

Широкополосные стробоскопические USB-осциллографы — приставки к персональным компьютерам

Владимир ДЪЯКОНОВ,
д. т. н., профессор
vpdyak@yandex.ru

Ведущие в осциллографии фирмы LeCroy, Tektronix и Agilent Technologies выпускают стробоскопические осциллографы с полосой частот до 80–100 ГГц, но это очень дорогие и уникальные приборы. Их можно встретить далеко не в каждой радиотехнической лаборатории. Поэтому большой интерес представляют разработки стробоскопических осциллографов — приставок к персональным компьютерам (ПК), которые имеют полосу частот до 20–30 ГГц, но стоят почти на порядок дешевле стационарных моделей таких осциллографов ведущих компаний мира. В статье описано состояние разработок таких приставок с USB- и LAN-интерфейсом, подключаемых к ПК.

Введение

Зависимость погрешности амплитудных измерений в функции от полосы пропускания осциллографа для микросхем с разным временем переключения (рис. 1) показывает, что для исследования микросхем с субнаносекундным временем переключения необходимы осциллографы с полосой частот в единицы-десятки ГГц. В настоящее время такую полосу имеют в основном цифровые осциллографы, работающие в реальном масштабе времени, и стробоскопические осциллографы [1–7].

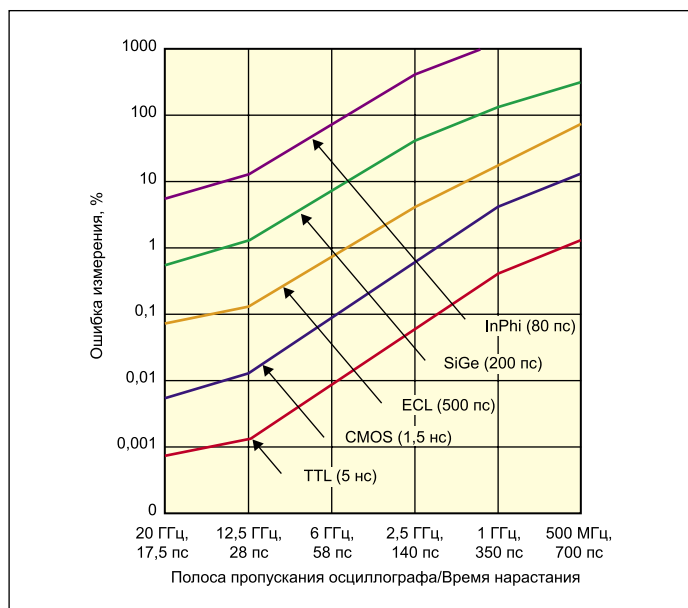


Рис. 1. Погрешность измерений в функции от полосы пропускания осциллографа для микросхем с разным временем переключения

Разница между этими приборами в том, что в осциллографах реального времени на период сигнала приходится множество операций стробирования, а в «стробоскопических» осциллографах операция стробирования последовательно или в случайном порядке применяется к ряду периодов поодиночке, позволяя уменьшить шаг дискретизации сигнала. Поэтому полоса исследуемых частот стробоскопических осциллографов раза в три и более превосходит полосу частот наиболее широкополосных цифровых осциллографов реального времени. Но стробоскопические осциллографы не позволяют получать форму одиночных сигналов, так как для накопления информации о форме сигнала они нуждаются в обработке ряда его периодов.

До сих пор широкополосные стробоскопические осциллографы были стационарными, громоздкими и дорогими приборами, и их выпускало небольшое число крупных фирм. Важной частью таких



Рис. 2. Начальная страница сайта фирмы Pico Technology

приборов был встроенный компьютер, который использовался для реализации алгоритмов управления, отображения осциллограмм и построения разнообразных диаграмм — от обычных осциллограмм с персистенцией (имитацией аналогового послесвечения люминофора электронно-лучевых трубок) до диаграмм с маской и глазковых диаграмм, применяемых в технике тестирования широкополосных устройств и систем связи [6, 7].

Постепенно стало ясно, что один из путей существенного упрощения и удешевления цифровых осциллографов — их конструирование в виде приставок к обычному настольному или мобильному персональному компьютеру. Благо такой современный компьютер не только не уступает, но и превосходит по возможностям узкоспециализированный встроенный компьютер цифровых осциллографов, а массовое производство персональных компьютеров привело к резкому снижению их стоимости.

Осциллографы в виде приставок к обычным ПК были созданы и выпущены рядом фирм, например крупной компанией Agilent Technologies. Однако долгое время осциллографы-приставки имели довольно скромные параметры и рассматривались скорее как не совсем полноценные модели для бюджетных организаций, не имеющих средств для приобретения серьезных приборов. В 1991 г. появилась небольшая английская компания Pico Technology, которая поначалу занималась созданием массовых приставок для различных измерений, подключаемых к ПК через USB (универсальная последовательная шина) или LAN (сеть). В 2002 г. фирма прославилась созданием подобного тестирующего оборудования для автомобилей, получившего широкое распространение во всем мире.

В настоящее время (рис. 2) эта компания выпускает ряд серий приставок — электронных осциллографов, подключаемых к ПК



Рис. 3. USB стробоскопический осциллограф-приставка PicoScope серии 9200

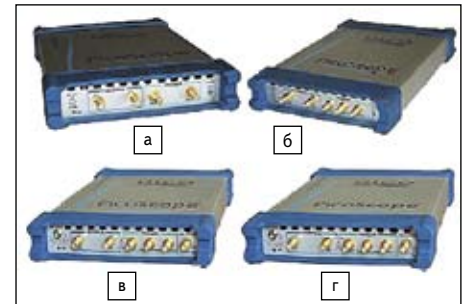


Рис. 4. Внешний вид USB стробоскопических осциллографов-приставок PicoScope серии 9200: а) PicoScope 9201A; б) PicoScope 9211A; в) PicoScope 9221A; г) PicoScope 9231A

через интерфейсы USB и LAN. Приборы имеют миниатюрный пластмассовый корпус и являются одноплатами. Управление ими осуществляется от ПК программными средствами.

Среди приставок этой фирмы особое место занимают стробоскопические осциллографы-приставки PicoScope серии 9200 (рис. 3, 4). Эти приборы, выпущенные в 2008 г., имеют два режима работы с разной полосой частот: обычная полоса 0–12 ГГц и узкая (с уменьшенным уровнем шумов) — 0–8 ГГц. Выпускаются приборы и со встроенным генератором тестирующих импульсов с субнаносекундными фронтами, различными видами синхронизации и средствами для реализации рефлектометрии во временной области. Благодаря применению стробоскопического метода осциллографии приставки имели в 20–50 раз более широкую полосу частот, чем дешевые модели, выпускаемые многими фирмами.

Приставки этой серии внешне отличаются лишь видом передней панели, на которой установлены (кроме индикатора включения) несколько коаксиальных разъемов (входы каналов вертикального отклонения

и синхронизации, выход генератора тестовых импульсов и др.). Конструкция приставок предельно проста, но содержит высокоскоростные узлы широкополосных (полоса 12 или 8 ГГц) стробоскопических осциллографов. Это генератор субнаносекундных стробирующих импульсов и смесители двух каналов вертикального отклонения.

Благодаря использованию стандартного ПК экран дисплея имеет достаточно большие размеры и высокое разрешение. Это позволяет получать качественные осциллограммы и тонкие детали интерфейса. На рис. 5 показано окно экрана ПК при работе совместно с ним осциллографа серии 9201. В окне представлена осциллограмма сигнала с частотой 1 ГГц. Виден небольшой шум, который заметен как расширение осциллограммы. Интерфейс системы «осциллограф — компьютер» интуитивно понятен и соответствует концепции оконного интерфейса приложений операционной системы Windows XP (и более старших серий).

На рис. 6 показано окно дисплея ПК при отображении тестового импульса, получаемого от генератора на туннельной диоде. Здесь также приведен случай применения режима авто-

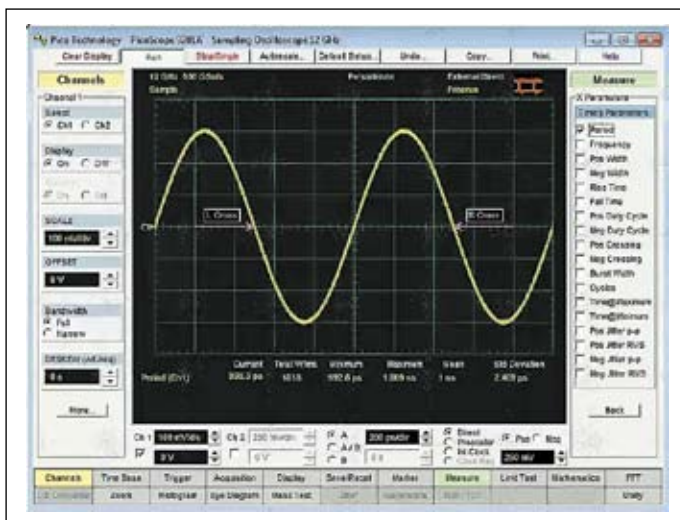


Рис. 5. Окно интерфейса пользователя осциллографа-приставки 9201 с осциллограммой синусоиды с частотой 1 ГГц

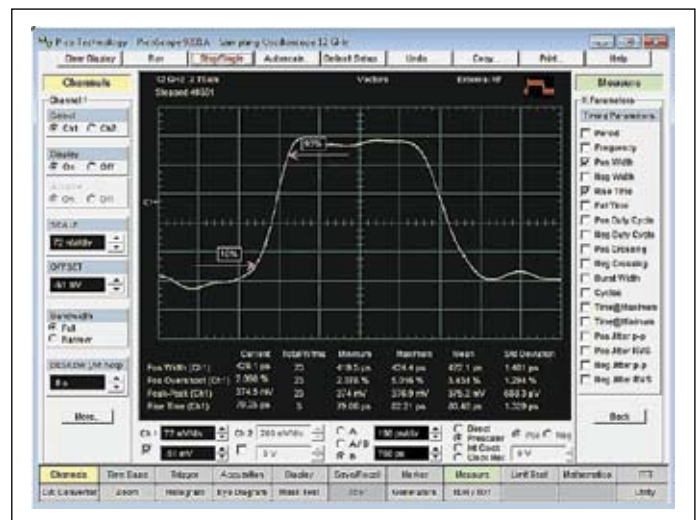


Рис. 6. Окно интерфейса осциллографа 9201 с осциллограммой тестового импульса и результатами автоматических измерений

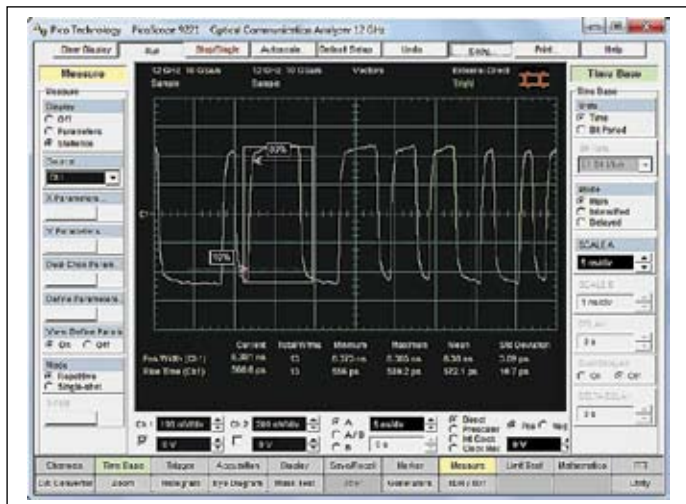


Рис. 7. Окно интерфейса осциллографа 9201 с осциллограммой тестового импульсного сигнала с выделением его части

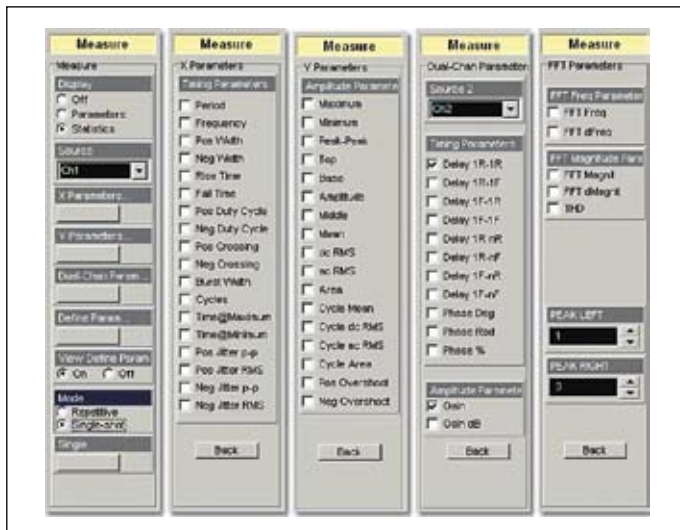


Рис. 8. Панели установок автоматических измерений осциллографа 9201

матических измерений временных параметров наблюдаемого импульса. Для этого используется позиция Measure нижнего меню и выводится панель нужных измерений (она видна в правой части экрана). Таблица с четырьмя строками, представляющая результаты измерений, находится под осциллограммой.

Приставка позволяет наблюдать сложные импульсные сигналы с выделением их части (рис. 7) и дальнейшим просмотром осциллограммы, выведенной на весь экран. При использовании режима усреднения сигналов максимальная разрешающая способность приборов по вертикали достигает 14 бит, что позволяет получить высокое качество осциллограмм — их прорисовку тонкой линией и отчетливое представление особенностей сигналов. Для этого применяется операция усреднения заданного числа осциллограмм.

Приставки серии 9200 имеют до 40 автоматических измерений. На рис. 8 показаны все панели измерений, которые входят в состав позиции Measure основного меню работы.

С их помощью можно выбрать нужный вид измерений и задать его параметры.

Приборы позволяют строить не только осциллограммы исследуемых сигналов, но и опорные осциллограммы, форма которых задается различными математическими функциями и выражениями с ними. Для этого в состав программного обеспечения осциллографов входит простой математический редактор. Пример выполнения математических операций показан на рис. 9. Осциллограммы отличаются цветом.

Осциллографы-приставки серии 9200 позволяют отчетливо наблюдать временную и амплитудную нестабильность исследуемых сигналов и оценивать ее с помощью микрогистограмм. На рис. 10 показан пример наблюдения временного джиттера синусоидального сигнала. Для детального изучения джиттера предусмотрены построение вертикальных и горизонтальных (для амплитудного джиттера) миниатюрных гистограмм, а также вывод статистических параметров джиттера.

Классикой широкополосных измерений стали глазковые диаграммы. Они позволяют наблюдать одновременно входные и выходные сигналы с джиттером и по сужению «глазков» оценивать области приемлемой работы тестируемых систем и устройств. Построение глазковых диаграмм было характерно для настольных осциллографов достаточно высокого класса с полосой частот 1 ГГц и выше. Но, как видно на рис. 11, такие диаграммы высокого качества позволяют строить и осциллографы-приставки серии 9200.

Степень сужения «глазков» у таких диаграмм можно задавать с помощью масок — многоугольников, задающих недопустимые области расположения осциллограмм. Для этого приставки имеют специальный редактор для задания масок. Пример построения глазковой диаграммы с масками показан на рис. 12. При этом одновременно используется и функция цветной персистенции — моделирования аналогового послесвечения осциллограмм.

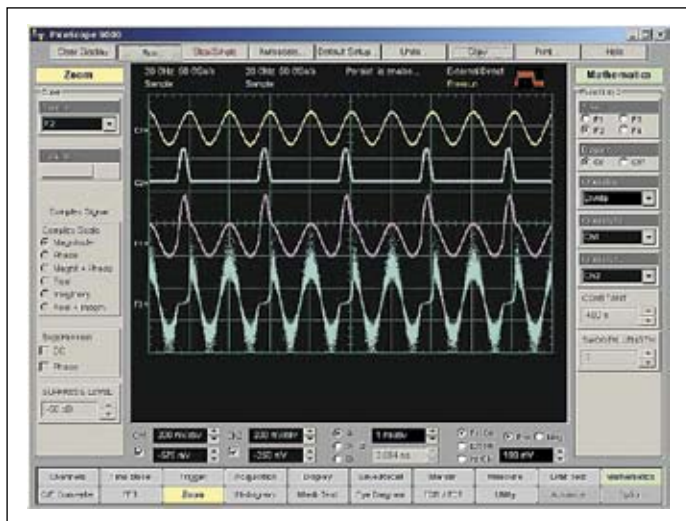


Рис. 9. Пример выполнения математических операций

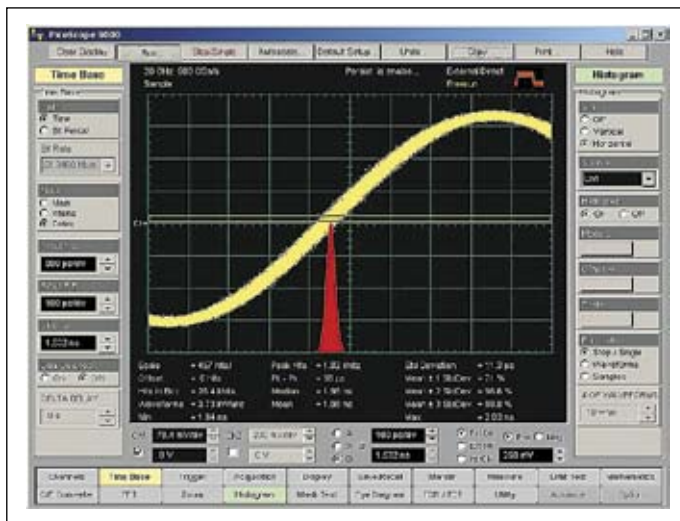


Рис. 10. Пример построения гистограммы временного джиттера

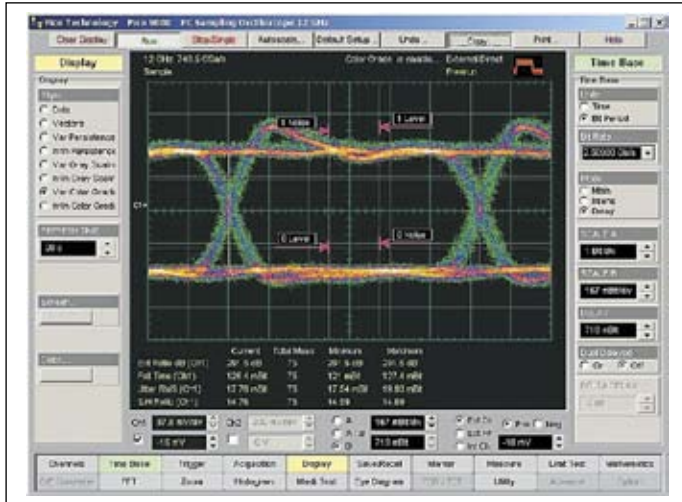


Рис. 11. Пример построения глазковой диаграммы

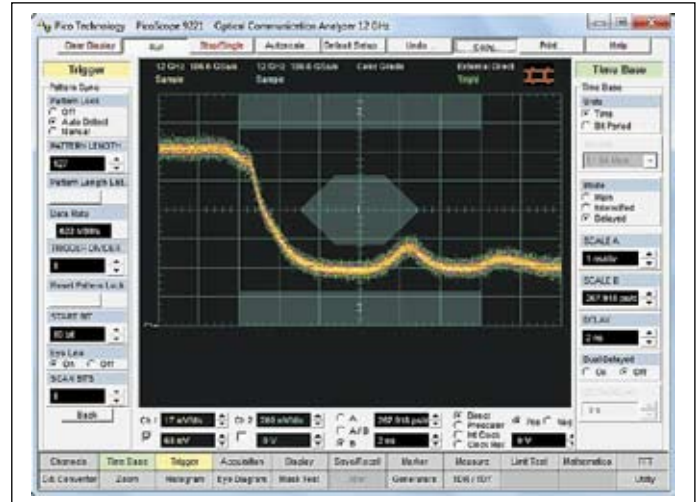


Рис. 12. Пример построения масок

Рассмотрим типовые параметры осциллографов-приставок серии 9200:

- Число каналов: 2 (с одновременной выборкой).
- Полоса пропускания: обычная — 0–12 ГГц, узкая — 0–8 ГГц.
- Время нарастания: при обычной полосе — 29,2 пс, при узкой полосе — 43,7 пс.
- Уровень собственных шумов, с. к. з.: при обычной полосе <2,5 мВ, при узкой полосе <2 мВ.
- Коэффициент отклонения по вертикали: 2–500 мВ/дел. с шагом 1, 2, 5.
- Входное сопротивление: 50 ± 1 Ом.
- Разрешение по вертикали: 16 бит.
- Коэффициент развертки: от 10 пс/дел. до 50 мс/дел. с шагом 1, 2, 5 или приращениями по 0,1%.
- Режимы развертки: основная, подсвеченная, две задержанные, двойная задержанная.
- Погрешность измерения временных интервалов: ± 15 пс $\pm 0,4\%$ от измеряемого временного интервала.
- Временное разрешение: 200 фс (min).
- Источники синхросигнала: внешний, внешний с делителем частоты, внутренний (сигналом тактовой частоты).
- Полоса и чувствительность входа внешней синхронизации: 100 мВ_{п-п} при 0–100 МГц, линейное увеличение от 100 мВ_{п-п} при 100 МГц до 400 мВ_{п-п} при 1 ГГц.
- Полоса и чувствительность входа внешней синхронизации с делителем: от 200 мВ_{п-п} до 2 В_{п-п} в диапазоне 1–8 ГГц, от 300 мВ_{п-п} до 1 В_{п-п} при 10 ГГц.
- Нестабильность синхронизации, с. к. з., не более: $3,5$ пс + 20×10^{-6} от установленной задержки.
- Частота повторения осциллограмм: от 0 до 100 кГц (max).
- Режимы выборки данных: стандартная выборка, усреднение, огибающая.
- Объем памяти осциллограммы: 32–4096 точек на канал с шагом $\times 2$.

- Тип маркеров: X-маркеры (время), Y-маркеры (напряжение), XY-маркеры (сигнальные маркеры).
- Автоматические измерения: до 40 параметров.
- Гистограммы: вертикальные или горизонтальные.
- Математические функции: вычисление и отображение до 4 математических функций (сигналов).
- Быстрое преобразование Фурье (БПФ): до 2 БПФ одновременно со встроенными фильтрами (прямоугольным, Николсона, Хэннинга, плоское, Блэкмана-Харриса, Кайзера-Бесселя).
- Глазковые диаграммы.
- Автоматические измерения параметров NRZ и RZ глазковых диаграмм. Измерения основаны на статистическом анализе сигналов.
- Маски: до 8 полигонов (создание или загрузка с диска).
- Максимальное входное напряжение: ± 2 В (DC+AC пик).
- Условия эксплуатации: диапазон рабочих температур +5...40 °С.

Осциллографы-приставки серии UDS-2000

Дальнейшее развитие стробоскопических осциллографов-приставок обеспечила серия UDS-2000, выпускаемая рядом фирм (Eltesta, Acqitek и др.). Литовская компания Eltesta была создана специалистами хорошо известного во времена СССР Вильнюсского НИИ радиоизмерительных приборов. Основой ряда моделей ее осциллографов-приставок стали приборы серии UDS-2000 (рис. 13).

Опыт создания советских настольных стробоскопических осциллографов С1-91/3, С1-91/4, С9-9, С7-20, С7-23 и др. позволил фирме создать СВЧ-блоки (рис. 14), обеспечивающие расширение полосы частот осциллографов-приставок до 30 ГГц (рис. 15).



Рис. 13. Внешний вид USB стробоскопического осциллографа-приставки UDS-2022 фирмы Eltesta



Рис. 14. СВЧ-блоки USB стробоскопического осциллографа-приставки UDS-2022 фирмы Eltesta



Рис. 15. 30-Гц СВЧ-блок USB стробоскопического осциллографа-приставки UDS-2022 фирмы Eltesta



Рис. 16. Внешний вид USB стробоскопического осциллографа-приставки UDS-2128 фирмы Eltesta



Рис. 17. Внешний вид USB стробоскопического осциллографа-приставки UDS-2214 фирмы Eltesta с возможностью TDR/TDT

Они нашли применение в осциллографах-приставках UDS-2020, 2022 и 2030 с полосой частот (обычной) 20 и 30 ГГц. Прибор UDS-2128 (рис. 16) — это анализатор коммутационных сигналов с расширенными возможностями анализа сложных сигналов (в том числе оптических сигналов). Для работы с оптическими сигналами предусмотрен широкополосный конвертор оптических сигналов в электрические.

Новая модель UDS-2214 фирмы Eltesta (рис. 17) отличается по возможностям реализации временной рефлектометрии во временной области (Time Domain Reflectometer, TDR, и Time Domain Transmission, TDT).

Для устойчивого наблюдения формы СВЧ-сигналов с частотами в единицы-десятки ГГц необходимы пороговые (триггерные) схемы и синхронизируемые автогенераторы на основе релаксационных генераторов. Для построения таких устройств в настольных стробоскопических осциллографах применяются специализированные монолитные или гибридно-пленочные интегральные микросхемы на гетеропереходных SiGe или InPhi-транзисторах. Однако технология изготовления таких сверхскоростных интегральных микросхем сложна и дорога, так что в осциллографах-приставках она пока не применяется.

В последних обычно применяются миниатюрные блоки на «добрых старых» германиевых туннельных диодах таблеточной конструкции, время переключения которых составляет несколько десятков пикосекунд. Блоки смесителей (рис. 18) имеют жесткую экранированную конструкцию на основе литого шасси с фрезерованными отсеками. Сигнальный тракт СВЧ-блоков на 50 Ом — согласованный, время переключения туннельного диода в блоках составляет менее 30–50 пс, типичное значение временного джиттера — около 2 пс. Амплитуда перепада выходного сигнала блоков невелика и составляет около 200 мВ.

Программное обеспечение приставок UDS-2000 практически аналогично таковому



Рис. 18. СВЧ-блоки синхронизации (триггеры) фирмы Eltesta

для приборов фирмы PicoScope (рис. 19). Приборы имеют практически идентичный интерфейс пользователя. В этом нетрудно убедиться, сравнив окно осциллографа UDS-2000 с окном PicoScope 9201, которое показано на рис. 6.

На рис. 20 приведен пример построения маски путем перемещения по вертикали осциллограммы импульса. Такой способ удобен, когда нужно контролировать допустимую зону расположения осциллограммы по вертикали.

Редактор построения масок стробоскопических осциллографов-приставок позволяет строить несколько масок. На рис. 21 дан пример применения трех отдельных масок с выводом глазковой диаграммы. Нетрудно заметить, что когда осциллограмма (в данном случае глазковой диаграммы) попадает в зону маски, соответствующая часть осциллограммы окрашивается красным цветом.

Стробоскопические осциллографы-приставки имеют расширенные средства курсорных измерений. Они бывают необходимы, когда затруднено применение автоматических измерений, например при контроле точек пересечения осциллограмм входного и выходного сигналов в глазковых диаграммах (рис. 22).

Как уже отмечалось, для более точной оценки джиттера используется техника построения гистограмм. На рис. 23 показан пример построения горизонтально расположен-



Рис. 19. Окно осциллографа UDS-2000 фирмы Eltesta с осциллограммами 14-Гц синусоиды и перепада от генератора тестовых импульсов

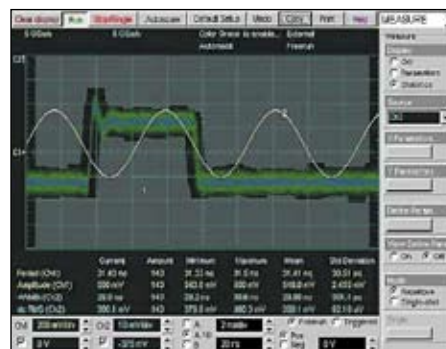


Рис. 20. Пример построения маски перемещением осциллограммы

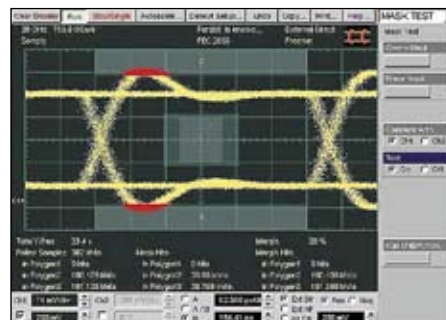


Рис. 21. Пример работы со многими масками

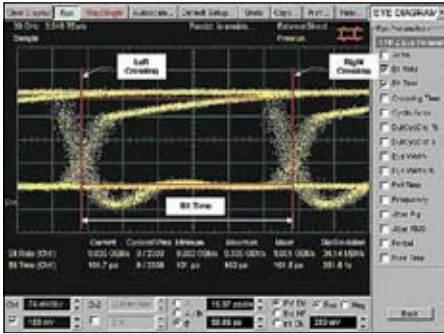


Рис. 22. Пример применения вертикальных и горизонтальных курсоров для измерения параметров глазковой диаграммы

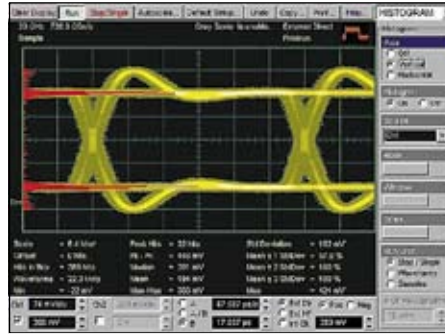


Рис. 23. Пример построения горизонтальных гистограмм для контроля амплитудного джиттера

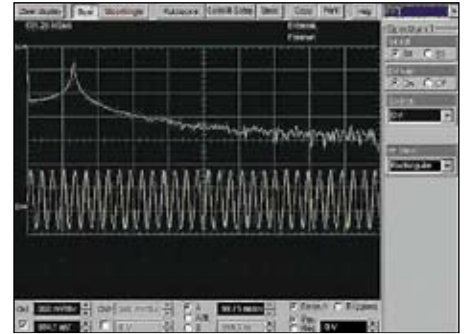


Рис. 24. Спектр синусоидального сигнала (сверху) и осциллограмма сигнала (снизу)

ных гистограмм для контроля амплитудного джиттера. Гистограммы позволяют оценивать закон распределения уровней сигналов. Он часто, но не всегда, близок к нормальному закону распределения.

Спектральный анализ и рефлектометрия

Как и настольные цифровые осциллографы, стробоскопические приставки позволяют реализовать быстрое преобразование Фурье (БПФ, или FFT) для построения спектра наблюдаемого сигнала

(рис. 24). Вид пиков гармоник спектра и их частотное разрешение можно менять выбором окна.

Традиционной областью применения высокоскоростных осциллографов является рефлектометрия — контроль характеристик объектов во отражению сигналов от их неоднородностей. К таким объектам относятся кабельные и полосковые линии передачи, СВЧ-фильтры с коаксиальным волноводным трактом и другие устройства. На рис. 25 показано подключение стробоскопического осциллографа-приставки для проведения рефлектометрии во временной области. Тестируемое устройство обозначено как D.U.T.

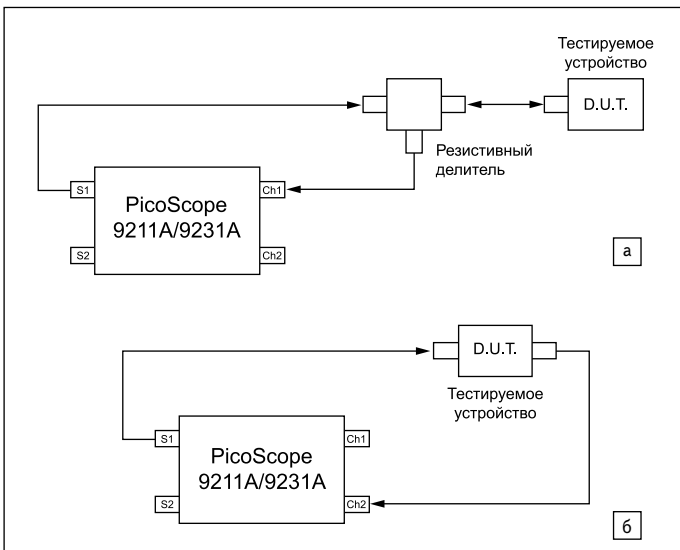


Рис. 25. Функциональные схемы рефлектометрии при отражении (TDR) и передаче (TDT) во временной области

На рис. 26 представлен процесс рефлектометрии при тестировании линии передачи, например отрезка коаксиального кабеля. Каждая неоднородность линии находит свое отражение на осциллограмме. Чем выше полоса пропускания применяемого для рефлектометрии осциллографа, тем выше временное и пространственное разрешение установки для рефлектометрии.

С осциллографами-приставками фирмы Eltesta поставляется довольно полная техническая и справочная документация, в том числе в виде файлов формата PDF. На рис. 27 показана страница справки по рефлектометрии. Дерево разделов справки в правой части экрана позволяет судить о содержании всех разделов справки.

Другие модели стробоскопических USB-осциллографов

На российском рынке можно встретить различные модели стробоскопических осциллографов-приставок. К примеру, модель UDS-2020 фирмы Eltesta имеет обозначение C7-24. Ее представляет

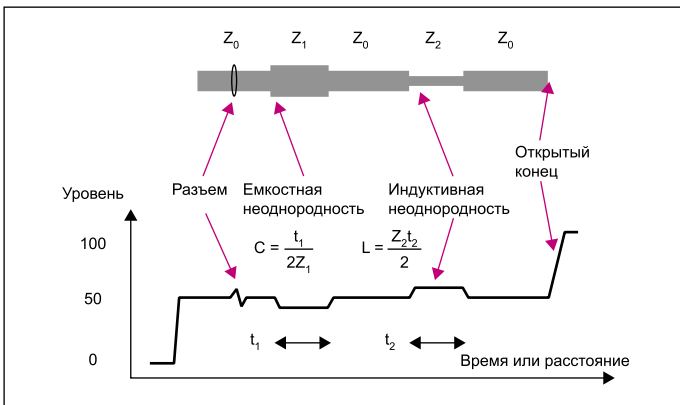


Рис. 26. Рефлектометрия линии передачи

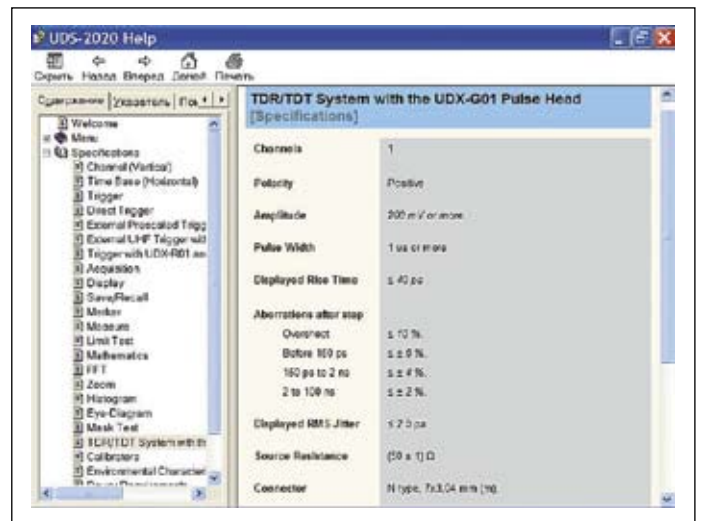


Рис. 27. Окно справки с открытым разделом по рефлектометрии



Рис. 28. Стробоскопический осциллограф-приставка АКИП-4112

ЗАО «Росприбор». А российская компания «ПриСТ» предлагает модели АКИП-4111, АКИП-4111/1 и АКИП-4112. Внешний вид приставки показан на рис. 28.

Прибор имеет следующие технические данные:

- 2 канала (независимый сбор данных) + вход внешней синхронизации (Ext).
- Полоса пропускания: 12 или 8 ГГц (переключаемая).
- Максимальная частота обновления осциллограмм: 200 кГц.

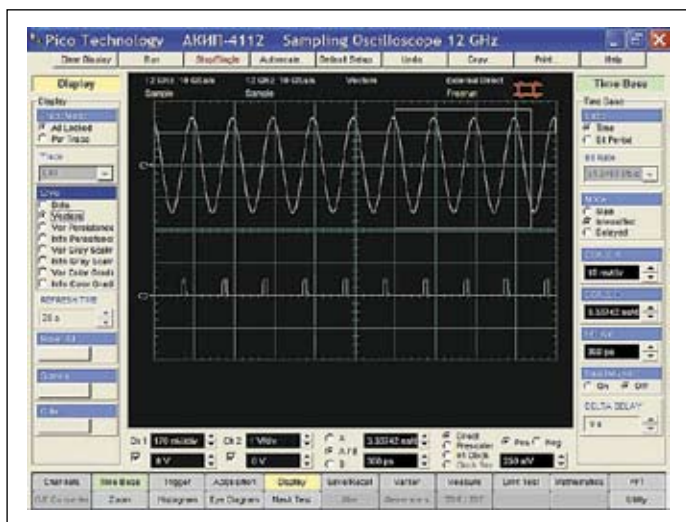


Рис. 29. Окно программы стробоскопического осциллографа-приставки АКИП-4112

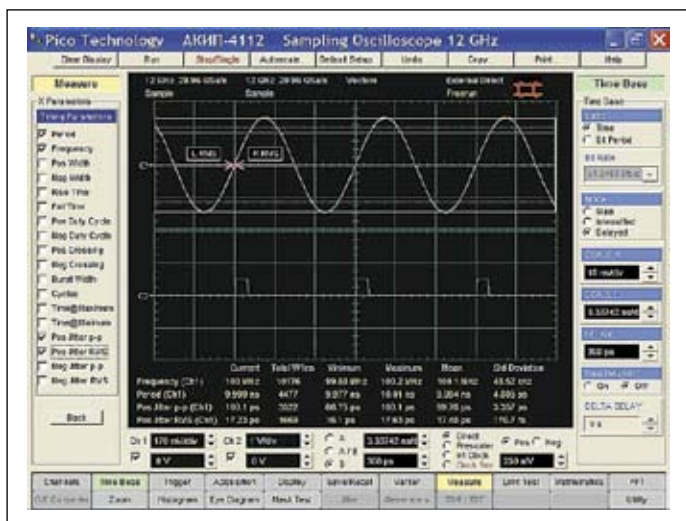


Рис. 30. Пример построения выделенной (рис. 29) части осциллограмм

- Максимальная эквивалентная частота дискретизации: 5 Твыборок/с (периодический сигнал).
- Максимальный объем памяти: 4 кбайт/канал.
- Внешняя синхронизация: частоты — до 1 ГГц, с делителем частоты — до 10 ГГц.
- Автоматические измерения (39 параметров); статистика измерений, маркерные измерения (ΔU ; ΔT ; $\Delta U/\Delta T$, F).
- 18 математических функций, включая быстрое преобразование Фурье (БПФ) в 2 каналах.
- До 10 прямых и до 4 статистических измерений, выполняемых одновременно.
- Отображение гистограмм параметров (напряжение/время), усреднение, огибающая, послесвечение.
- Построение и измерение «глазковых» диаграмм (NRZ и RZ), измерение джиттера.
- Автоматизированный тест сигнала по маске.
- Дополнительный вход: внешняя синхронизация с восстановлением тактовой частоты до 2,7 Гбайт/с (только АКИП-4112/1).
- Интерфейсы: USB, LAN (АКИП-4112/1), ПО под управлением ОС WIN XP/SP2 и Vista (с сохранением графической среды).
- Управление по шинам USB/LAN от внешнего ПК.
- Универсальный сетевой адаптер.
- Оформление: ультракомпактный корпус, портативное исполнение.
- Масса: 1 кг.

На сайте фирмы «ПриСТ» можно найти программу, применяемую для поддержки работы с осциллографами-приставками серии АКИП-4100. На рис. 29 показано окно этой программы при просмотре в демонстрационном режиме. Видна панель установки параметров дисплея (слева) и возможность выделения мышью части осциллограмм.

На рис. 30 представлен процесс просмотра во весь экран выделенной части осциллограмм. Здесь в правой части окна выведена панель автоматических измерений Measure и приведен набор таких измерений по оси X, то есть во времени. Результаты выбранных измерений при включенном выводе статистических измерений показаны внизу окна осциллограмм.

Это подтверждает и рис. 31, на котором показано выполнение математических операций с осциллограммами. Здесь можно видеть также открытую вкладку математических функций, которые можно использовать при выполнении математических операций над сигналами.

Еще один пример построения горизонтальной гистограммы джиттера приведен на рис. 32. В правой части окна осциллограмм — окно установки верхних пределов гистограммы, позволяющее менять ее вид.

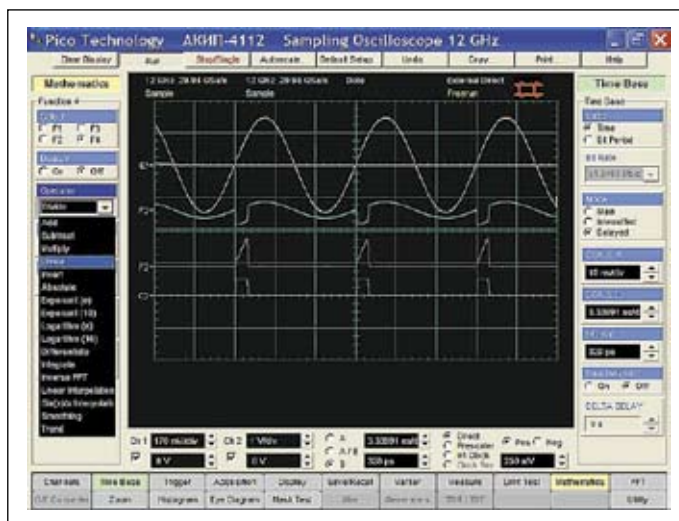


Рис. 31. Пример выполнения математических операций в демонстрационном режиме

При анализе рис. 29–32 становится ясно, что интерфейс пользователя приборов АКПП-4000 подобен таковому для приставок PicoScope серии 9000.

Заключение

Современные стробоскопические осциллографы-приставки имеют полосу частот исследуемых сигналов от 12 до 30 ГГц и по своим возможностям практически не уступают настольным осциллографам этого типа. Приборы обеспечивают получение на экране до 8 осциллограмм различного типа (обычных, опорных, математических), масок, курсоров, «глазковых» диаграмм и гистограмм. Обеспечивается до 40 автоматических измерений. Приставки имеют малый вес и габариты, их удобно подключать к настольному или мобильному компьютеру, который может иметь цветной дисплей большого размера. Это вполне полноценные многофункциональные осциллографические приборы, удобные в применении и имеющие в несколько раз меньшую стоимость, чем настольные стробоскопические осциллографы с такой же полосой частот. ■

Литература

1. Рябинин Ю. А. Стробоскопическое осциллографирование. М.: Советское радио, 1972.
2. Дьяконов В. П. Современная осциллография и осциллографы. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
3. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: СОЛОН-Пресс, 2007.
4. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-Пресс, 2009.
5. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: СОЛОН-Пресс, 2011.
6. Дьяконов В. П. Сверхскоростная осциллография вчера, сегодня и завтра // Компоненты и технологии. 2010. № 4.
7. Дьяконов В. П. Современная аппаратура тестирования и контроля сверхскоростных систем и линий передачи // Беспроводные технологии. 2010. № 3.

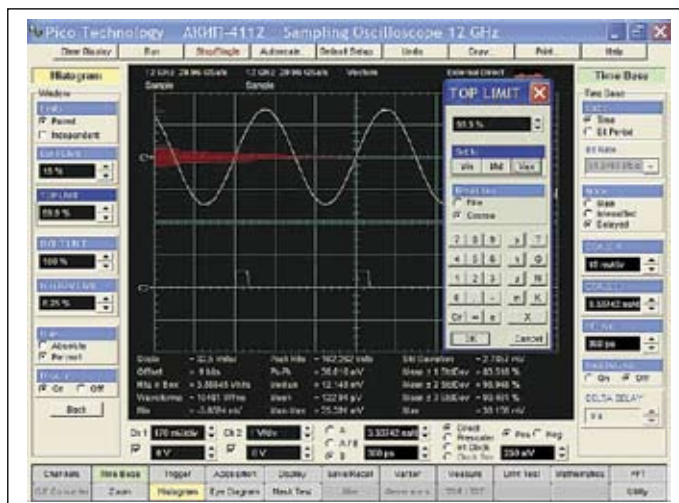


Рис. 32. Пример построения горизонтальной гистограммы джиттера в демонстрационном режиме