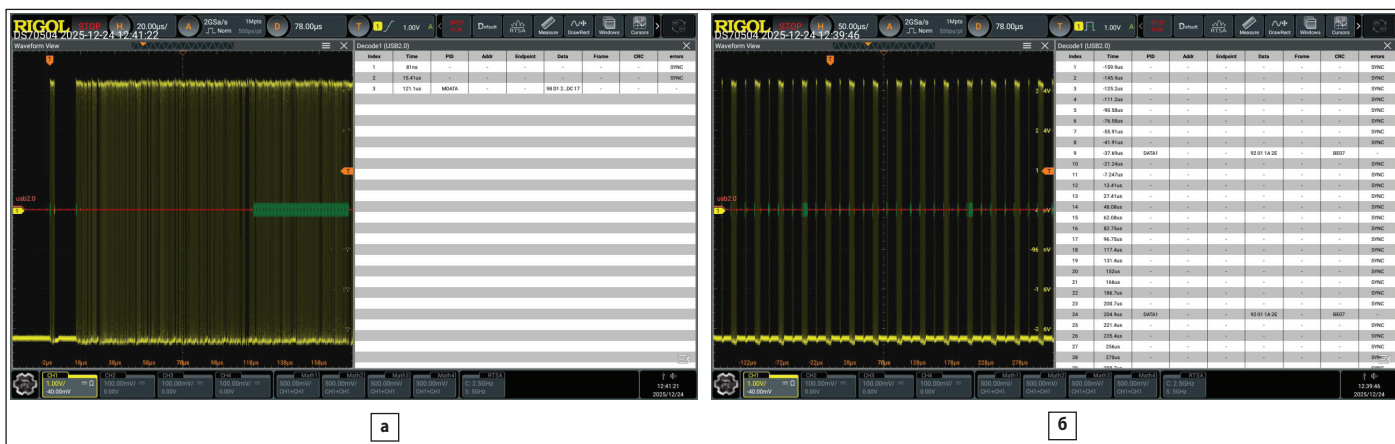


Рис. 10. Режим Full-Speed. Результат обнаружения и декодирования: а) единичного пакета данных; б) пакетов данных, разделенных синхропосылками

тывающего тестирования устройств с этим интерфейсом, выполняемого на уровне, который соответствует современному состоянию развития метрологического обеспечения.

Ключевым элементом обеспечения высокого качества результатов измерений является использование средств измерений, отличающихся должной измерительных функций, а также измерительной оснастки с подходящими характеристиками, не привносящей существенных искажений в измеряемые сигналы. Как свидетельствуют полученные результаты, осциллографы Rigol серии DS70000 позволяют тестировать устройства с USB-интерфейсом на информационную целостность пакетов битов, а также на уровне сигналов, что повышает ценность этих приборов как средств измерений в составе радиолaborаторий универсального назначения.

## Литература

1. Универсальная последовательная шина USB // <http://www.usb.org/developers/packaging>.
2. Universal Serial Bus Specification // [http://www.usb.org/developers/docs/usb20\\_docs/#usb20spec](http://www.usb.org/developers/docs/usb20_docs/#usb20spec).
3. Windows Easy Transfer Cable // [http://www.flint-inc.ru/tchelp/html/usb\\_cable\\_connection.html](http://www.flint-inc.ru/tchelp/html/usb_cable_connection.html).
4. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М. ООО «Группа ИДТ». 2007.
5. DS70000 Series. Digital Oscilloscope. Data Sheets. DSA29103-1110. Jul. 2024.
6. DS70000 Series. Digital Oscilloscope. User Guide. Oct. 2024.
7. Allion. USB-TF-HS-EP-SET (USBA2HSSQ) USB-A High Speed Signal Quality Test Fixture Set. DOC #: ES22006. REV:1.0. 2023.