Тестирование параллельных и последовательных шин с помощью осциллографов смешанных сигналов Keysight InfiniiVision серии 4000 X

Владимир ДЬЯКОНОВ,
д. т. н., профессор

Современные цифровые осциллографы объединяют в одном небольшом корпусе несколько измерительных приборов. Например, осциллографы серии InfiniiVision 4000 X корпорации Keysight Technologies состоят из шести устройств. Наличие в них логического анализатора и анализатора протоколов последовательных шин позволяет полноценно использовать приборы для исследования смешанных сигналов и анализа как параллельных, так и последовательных шин. В этой статье описана технология тестирования шин на примере предоставленного автору российским отделением Keysight осциллографа смешанных сигналов серии 4000 X с полосой пропускания 1,5 ГГц.

Приборы серии 4000 X наряду с цифровым запоминающим осциллографом имеют логический анализатор параллельных шин, анализатор протоколов последовательных шин, обеспечивающий декодирование последовательных данных по различным протоколам, цифровой вольтметр, частотомер с сумматором и двухканальный генератор стандартных и произвольных сигналов с цифровым синтезом их формы [1].

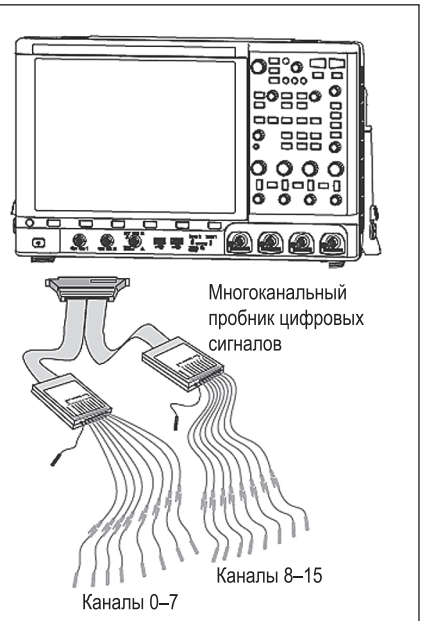

Рис. 1. Осциллограф Keysight InfiniiVision серии 4000 X и пробник логического анализатора

Подготовка к работе с логическим анализатором

Выпускаются 16 моделей цифровых осциллографов с 2/4 аналоговыми каналами с полосой частот 200, 350, 500 МГц, 1 и 1,5 ГГц, половина из них — осциллографы смешанных сигналов MSO (mixed signals oscilloscope) (рис. 1) со встроенным 16-канальным логическим анализатором с частотой дискретизации 1,25 ГГц и полосой 200 МГц. Они используются для исследования и тестирования параллельных данных и шин.

Параллельные данные обычно передаются по *n* однобайтовых каналов, каждый из которых имеет два условных уровня сигнала — логического 0 и логической 1. Конкретные уровни напряжения не имеют принципиального значения, но они, конечно, существуют и могут быть измерены с помощью аналоговых осциллограмм или встроенного цифрового вольтметра. Для получения временных диаграмм логических сигналов применяются специальные многоканальные пробники (рис. 1).

Одиночная выходная колодка пробника подключается к разъему, установленному сзади осциллографа, две входные колодки содержат по 9 проводов («земля» и 8 сигнальных проводов, заканчивающихся миниатюрным трубчатым наконечником). В него можно вставлять мини-зажим, который подключается к выводам разъемов или микросхем печатной платы тестируемого устройства (рис. 2).

Для учета искажений (в основном временных задержек) цифровых и логических сигналов нужно учитывать эквивалентные схемы входа каждого канала логического сиг-

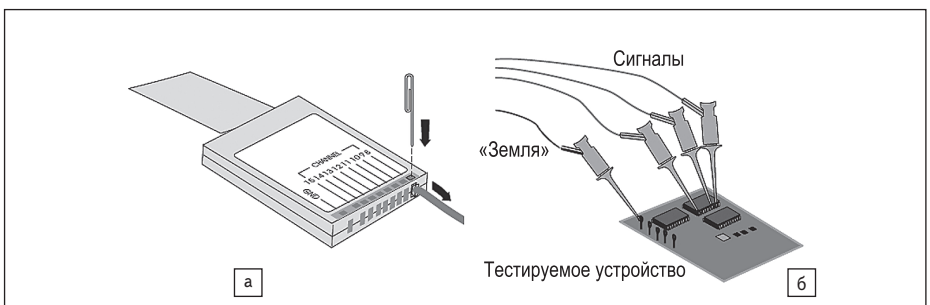

Рис. 2. Крепление входных проводников (а) и их подключение к тестируемой плате (б)

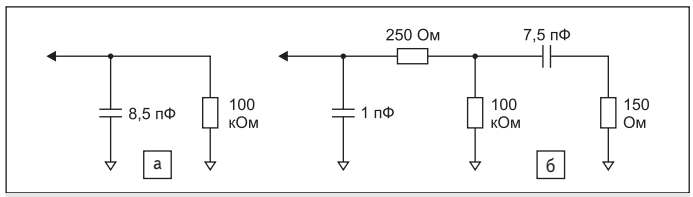

Рис. 3. НЧ (а) и ВЧ (б) эквивалентные схемы входной цепи одного канала пробника цифровых (логических) сигналов

нала (рис. 3). В простейшем случае достаточна низкочастотная (НЧ) эквивалентная схема, содержащая параллельно включенные 100-кОм резистор и 8,5-пФ конденсатор (рис. 3а). Более точной является высокочастотная (ВЧ) эквивалентная схема (рис. 3б).

Зависимости импеданса одного канала логического пробника от частоты показаны на рис. 4. Их можно использовать для оценки влияния входных цепей пробника логических сигналов на цепи исследуемых сигналов.

Логические схемы переключаются при определенном пороге. Осциллограф позволяет установить следующие уровни пороговых напряжений сигналов для таких схем.

Сигнал «Порог»: TTL +1,4 В; CMOS +2,5 В; ECL –1,3 В; задаваемый пользователем от –8 до +8 В.

Настройка экрана на отображение нужных логических сигналов

Применение логического анализатора резко увеличивает число осциллограмм, наблюдаемых на экране осциллографа, что затрудняет их наблюдение и анализ. Поэтому желательно проверить разметку экрана путем вывода пустых линий цифровых каналов. Для этого в меню данных каналов (рис. 5) надо включить обе группы каналов — D0–D7 и D8–D16. В левой части меню можно установить одну из трех позиций для высоты осциллограмм, а в позиции «Канал» вывести меню включенных отдельных (или всех) каналов. В этом же меню можно установить пороговые уровни и тип шины.

После этого надо проверить физическое подключение всех нужных каналов пробника цифровых сигналов — и наблюдать их на экране осциллографа. На рис. 6 показан пример наблюдения сигналов от 8 двоичных делителей, работающих в режиме счетного запуска.

При наблюдении цифровых сигналов возможно проведение ряда автоматических измерений (таблица с ними для примера показана на рис. 6 справа). Поскольку логические сигналы изображаются идеализированными прямоугольными импульсами, то ряд измерений просто не существует: например, длительность фронтов задана как нулевая, импульсы имеют заранее определенную высоту и т. д. Возможны также курсорные измерения.

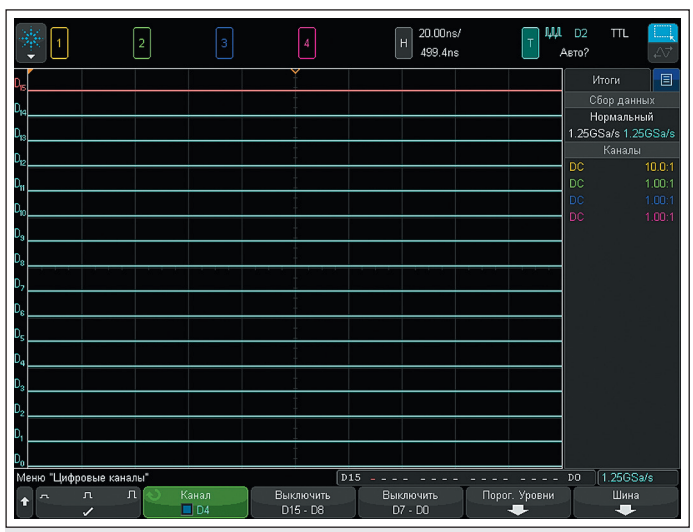

Рис. 5. Линии пустых 16 цифровых каналов и их меню внизу

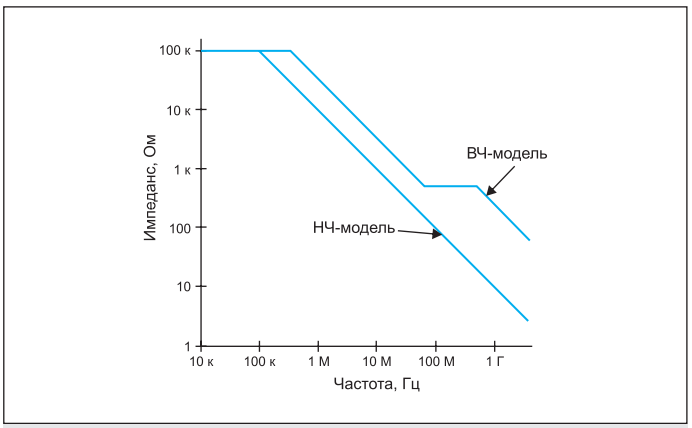

Рис. 4. Зависимость импеданса одного канала логического пробника от частоты

Для временных диаграмм вполне применима функция растяжения Zoom (рис. 7), позволяющая детально рассмотреть малые участки

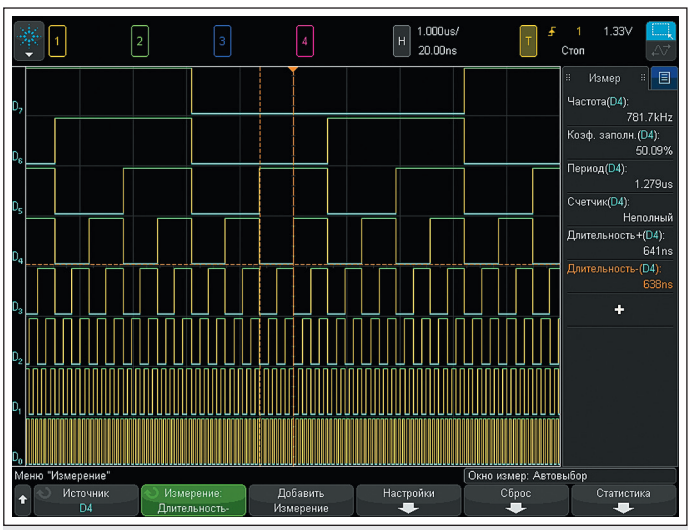

Рис. 6. Временная диаграмма 8 двоичных делителей

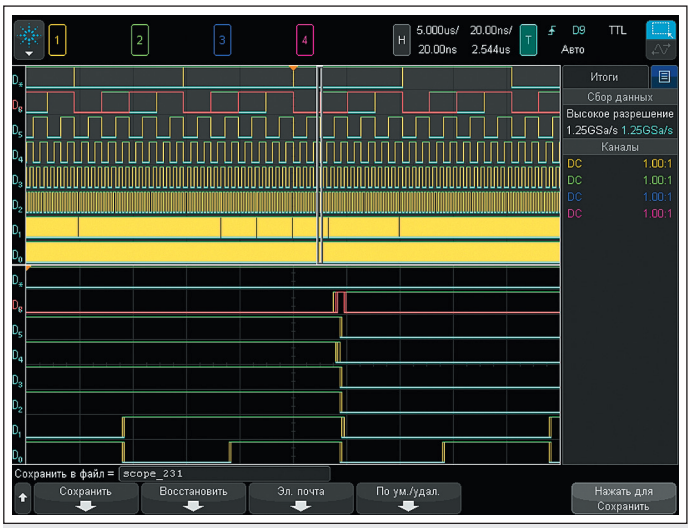

Рис. 7. Функция Zoom для логических сигналов (сверху экрана обзорные осциллограммы, снизу — расширенные)

Рис. 8. Одновременный вывод на экран 4 линий аналоговых каналов и 8 — цифровых

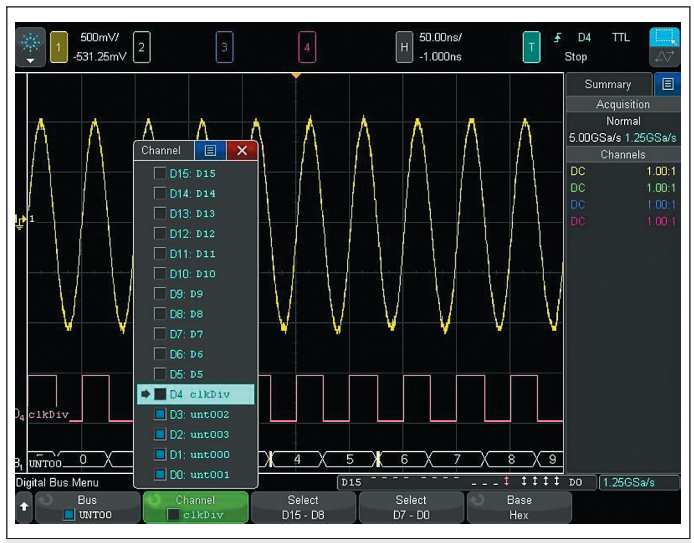

Рис. 9. Управление выводом осциллограммы аналогового и цифрового канала

Рис. 10. Одновременное наблюдение реального перепада с малой длительностью развертки и цифровых каналов

Рис. 11. Применение функции Zoom для смешанных сигналов

обзорной диаграммы. Если обнаруживаются выделенные белым цветом фронты, значит, растяжку целесообразно увеличить для более четкого наблюдения нестабильности фронтов.

Одновременное наблюдение аналоговых и логических сигналов

В некоторых случаях необходимо исследование логических сигналов на физическом уровне аналоговых сигналов или просто наблюдение последних вместе с временными диаграммами. На рис. 8 дан пример разбивки экрана под вывод 4 осциллограмм аналоговых каналов и 8 — цифровых.

На рис. 9 показано построение осциллограммы аналогового сигнала (синусоиды) и одной заданной осциллограммы цифрового сигнала. Выбор отображаемых осциллограмм осуществляется из выпадающей панели меню каналов осциллографа.

Вид осциллограмм смешанных сигналов показан на рис. 10 для случая достаточно короткой развертки. При этом отчетливо можно рассмотреть положительный фронт входного импульса первого аналогового канала и часть временных диаграмм цифровых каналов.

При просмотре осциллограмм смешанных сигналов можно использовать операцию расширения по горизонтали Zoom (рис. 11). Нетрудно заметить, что в данном случае она применима как для аналогового (он отображает тактовые импульсы), так и для цифровых каналов.

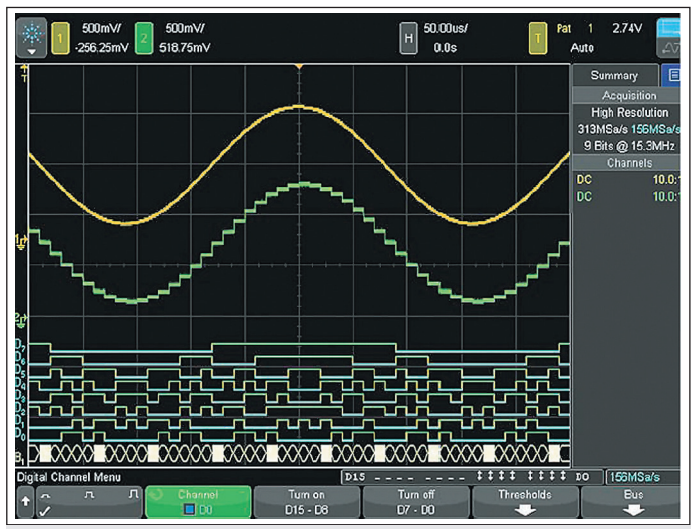

Рис. 12. Аналоговые и цифровые сигналы цифро-аналогового преобразователя

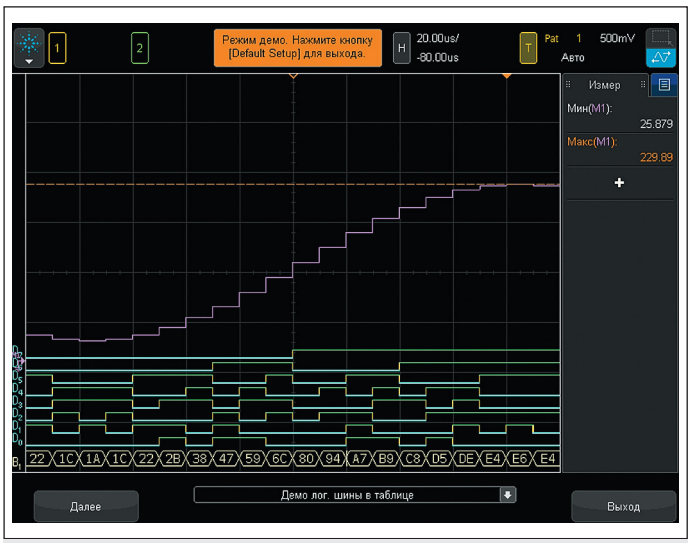

Рис. 13. Демонстрационный пример наблюдения и анализа смешанных сигналов

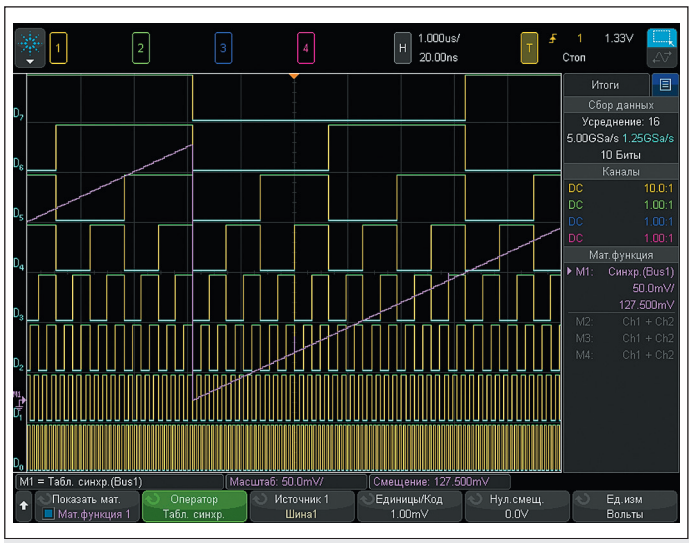

Рис. 14. Временные диаграммы с осциллограммой сигнала ЦАП

Часто смешанные сигналы используются в цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП). На рис. 12 показаны сглаженный фильтром и квантованный сигналы с выхода ЦАП и его временные диаграммы. Форма сигнала задается диаграммой логических состояний и весами разрядов ЦАП.

Еще один пример такого рода представлен на рис. 13. Это демонстрационный пример из меню Help (Справка) осциллографа. Он наглядно иллюстрирует квантование по уровню (амплитуды ступенек различны, тогда как их длительность постоянна).

У некоторых осциллографов, в том числе серии 4000 X, предусмотрено построение по логическим диаграммам суммарного сигнала ЦАП с весами разрядов 0, 1, 2, 4, … . Такое построение показано на рис. 14 (осциллограмма малинового цвета). Эта осциллограмма является расчетной и отражает линейный закон роста выходного напряжения.

У осциллографов серии 4000 X запуск и синхронизация временной развертки может осуществляться с различных участков осциллограмм и по различным условиям. Есть и фирменная особенность — запуск по зоне, которую пересекает или не пересекает осциллограмма, а саму зону можно обозначить пальцем на сенсорном экране или с помощью компьютерной мыши.

Декодирование последовательных шин

Важным нововведением в осциллографах стала функция декодирования сигнала данных последовательных шин [2, 3]. У осциллографов серии 4000 X эта функция позволила создать довольно полноценную систему тестовых сигналов в составе справочной системы осциллографа. Теперь их можно просматривать и изучать даже в отсутствие опций анализа конкретных последовательных линий, которые нужно приобретать и оплачивать дополнительно.

Последовательные данные принципиально отличаются от параллельных тем, что передаются не по *n*-разрядным каналам связи, а по одному каналу. При этом используются различные виды каналов — на базе линии передачи на печатной плате, дифференциальной пары, неэкранированной и экранированной пары скрученных проводов и, наконец, различные типы беспроводных линий связи. Давно ушло в прошлое представление о меньшей скорости передачи последовательных данных по сравнению с параллельными. На самом деле, уменьшение числа каналов и простота их реализации на современном уровне микроэлектронных технологий позволили резко повысить скорость передачи. Это и привело к развитию последовательных систем и к их широкому применению.

Типовая система тестирования последовательных шин показана на рис. 15. Она достаточно проста, но тестирование осложняется

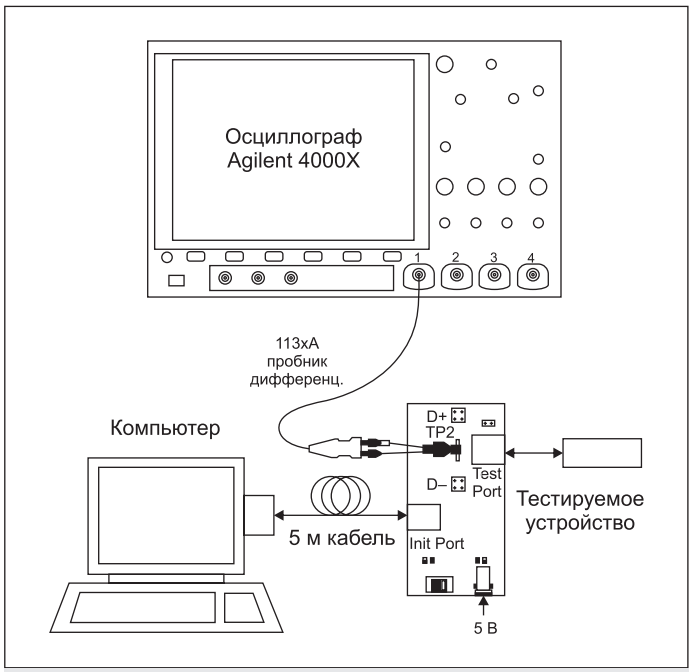

Рис. 15. Типовая система тестирования последовательных шин

большим числом протоколов, по которым организована работа шин. Как правило, создать одну систему тестирования не удается — она получается слишком сложной и чрезмерно усложняет осциллограф. Поэтому для каждого одного-двух протоколов выпускается (и отдельно продается) своя опция анализа. Нередко шины имеют широкий диапазон скоростей обмена данными, и для них приходится использовать отдельные опции и даже отдельные высокоскоростные осциллографы.

Разработчики шин и осциллографов часто создают специальные демонстрационные платы под некоторые виды шин, например под широко распространенную шину USB. Такие платы (рис. 16) значительно облегчают работу с шинами и позволяют освоить ее инженерам, тестирующим последовательные шины.

Для получения осциллограмм последовательных данных используются различные типы аналоговых пробников — как стандартные пассивные, так и дифференциальные активные (рис. 15). Последние часто имеют расширенную полосу частот и малую (порядка 1–2 пФ) входную емкость. Это значительно уменьшает нагрузку на шину,

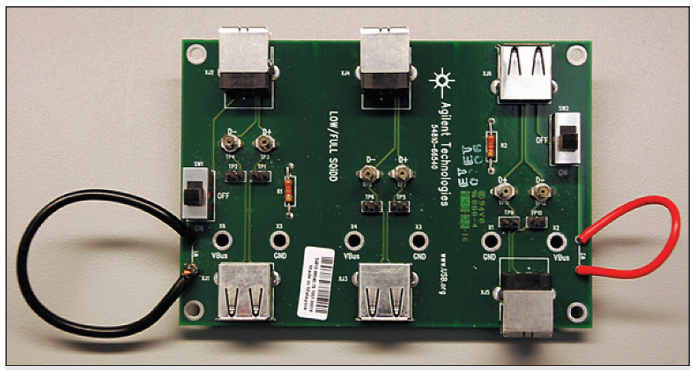

Рис. 16. Типичная демонстрационная плата для проверки декодирования последовательных шин

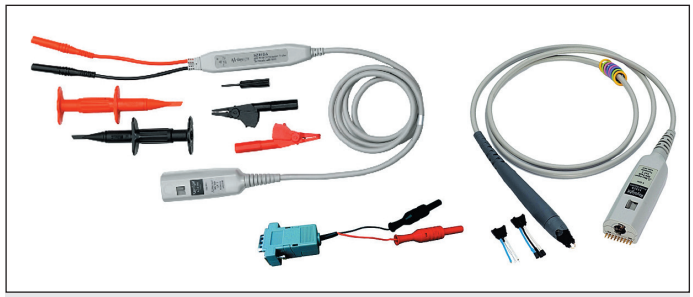

Рис. 17. Типичные аналоговые пробники для исследования последовательных данных: N2818A — 200 МГц и N2750A — 1500 МГц

Рис. 18. Осциллограммы дифференциальных сигналов одного канала связи

снижает временные задержки и повышает надежность и достоверность ее работы.

В опциях анализа некоторых последовательных шин дифференциальный вход имитируется двумя несимметричными каналами с операцией вычитания их напряжений (рис. 18).

Для настройки осциллографа на анализ последовательной шины надо точно определить параметры для правильного запуска осциллографа и декодирования. Эти параметры включают скорость обмена, глубину памяти, уровни запуска, пороги измерений и способ восстановления тактовой частоты (только для скоростных шин). Для упрощения данной процедуры некоторые осциллографы имеют кнопку «Автонастройка», или Setup, которая автоматически устанавливает все необходимые параметры. В дальнейшем их можно корректировать.

Тестовые и демонстрационные сигналы

Только что приобретенный осциллограф может не иметь опций анализа шин. Однако в режиме справки (Help) предусмотрена возможность просмотра демонстрационных примеров — в частности, тестирования широко распространенной шины USB (версия до USB3.0, которая требует для тестирования более скоростные осциллографы). Для подключения периферийных устройств к шине USB используется четырехпроводной кабель, при этом два провода (витая пара) в дифференциальном включении используются для приема и передачи данных (сигналы D– и D+ на рис. 19), а два провода — для питания периферийного устройства.

Рис. 19. Демонстрационный пример тестирования шины USB

На осциллограммах сигналов последовательных шин показаны временные зависимости данных и адреса посылок. Можно выводить данные в форме таблиц Lister (Листинг) в двоичной или шестнадцатеричной форме, а также некоторые вспомогательные сведения. Программа проводит автоматический анализ правильности данных в соответствии с выбранным протоколом шины. Неверные данные помечаются красным фоном. На демонстрационный пример указывает расположенная сверху надпись на желтом фоне.

Рассмотрим еще один демонстрационный пример — декодирование шины SPI (Serial Peripheral Interface). Эта шина — простой способ обмена данными между двумя цифровыми устройствами.

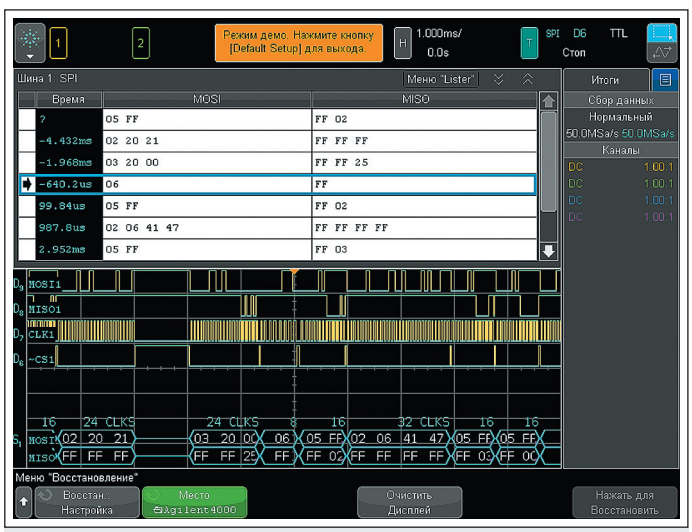

Рис. 20. Демонстрационный пример тестирования шины SPI

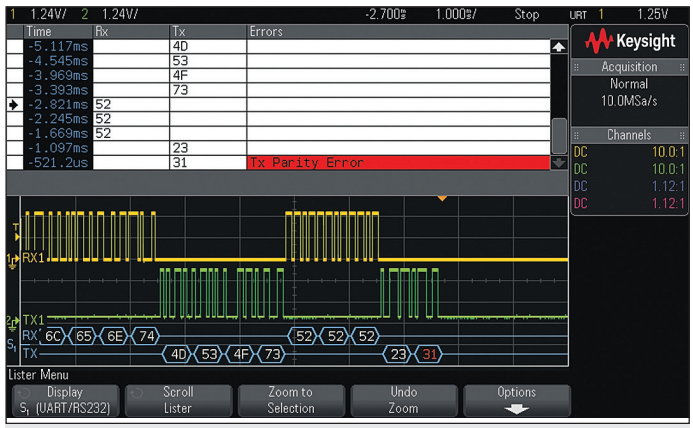

Рис. 21. Пример тестирования шины UART/RS-232 (опция DSOX4COMP)

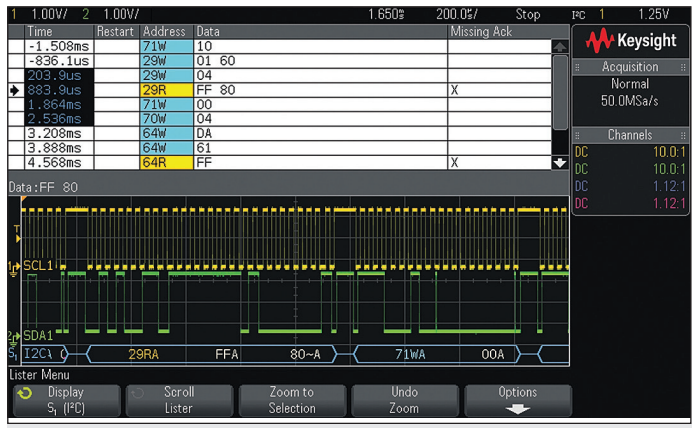

Рис. 22. Анализ шины I²C (опция DSOX4EMBD)

В настоящее время SPI-интерфейс активно применяется в датчиках температуры и давления, цифровых потенциометрах, АЦП и ЦАП, сенсорных экранах, звуковых кодеках, ЖК-экранах, MMC- и SD-картах памяти, в элементах программируемой логики (FPGA) и перепрограммируемой памяти (EEPROM) и т. д. SPI — четырехпроводной последовательный синхронный интерфейс между одним мастером (ведущее устройство) и одним помощником (ведомое устройство), не требующий дополнительного оборудования для подключения с другими SPI-совместимыми устройствами и обладающий широкими возможностями для конфигурирования. Каждый передаваемый бит данных в любом из направлений имеет собственный тактовый импульс. Поэтому SPI использует по крайней мере три различных сигнала (рис. 20):

- SCLK — тактирование последовательной связи (синхронизация);
- MOSI (Master Out Slave In) — последовательный ввод (данные от помощника к мастеру);
- MISO (Master In Slave Out) — последовательный вывод (данные от мастера к помощнику).

Анализ последовательных шин различного типа

С дополнительными опциями анализа последовательных шин возможно тестирование следующих протоколов: ARINC 429, CAN, FlexRay, I²C, I²S, LIN, MIL-STD-1553, SPI, UART/RS-232 и USB 2.0. Для тестирования таких шин используются осциллографы эконом- или среднего класса LeCroy [4], Tektronix или Keysight с полосой пропускания до 1–1,5 ГГц, в том числе серии 4000 X.

RS-232C — популярный асинхронный последовательный протокол, применяемый для связи компьютеров с модемами и другими периферийными устройствами с 1969 года. В советское время RS-232 был описан в ГОСТ 18145-81. Интерфейс RS-232C предусматривает передачу и прием информации по несимметричной линии, то есть сигнал передается относительно общего провода. Логической единице соответствует уровень –12…–3 В, логическому нулю +3…+12 В. При асинхронной передаче каждый символ (байт) пересылается отдельной посылкой. Посылка начинается со старт-бита, сигнализирующего приемнику о начале посылки, за которым следуют биты данных и, возможно, бит паритета (четности). Завершает посылку стоп-бит, гарантирующий паузу между посылками. Старт-бит следующей посылки посылается в любой момент после стоп-бита, вот почему режим и называется «асинхронный». Передатчик и приемник работают на одной скорости передачи данных, самостоятельно вырабатывая внутренние стробирующие импульсы, в идеале располагающиеся на середине байта, что позволяет достоверно принимать информацию при незначительной рассинхронизации скоростей передатчика и приемника (рис. 21).

Интерфейс UART (Universal Asynchronous Rreceiver/Transmitter) является наиболее «полной» разновидностью RS-232 со скоростью передачи данных до 2 764 800 бит/с. Принципиальным отличием в структуре интерфейса UART является то, что если в интерфейсе RS-232 стоп-бит мог принимать значения 1; 1,5 и 2, то у интерфейса UART значения стоп-бита могут быть только 1 и 2. К тому же в интерфейсе UART добавлены понятия «направление битов» и «уровень холостого хода». Направление битов означает, какие биты информации передаются первыми — старшие (MSB) или младшие (LSB). Уровень холостого хода, в отличие от интерфейса RS-232, в котором при отсутствии передачи информации уровень на шине принимает низкое значение или уровень логического нуля, в интерфейсе UART при отсутствии передачи информации уровень на шине может принимать как низкое значение (уровень логического нуля), так и высокое значение (уровень логической единицы).

I²C — это последовательный несимметричный протокол, позволяющий разделять схемные ресурсы между несколькими ведущими и несколькими ведомыми устройствами — микросхемами, подключенными к одной и той же шине. Шина I²C содержит две цепи: двунаправленную цепь SDA, служащую для передачи данных, и однонаправленную цепь SCL передачи синхросигналов, используемую для стробирования передачи данных. Протокол I²C поддерживает четыре режима передачи данных: стандартный режим на скорости 100 кГц, быстрый режим на скорости 400 кГц, ускоренный режим на скорости 1 МГц и высокоскоростной режим на скорости 3,4 МГц. Он использует следующий формат: старт-бит, адресные биты, биты чтения-записи (R/W), байт данных, бит подтверждения (ACK), бит отсутствия подтверждения (NACK) и стоп-бит.

В стандартном режиме шина I²C обеспечивает передачу последовательных 8-битных данных со скоростью до 100 и 400 кбит/с в скоростном режиме или со скоростью 3,4 Мбит/с в высокоскоростном режиме работы. Для осуществления процесса обмена информацией по I²C-шине используется всего два сигнала: линия данных SDA и линия синхронизации SCL (рис. 22). Для обеспечения реализации двунаправленности шины без применения сложных арбитров шины выходные каскады устройств, подключенных к шине, имеют открытый сток или открытый коллектор для обеспечения функции монтажного «И».

Коммуникационный протокол Communications System a FlexRay — это устойчивый к сбоям коммуникационный протокол, который может стать основой будущих электронных автомобильных систем (или, как их называют на Западе, Drive-by-wire). В электронных автомобилях механическая связь между водителем, двигателем, колесами и даже колодками тормозов будет заменена электронной. Поэтому автопроизводители разрабатывают концепцию безопасного обмена данными для электронного автомобиля и такую его архитектуру, которая могла бы надежно связывать критические компоненты с драйверами программного обеспечения, а те, в свою очередь, с интерфейсом пользователя (в данном случае водителя автомобиля).

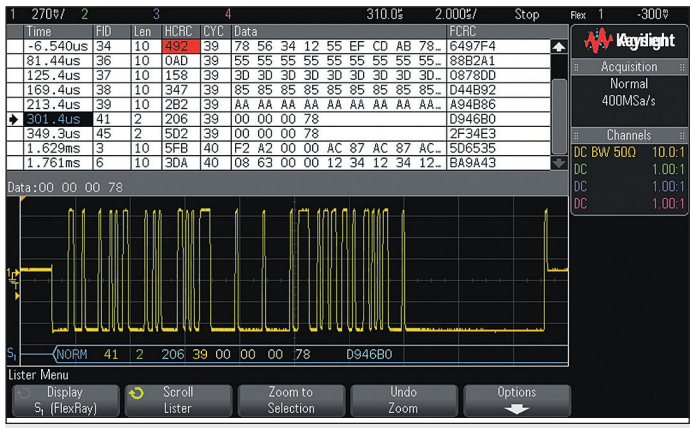

Рис. 23. Тестирование шины FlexRay (опция DSOX4FLEX)

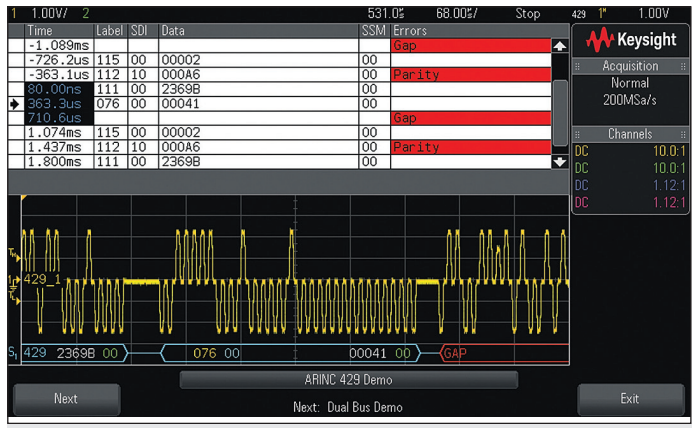

Рис. 24. Тестирование шины ARINC429 (опция DSOX4AERO)

Внедрение нового коммуникационного протокола FlexRay приведет к появлению целого спектра электронных систем by-wire, которые должны обладать более высокой надежностью по сравнению с существующими автомобильными системами. Будущие системы управления могут полагаться на надежные каналы связи со скоростью передачи данных до 10 Мбит/с для каждого канала и предсказуемыми длительностями задержек, что станет ключевыми требованиями в автомобильной промышленности. Новое поколение автомобильных систем управления с компонентами FlexRay получило название X-by-wire.

Отметим, что приборы FlexRay совместимы с основными стандартами современных бортовых сетей (сети контроллеров CAN, сети локальной внутренней связи LIN и сети MOST), так что переход может осуществляться поэтапно. Однако технология FlexRay приблизительно в 10 раз быстрее шины CAN, поэтому ожидается постепенная замена сетей CAN на решения X-by-Wire в транспортных средствах нового поколения как производителями автомобилей, так и их поставщиками.

Контроллеры FlexRay построены по двухканальной архитектуре, разработанной специально для электромеханического управления, такого как Steer-by-wire (электронное рулевое управление, или Active Steering) и Brake-by-wire (электронное управление тормозами). Внедрение электромеханических схем — вопрос времени; не стоит даже сомневаться, что все управление в автомобилях ближайшего будущего станет полностью цифровым. Тестирование шины FlexRay показано на рис. 23.

ARINC 429 является основной шиной для большинства хорошо экипированных летательных аппаратов. ARINC 429 — это двухпроводная шина данных на основе витой пары. Размер слова составляет 32 бит, а большинство сообщений состоит из единственного слова данных. Спецификация определяет электрические характеристики, характеристики обмена данными и протоколы. ARINC 429 использует однонаправленный стандарт шины данных (линии передачи и приема физически разделены). Сообщения передаются на одной из трех скоростей: 12,5, 50 или 100 кбит/с (рис. 24). Передатчик всегда активен, он передает 32-битовые слова данных или выдает «пустой» уровень. На шине допускается не более 20 приемников и не более одного передатчика.

Некоторые опции позволяют анализировать и сравнивать две схожие по параметрам последовательные шины. На рис. 25 показано такое сравнение для шин CAN и LIN. Приведенных примеров достаточно, чтобы охарактеризовать возможности современных осциллографов. Они охватывают лишь часть типов тестируемых шин.

Тестирование по маске сигналов последовательных шин

Если вы выполняете тестирование типа «годен/не годен» по определенным стандартам в процессе производства или тестирование на предмет редких аномалий, в том числе работая с сигналами последовательных шин, то тестирование по маске может оказаться

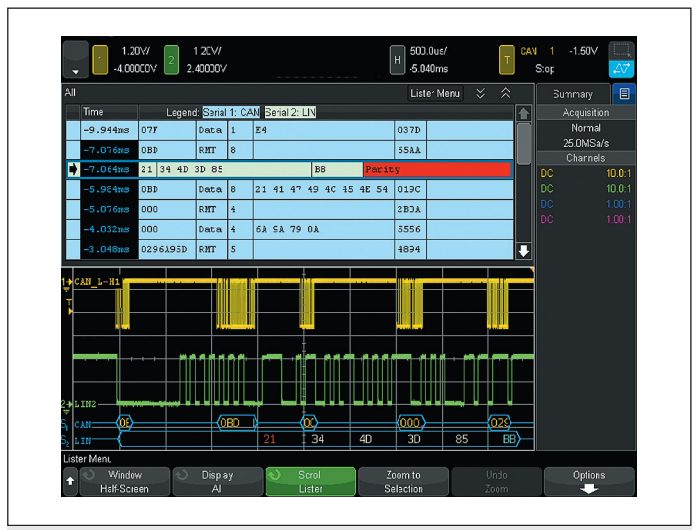

Рис. 25. Сравнительное декодирование шин CAN и LIN (опция DSOX4AUTO)

ценным средством повышения производительности. Маска — это область или геометрическая фигура, ограничивающая доступное расположение осциллограмм. Маску можно построить по любой форме и участку сигнала: по фронту, по индикаторной диаграмме (наподобие глазковой диаграммы). Осциллографы Keysight серии 4000 X имеют мощное аппаратно реализованное тестирование по маске, способное выполнять до 270 000 тестов в секунду.

Вы сможете выбрать несколько критериев тестирования, включая возможность выполнения тестирования для заданного числа захватов, определенного времени или до определения ошибки.

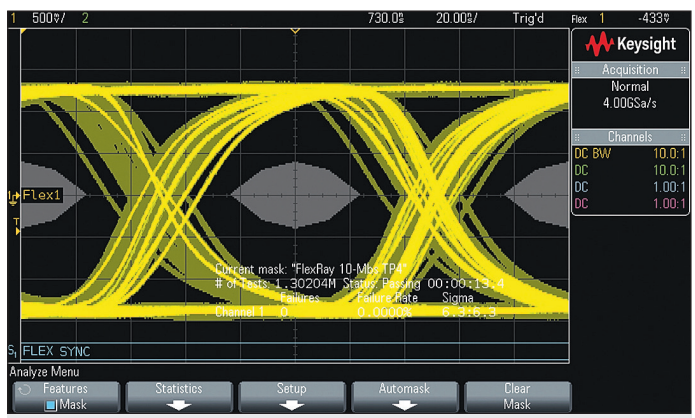

Рис. 26. Монохромная индикаторная диаграмма

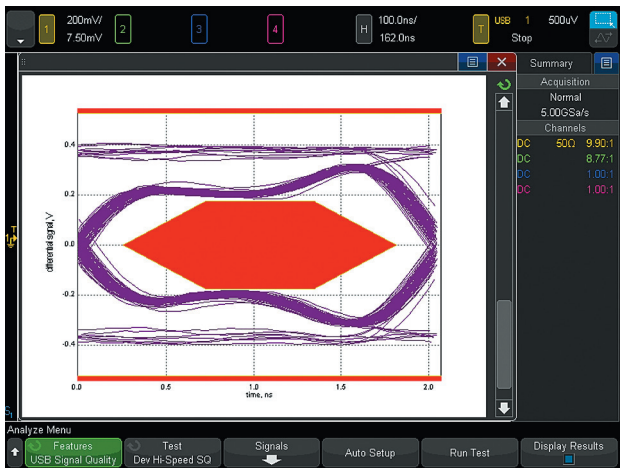

Рис. 27. Цветная индикаторная диаграмма

Рис. 28. Выделение укороченного импульса малой длительности

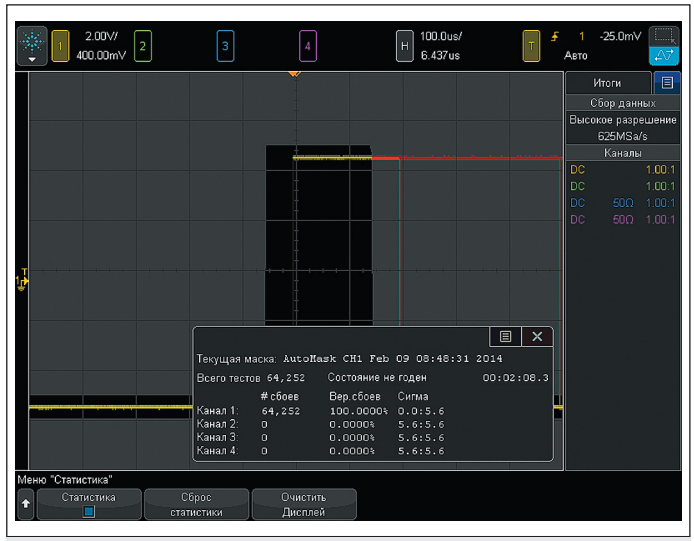

Рис. 29. Пример построения маски перемещением прямоугольного импульса

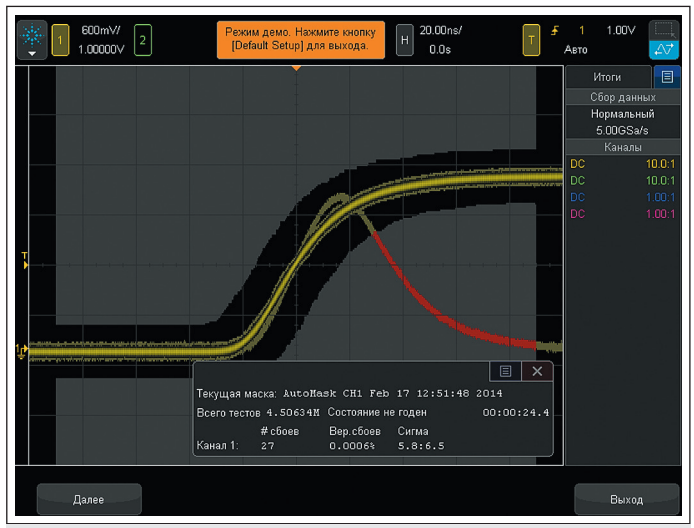

Рис. 30. Пример построения маски перемещением перепада конечной длительности и обнаружения глитча

На рис. 26 и 27 показаны примеры тестирования по маске индикаторной диаграммы. Попадание в маску, что является следствием наличия помехи и бракованного изделия, отображается красной окраской и может сопровождаться заданной остановкой осциллографа.

Часто пользователя интересует определенная деталь осциллограммы данных — например, наличие укороченного импульса. Для поиска такого импульса можно применить запуск по условию (в частности, по длительности импульса) — рис. 28.

Нередко маски строятся перемещением осциллограмм. Пример этого показан на рис. 29. Так строятся и самые простые, и сложные маски. Подобный подход часто применяется при организации допускового контроля.

У приборов есть в наличии режим послесвечения — имитация экрана аналогового осциллографа с регулируемой или бесконечной длительностью этого эффекта. Послесвечение тоже является мощным средством обнаружения аномалий малой длительности — они успевают показать себя на короткое время и запоминаются осциллографом на экране (рис. 30).

Заключение

Развитие сверхскоростной электроники (с временами переходных процессов менее 1 нс и частотами выше 350 МГц) привело к массовому выпуску цифровых осциллографов с превосходными характеристиками. Появились осциллографы смешанных сигналов (и даже областей анализа) и комбинированные осциллографы с 5–6 встроенными приборами, включая анализаторы параллельных и последовательных шин и даже анализаторы спектра. Как показало исследование таких новейших осциллографов, как Keysight InfiniiVision серии 4000 X, они прекрасно приспособлены для декодирования и анализа параллельных и последовательных шин различных протоколов и стандартов.

Литература

1. Осциллографы Agilent InfiniiVision 4000 серии X. Руководство для пользователя. Agilent Technologies, Inc., 2013.
2. Бек Д. Применение осциллографов для отладки последовательных шин // Компоненты и технологии. 2010. № 12.
3. Serial Bus Options for InfiniiVision X-Series Oscilloscopes. Data Sheet. Agilent Technologies, Inc. 5990-6677EN. July 26, 2013.
4. Дедюхин А. А. Декодирование и анализ сигналов шин I²C, SPI, RS-232C, RS-422, RS-485 и UART с использованием осциллографов LeCroy. www.prist.ru/info.php/articles/i2c_spi_rs_lecroy_analyze.htm
5. Дьяконов В. П. Сверхскоростная твердотельная электроника. Том 1 и 2. М.: ДМК-Пресс, 2013.