

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ОСЦИЛЛОГРАФИИ:

## «ГОНКА» НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ГИГАГЕРЦОВОЙ ДИСТАНЦИИ

Шумский И.А., к.т.н.

Общее направление развития электроники, характеризующееся появлением все более быстродействующих устройств, повышением скорости передачи данных и плотности их хранения, определяет и основные тенденции развития современных осциллографов, в частности, существенное увеличение полосы пропускания.

В настоящее время предел полосы пропускания (по уровню -3 дБ) современных осциллографов, отображающих сигналы в режиме реального времени (не стробоскоп) составляет 6-7 ГГц при времени нарастания порядка 50-70 пс.

Первый осциллограф с полосой пропускания 6 ГГц, модель TDS 6604, был выпущен в январе 2002 года американской компанией Tektronix, являющейся признанным мировым лидером в области разработки цифровых осциллографов, на долю которого приходится половина продаж осциллографов в мире. Этот рекорд продержался всего полгода: в конце июля того же года швейцарская фирма LeCroy, постоянный конкурент Tektronix, выпустила осциллограф WaveMaster 8600. В ноябре 2002 года проявилась 6 ГГц модель Agilent Infiniium 54855A от еще одного крупнейшего игрока на рынке осциллографов — американской корпорации Agilent Technologies (бывший Hewlett-Packard). И, наконец, в сентябре 2003 г. компания Tektronix предложила потребителям осциллограф TDS 7704B —

первую модель с полосой пропускания в режиме реального времени 7 ГГц (Об этом осциллографе мы постараемся более подробно рассказать в одном из ближайших номеров — Ред.).

В табл. 1 приведены основные характеристики моделей с полосой пропускания более 1 ГГц и максимальной частотой дискретизации до 20 ГГц от ведущих производителей осциллографов класса high-end.

Эти осциллографы впитали в себя все новейшие достижения научной и инженерной мысли в области высокоскоростного сбора данных, а использованные в их конструкции технические решения отчетливо отражают основные направления развития современной осциллографии.

Появление осциллографов с полосой пропускания 6 ГГц стало возможным в результате бурного развития технологии высокочастотных элементов и материалов, в частности, высокочастотной элементной базы на основе Si-Ge технологии, новых материалов печатных плат с уменьшенным коэффициентом потерь.

Еще одной проблемой, с которой столкнулись создатели высокочастотных осциллографов, — это присоединительный интерфейс, посредством которого осциллографические пробники подключаются к осциллографу.

Дело в том, что стандартный качественный BNC-разъем, который сохранился еще с эры ламповых приборов, имеет




максимальную полосу пропускания 4 ГГц, что, естественно, не может удовлетворять разработчиков новых приборов. Одновременно с этим разнообразие осциллографических пробников вызвало необходимость создания средств для автоматизации их подключения к прибору.

В середине 1980-х годов в компании Tektronix был разработан интерфейс TekProbe™ (рис. 1). В основе этого интерфейса лежит коннектор типа BNC, через который идет сам сигнал. Кроме того, он имеет дополнительные линии для подачи питания на активные типы пробников, а также контакты для идентификации типа пробника, коэффициента ослабления, динамического диапазона, смещения и пр.

В настоящее время высокочастотные осциллографы Tektronix оснащены еще более новым интерфейсом TekConnect™. В результате такой, на первый взгляд, простой узел, как входной разъем осциллографа, превратился в самый интеллектуальный интерфейс, в котором использовано множество технологических ноу-хау. Сигнал в нем передается через специально разработанный разъем BMA (коаксиал, 50 Ом), сходный с разъемом SMA, но имеющий другую конструкцию заземления. Интерфейс TekConnect™ обеспечивает прохождение сигнала частотой до 18 ГГц и, помимо возможностей, реализованных в TekProbe™, позволяет осуществлять настройки для электрон-

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЦИЛЛОГРАФОВ КЛАССА HIGH-END

Таблица 1

Производитель	Модель	Полоса пропускания, ГГц	Макс. частота дискретизации, ГГц (1 кан/2 кан/ 4кан)	Кол-во каналов
	TDS 7704B	7	20/10/5	4
	TDS 6604	6	20/20/10	4
	TDS 6404	4	20/20/10	4
	TDS 7404B	4	20/10/5	4
	CSA 7404B	4	20/10/5	4+1 оптич.
	TDS 7254B	2,5	20/10/5	4
	TDS 7154B	1,5	20/10/5	4
	CSA 7154B	1,5	20/10/5	4+1 оптич.
	WaveMaster-8620A	6	20/20/20	4
	SDA-8620A	6	20/20/20	4
	WaveMaster-8600A	6	20/20/10	4
	SDA-8600A	6	20/20/10	4
	WaveMaster-8500A	5	20/20/10	4
	SDA-8500A	5	20/20/10	4
	WaveMaster-8300A	3	20/20/10	4
	SDA-8300A	3	20/20/10	4
	WavePro7300	3	20/20/10	4
	Infiniium 54855A	6	20/20/20	4
	Infiniium 54854A	4	20/20/20	4
	Infiniium 54853A	2,5	20/20/20	4

ной калибровки, программного переключения параметров пробника, каскадирования аксессуаров.

Постоянно возникающая у пользователей осциллографической техники необходимость сохранения полученных в результате измерений осциллограмм и их дальнейшей обработки вызвала интенсивное развитие так называемых цифровых запоминающих осциллографов (ЦЗО), в которых входной сигнал после соответствующего усиления оцифровывается в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) и уже в цифровом виде запоминается, выводится на экран и обрабатывается с помощью специально



Рис. 1

разработанных алгоритмов. Практические преимущества ЦЗО послужили причиной постепенного вытеснения в последние годы аналоговых осциллографов с рынка high-end оборудования. Так, например, американская фирма Tektronix полностью прекратила выпуск аналоговых осциллографов общего назначения и производит теперь только цифровые запоминающие осциллографы. В настоящее время ведущие производители предлагают только относительно старые и низкочастотные модели аналоговых приборов (например, серия LAxxx от LeCroy).

Архитектура новейших high-end цифровых осциллографов построена на базе персонального компьютера, центральный процессор, шины передачи данных, системная память и дисплей которого участвуют в процессе сбора и отображения входных сигналов; одновременно это позволяет легко решать задачи последующей обработки, анализа и документирования полученной информации.

В большинстве современных ЦЗО используются дорогостоящие высокоскоростные АЦП (порядка 10 гигавыборок/с), производящие оцифровку входного сигнала в режиме реального времени, при этом тактовая частота АЦП совпадает или кратна частоте дискретизации.

В общих чертах технология преобразования входного сигнала в современных high-end ЦЗО состоит в следующем.

Высокочастотные однокристальные АЦП (по 1 на канал) преобразуют входящий аналоговый сигнал в поток 8-битовых данных. Одно измерение осуществляется за 100 пс при работе всех четырех каналов, при работе одного или 2 каналов АЦП работают в сдвоенном режиме, при этом скорость измерений удваивается —

1 измерение за 50 пс. Этот поток данных (10 Гбайт/с) расщепляется на части и поступает в высокоскоростные чипы DRAM, которые, наряду с АЦП, являются ключевым элементом технологии. Эти чипы построены по КМОП-технологии и, помимо хранения данных, должны выполнять еще несколько критичных высокоскоростных операций с потоками данных от АЦП, перед передачей их в память, в частности, децимацию. При этом за счет управления структурой памяти обеспечивается очень короткое время между записью сегментов — около 5 мкс, что, в свою очередь, позволяет достигнуть высокой скорости сбора данных серий сигналов и записи их в память.

Очень важным в архитектуре современного high-end осциллографа является обеспечение высокой скорости передачи собранных данных для обработки в центральный процессор. Для этого используются самые различные технологические решения. Например, в технологии X-stream (компания LeCroy) передача потока из АЦП в DRAM СБИС осуществляется посредством низковольтных дифференциальных сигнальных линий (LVDS), а из DRAM СБИС в шину PCI — с использованием 1 гигабитного Ethernet (рис. 2).

Подобные технологии, но с собственными ноу-хау, используют в своих осциллографах и другие производители.

Оригинальный метод запатентовала фирма Tektronix, разработав технологию FISO (Fast In — Slow Out, «быстрый вход — медленный выход»). «Изюминка» этого метода состоит в использовании быстрой аналоговой памяти на ос-

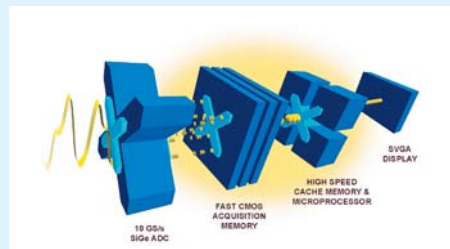


Рис. 2

нове линейки приборов с зарядовой связью (ПЗС) для временного хранения входящего сигнала. В ходе последующего цикла оцифровки сохраненный сигнал последовательно воспроизводится с относительно медленной скоростью (до 1 МГц). Реализованная на ПЗС аналоговая задержка входного сигнала позволяет проводить аналого-цифровое преобразование относительно медленными АЦП, в результате чего с помощью относительно низкочастотных элементов удается обеспечить очень высокую скорость дискретизации (в некоторых моделях — до нескольких ГГц) в режиме реального времени.

Эта сравнительно недорогая, но эффективная технология FISO одинаково успешно использовалась фирмой Tektronix для создания как осциллографов

начального уровня (типа TDS1000/2000/3000В), так и для продвинутых 6 ГГц моделей типа TDS6604. Вместе с тем, у данного метода есть ограничение — нельзя наращивать объем установленной памяти.

В настоящее время полоса пропускания 7 ГГц является пределом для сбора данных в режиме реального времени для серийных осциллографов. Но для современных телекоммуникационных потоков и этого может оказаться недостаточно. Для исследования сигналов частотой выше 6 ГГц используются так называемые стробоскопические осциллографы, у которых оцифровка входного сигнала осуществляется за несколько сотен периодов сигнала, что позволяет говорить об эффективной частоте дискретизации в сотни и даже тысячи гигагерц.

Признаком классного цифрового осциллографа является развитый набор режимов синхронизации, позволяющих выделить в потоке данных нужный элемент. В отличие от аналоговых осциллографов, схема запуска в которых обычно реализована на одноуровневых аналоговых компараторах и, следовательно, ограничена только режимом запуска по превышению заданного уровня сигнала, цифровые осциллографы оснащены встроенным микропроцессором, что дает возможность задавать весьма разнообразные и сложные режимы синхронизации, в частности:

- запуск по длительности запускающего импульса, которая может быть больше, меньше или равна длительности, устанавливаемой пользователем; при этом значительно облегчается, например, поиск короткой импульсной помехи;
- запуск по задаваемой пользователем скорости нарастания/спада переднего или заднего фронта импульса, что позволяет отслеживать импульсы со слишком крутыми или слишком пологими фронтами;
- глитчу (импульсной помехе);
- ранту, когда запускающий импульс пересекает один из установленных пользователем порогов, но не пересекает другой;
- запуск по шаблону (величине логических уровней и их последовательности с учетом булевых операций), предварительно установленному пользователем (напр., в меню) на каждом входе прибора, в этом случае осциллограф уподобляется логическому анализатору, позволяя выделять в потоке данных определенные логические комбинации;
- и многие другие.

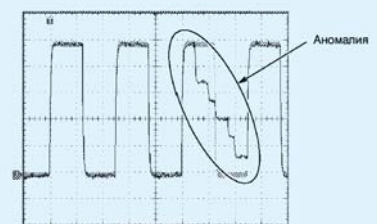


Рис. 3

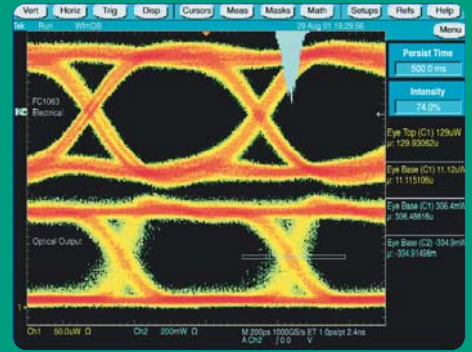
Такой развитый набор режимов синхронизации позволяет выявлять и захватывать практически любые аномалии наблюдаемого сигнала, т. е. случайные (сбойные) отклонения формы входного сигнала от стандартной (рис. 3).

Однако в реальной работе всегда существуют ситуации, когда искомым сигналом невозможно выделить только схемой синхронизации, либо когда сам сигнал для своего отображения требует специальных условий синхронизации (например, видеосигнал). В этом случае аномалия должна регистрироваться в режиме автоматической развертки, а пользователю приходится учитывать, что возможности цифрового осциллографа по отображению быстрых однократных сигналов и поиску аномалий в периодических сигналах существенно отличаются от возможностей аналогового прибора.

С одной стороны, неоспоримое достоинство аналогового осциллографа заключается в том, что пользователь имеет возможность видеть практически весь сигнал, за исключением той его части, которая приходится на время обратного хода луча. При этом скорость обновления экрана аналогового осциллографа составляет до 1 миллиона раз в секунду.

С другой стороны, уловить редкую аномалию на аналоговом приборе очень трудно, т. к. быстрый однократный сигнал только один раз появляется на экране ЭЛТ, «затираясь» последующими осциллограммами. Яркость аномальной

«Сердцем» технологии цифрового фосфора является специализированный процессор DPX™, преобразующий оцифрованную осциллограмму в динамическую трехмерную базу данных, которую и называют «цифровым фосфором». DPX аккумулирует информацию о сигнале в матрицу 500×200 элементов. Каждый элемент массива соответствует пикселю дисплея DPO-осциллографа. Если сигнал появляется в данной точке экрана снова и снова, яркость этой точки на экране будет выше, чем у соседних. Таким образом при отображении осциллограммы на экране прибора появляется новая переменная — яркость (аналогично прибору с ЭЛТ, снабженной фосфорным покрытием с эффектом послесвечения), характеризующая частоту появления сигнала в данной точке экрана. Если заменить яркостную шкалу на цветовую, появляется весьма эффективная возможность цветового выделения редких аномалий сигналов.



ствяет вывод на экран полученной информации (время простоя — dead time). По аналогии с традиционными осциллографами с ЭЛТ этот промежуток времени можно воспринимать как время «обратного хода луча». В течение времени простоя все изменения входного сигнала недоступны для наблюдения. Естественно, что появившаяся в это время аномалия останется незамеченной, т. к. сбор информации в этот момент не происходит (рис. 4). У цифровых осциллографов начального уровня время простоя составляло более 99% от всего времени

межутки между временными интервалами сбора данных уменьшились до 30-40%, что позволяет говорить о достижении по этому показателю аналоговых осциллографов с ЭЛТ; а во-вторых, у ЦЗО появилась некоторая избыточная информация о динамическом поведении сигнала за время между двумя кадрами отображения осциллограммы на экране, т. к. ввиду инерционности устройств отображения сигнала и сравнительно медленной реакции глаза человека бесполезно выводить информацию на дисплей быстрее нескольких десятков раз в секунду.

Эта «избыточная» информация с помощью технологии цифрового фосфора (режим FastAcquisition) может быть визуализирована в виде цветовой карты сигнала, которая, в отличие от режима цифровой персистенции (инерции), поступает в режиме реального времени и характеризует динамическое поведение сигнала.

В результате в осциллографах DPO значительно (на несколько порядков) уменьшилось время поиска аномалий, т. к. на экран попадает почти вся информация о поведении сигнала. Кроме того, такие приборы позволяют обнаруживать тонкую модуляцию сигнала, отслеживать его динамические характеристики, строить «глазковые» и векторные диаграммы и т. д. В осциллографах серии TDS3000B (Tektronix) имеется специальный режим «WaveAlert», позволяющий выделять обнаруженные аномалии цветом, подачей звукового сигнала и фиксировать сигнал с аномалией на гибком диске, распечатывать на принтере и пр.

*(продолжение следует)*



Рис. 4

части сигнала при этом также мала на фоне основного сигнала, потому что в отличие от него не повторяется. Остановить же осциллограмму на экране стандартной ЭЛТ аналогового осциллографа невозможно принципиально. Послесвечение, вызываемое фосфорным покрытием внутренней поверхности экрана ЭЛТ, по времени длится доли секунды, что явно недостаточно для большинства случаев. Здесь и проявляется одно из основных преимуществ цифрового осциллографа, который способен «заморозить» нужную осциллограмму на сколь угодно большой промежуток времени.

Вместе с тем, у цифрового осциллографа существует некоторый временной интервал, в течение которого осциллограф подготавливается к новому акту оцифровки входного сигнала и осуще-

наблюдения, что и вызвало у части пользователей некоторое недоверие к показаниям цифровых приборов.

Эта проблема была решена специалистами Tektronix в 1998 году путем использования технологии цифрового фосфора (DPO — digital phosphor oscilloscope), позволяющей приблизить характер отображения сигнала на экране цифрового осциллографа к привычному для пользователя аналоговому виду.

Благодаря появлению технологии DPO технически стало возможным собирать данные много чаще, чем это требуется для отображения с незаметной для глаза скоростью смены кадров. Скорость сбора осциллограмм у цифровых осциллографов возросла до сотен тысяч раз в секунду (напр., технология «InstaVu» от Tektronix). В результате во-первых, про-

*The key directions of modern oscillography progress, as well as know-how used in high-end oscilloscopes design are considered in this article. The basic specifications of the oscilloscopes with analog bandwidth more than 1 GHz and maximum sampling rate up to 20 GHz are represented.*



# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ОСЦИЛЛОГРАФИИ:

## «ГОНКА» НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ГИГАГЕРЦОВОЙ ДИСТАНЦИИ

Шумский И.А., к.т.н.

(Окончание, начало см. № 5-2003).

В режиме «WaveAlert» происходит детектирование пикселей экрана, «зажженных» при последнем обновлении экрана DPO осциллографа. Если осциллограмма проходит через пиксели, которые не были «включены» в предыдущем обновлении экрана, это изменение записывается и выделяется на экране янтарным цветом (рис. 1). При этом могут также запускаться определенные пользователем операции.

В моделях Tektronix TDS5000/TDS7000 режим цифрового фосфора позволяет визуализировать аномалию в виде различных (по выбору) цветовых схем отображения сигнала, которые имеют прямую связь цвета участка осциллограммы с вероятностью его повторения. Так, например, ярко-красным цветом выделяются элементы осциллограммы, повторяющиеся всегда, желтым — встречающиеся часто, синий — редкие случайные аномалии (рис. 2).

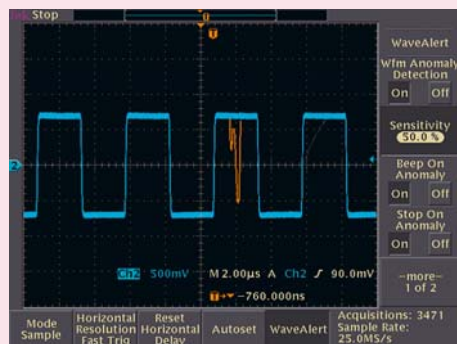


Рис. 1. Экран TDS3000B в режиме «WaveAlert»

Большинство старших моделей Tektronix базируется на технологии цифрового фосфора, о чем свидетельствует надпись «DPO» (Digital Phosphor Oscilloscope) на корпусе прибора. Эта технология в значительной степени помогает Tektronix удерживать лидирующее положение в мировой осциллографии.

Другие производители пытаются активно конкурировать с технологией DPO. Фирменная технология осциллографов Agilent Technologies под названием MegaZoom реализует скорости захвата осциллограмм примерно на порядок более низкие, чем режим Fast Acquisition, однако при этом сигнал оцифровывается на всю глубину установленной памяти, а не только на размер экранного буфера (500 точек) как в

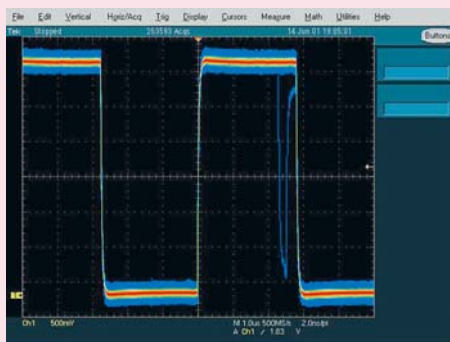


Рис. 2. Выделение цветом случайных аномалий с помощью DPO в TDS5000/7000

DPO/DPX. Для не очень быстрых разверток это дает интегральную скорость сбора информации сравнимую, а иногда даже более высокую чем в DPO. Однако при повышении частоты входного сигнала DPX все равно опережает MegaZoom за счет значительно более короткого периода простоя. Действительно, интервал времени, фиксируемый в буферной памяти с увеличением частоты сбора информации будет уменьшаться, а период простоя (dead-time) — по крайней мере оставаться прежним. К тому же не стоит забывать, что в осциллографах DPO/DPX серий TDS5000/7000 также существует режим глубокой памяти, что в общем случае позволяет решать более широкий круг задач. Поэтому Tektronix вполне логично предлагает сравнивать осциллографы по параметру «количество захваченных осциллограмм в единицу времени», который наиболее полно и объективно характеризует способность прибора обнаруживать случайные аномалии. Достигнутый в серии TDS7000 показатель (более 400000 осциллограмм в секунду) демонстрирует неоспоримое лидерство Tektronix по возможности захвата случайных аномалий.

Объем быстрой буферной памяти — другой важнейший параметр цифрово-

го осциллографа и значительная составляющая его цены. Он представляет собой количество точек, которыми оцифрована полученная прибором осциллограмма. Эта память непрерывно заполняется потоком данных от АЦП со скоростью оцифровки входного сигнала (что для старших моделей осциллографов может составлять величину до 20 ГГц). По получении события запуска от схемы синхронизации ее содержимое передается на экран или в оперативную память встроенного в прибор компьютера. Для пользователя этот параметр означает подробность, с которой он может рассмотреть полученный сигнал.

Длина быстрой буферной памяти с развитием цифровой осциллографии непрерывно увеличивается. В настоящее время типичные значения объема быстрой памяти лежат в диапазоне от 250 кбайт в TDS-6604 до 64 Мбайт в TDS-7704B с опцией 5M и, наконец, рекордные 100 Мбайт в WaveMaster 8600A с опцией XXL. Так как дополнительная быстрая буферная память очень дорога и по цене соизмерима со стоимостью самого прибора, то производители, как правило, предоставляют пользователю возможность выбора опций одного прибора с разным размером установленной памяти.

Как правило, большой объем памяти нужен не всегда, чаще требуется количество точек, соизмеримое с разрешением экрана — т. е. 1000-2000 точек. Большее количество точек на экране просто не отобразится, их можно рассмотреть лишь с помощью функции Zoom (увеличения).

Вместе с тем, большой объем памяти необходим для анализа телекоммуникационных сигналов, спектрального анализа при точной реализации быстрого преобразования Фурье, а также для регистрации серий быстрых редких событий, когда требуется сочетания

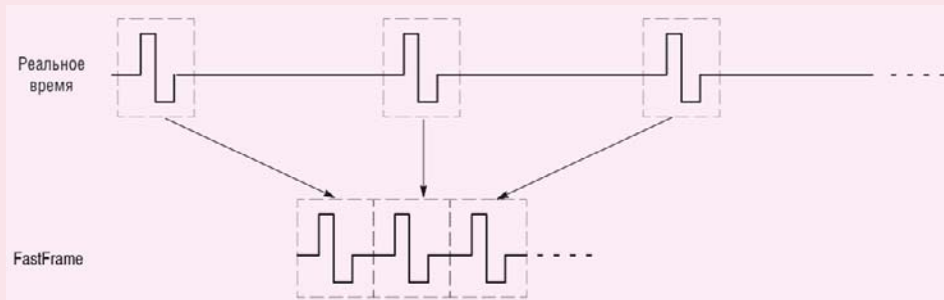


Рис. 3. Принцип реализации режима «FastFrame» в осциллографах Tektronix

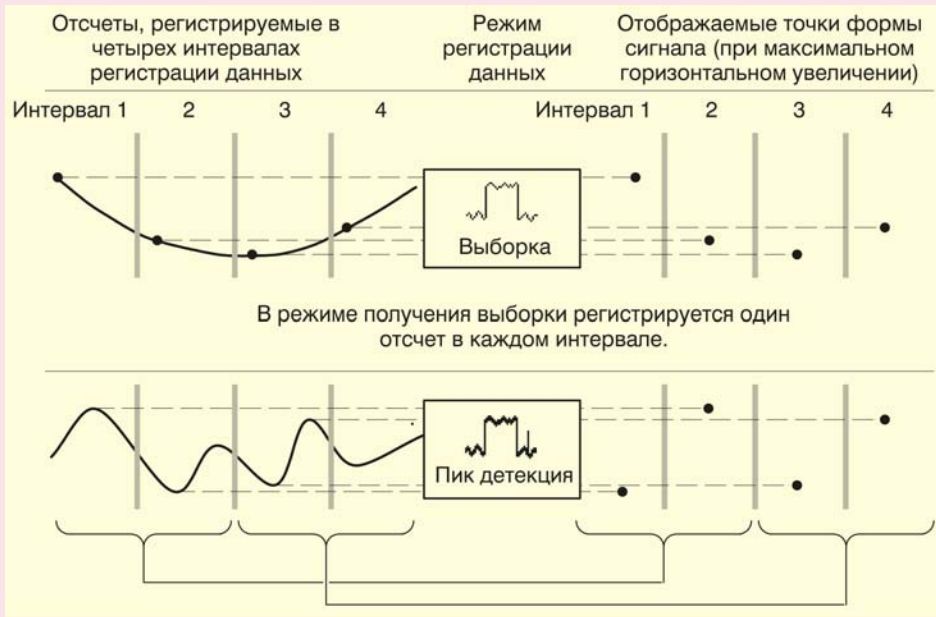


Рис. 4. Децимация отсчетов АЦП в выборки для режимов «Выборка» и «Пик-детектор» (Tektronix)

высокой частоты дискретизации и длинного временного интервала сбора данных.

В старших моделях современных осциллографов для решения таких задач используются гибкие режимы работы с памятью, например, сегментация памяти, использующаяся в режиме Fast-Frame (быстрых кадров) в осциллографах Tektronix серий TDS7000(B)/TDS5000. Аналогичные технологии применяются в осциллографах и других производителях.

Режим сбора данных FastFrame позволяет захватывать много событий (кадров) в одну осциллограмму, а затем исследовать каждое событие индивидуально. Для этого память разделяется на сегменты (кадры) в каждый из которых после получения события запуска записывается фиксированное число точек входного сигнала. После этого память не очищается (как обычно), а ожидает следующего события запуска, продолжая пополняться следующими кадрами (рис. 3). Для приборов серии TDS7000, например, пользователь может сохранять в одной осциллограмме (в зависимости от размера установленной памяти) до 4000 кадров по 500 точек в каждом. Режим FastFrame позволяет произвольно перемещаться от одного кадра к другому, обеспечивая для каждого кадра отображение временной отметки запуска (абсолютной или относительной), возможность проведения математических операций, сравнения двух произвольных кадров и т. п.

Такой режим работы встроенной памяти может быть полезен для регистрации длинных серий редких нерегулярных, но быстрых событий, например, в физике элементарных частиц, когда очень короткие события разделены длинными промежутками. Использование очень большой обычной памяти в этом случае неэффективно, т. к. боль-

шая часть объема памяти будет занята оцифрованным периодом ожидания сигнала, не представляющим интереса для пользователя. Сегментирование позволяет намного более эффективно использовать дорогую осциллографическую память, увеличивая на несколько порядков интервал сбора данных.

Сегментация памяти используется также в осциллографах WavePro (LeCroy) для реализации функции «аналогового» послесвечения отображаемого сигнала (некоторого аналога технологии цифрового фосфора DPO/DPX у Tektronix). В этом режиме вся память прибора также разбивается на



Рис. 5. Искажение синусоидального сигнала 6 ГГц-дискретизация 20 ГГц в режиме линейной интерполяции (LeCroy 8600A)

сегменты, в каждый из которых последовательно происходит запись текущего состояния сигнала. Каждый из сегментов представляет собой «кадр» с собственной временной меткой и может быть просмотрен последовательно или индивидуально в режиме «проигрывания», отображая динамику поведения сигнала. Последовательное воспроизведение этих кадров с наложением дает эффект аналогового послесвечения. Отметим, что данная технология, в отличие от технологии цифрового фосфора, работающей в режиме реального

времени, позволяет работать только с уже собранными сигналами (пост-обработка), поэтому на высоких частотах она также уступает технологии DPO.

Возможности цифровых осциллографов по отображению входного сигнала не исчерпываются только цифровой инерцией. Цифровая обработка полученного сигнала (Digital Signal Processing — DSP) также предоставляет пользователю очень эффективные инструменты.

Так, на этапе сбора выборок во многих современных осциллографах АЦП, независимо от выбранного коэффициента развертки, работают на максимальной фиксированной скорости (это оптимальный и наиболее эффективный режим работы АЦП, позволяющий добиться высокой временной стабильности), производя оцифровку входного сигнала с максимально высокой частотой. При этом в интервале оцифровки (который равен времени записи сигнала, деленному на объем памяти), появляется «лишнее» количество точек (их число зависит от объема памяти и коэффициента развертки). Затем проводится процедура децимации (т. е. собранные данные прореживаются), реализуемая на аппаратном уровне. Результат обработки данных (только часть этих точек) выводится на экран или в память осциллографа — по одной точке в интервал оцифровки.

В зависимости от алгоритма обработки различают следующие режимы сбора данных.

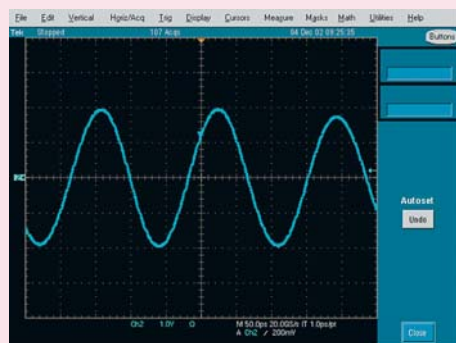
В стандартном режиме осциллографа Sample (режим выборки), который используется по умолчанию, на осциллографе не производится пост-обработка зарегистрированных данных. При децимации выводится только первая точка из каждого интервала оцифровки.

При усреднении сигнала по нескольким осциллограммам на экране прибора появляется осциллограмма, представляющая собой среднее арифметическое осциллограмм, собранных за несколько запусков. Количество усреднений задается пользователем и может достигать десятков и сотен тысяч. Этот режим является очень эффективным способом борьбы со случайными шумами, позволяя «вытянуть» даже слабый полезный сигнал из фонового шума. Функция работает только в случае периодического сигнала.

При работе в режиме усреднения соседних точек каждая точка результирующей осциллограммы является средним значением соседних точек исходной осциллограммы. Количество задействованных точек устанавливается пользователем. Эта функция может применяться и в отношении к одиночным осциллограммам, действуя в качестве высокочастотного фильтра. Она позволяет эффективно подавлять шум квантования младшего разряда АЦП,

неизбежно появляющегося в любом цифровом осциллографе, что позволяет производителям называть ее функцией повышения эффективного разрешения АЦП (напр., режим Hi Res в осциллографах TDS7000/TDS5000).

В режиме детектирования пиков осциллограф, проводящий оцифровку на максимальной частоте, выводит на экран попеременно минимальную точку в одном интервале оцифровки и максимальную точку в следующем. Этот режим позволяет детектировать быстрые



**Рис. 6. Отображение синусоидального сигнала 6 ГГц-дискретизация 20 ГГц при аппаратной интерполяции  $\sin x/x$  (Tektronix TDS6604)**

импульсные помехи на длинных развертках, когда длительность импульсной помехи заметно меньше интервала оцифровки (рис. 4).

При регистрации сигнала в режиме огибающей осциллограф постоянно накапливает максимальные и минимальные значения точек, что приводит к созданию огибающей определенного пользователем числа сигналов. После достижения заданного количества осциллограмм выполняется очистка данных и процесс начинается заново. Этот



**Рис. 7. Анализатор телекоммуникационных сигналов Tektronix CSA7404**

процесс аналогичен режиму детектирования пиков с той разницей, что в режиме огибающей накапливаются пиковые значения для многих событий запуска.

Традиционно и очень эффективно DSP используется для измерения параметров сигнала, их математической и статистической обработки, построения гистограмм, реализации быстрого преобразования Фурье для режима спектр-анализатора, интерполяции (сглаживания) данных.

Таблица 1

### АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ОСЦИЛЛОГРАФАХ ФИРМЫ TEKTRONIX

Измеряемый параметр	TDS1000/ TDS2000	TDS3000B	TDS5000	TDS7000	TDS6000
Амплитуда	+	+	+	+	+
Область	-	-	+	+	+
Циклическая область	-	-	+	+	+
Длительность вспышки	-	+	+	+	+
Среднее значение периода	-	+	+	+	+
Среднеквадратичное значение цикла	+	+	+	+	+
Задержка	-	+	+	+	+
Время спада	+	+	+	+	+
Частота	+	+	+	+	+
Высокий уровень	-	+	+	+	+
Низкий уровень	-	+	+	+	+
Максимум	+	+	+	+	+
Среднее	+	+	+	+	+
Минимум	+	+	+	+	+
Отрицательная скважность	-	+	+	+	+
Отрицательный выброс	-	+	+	+	+
Длительность отрицательного импульса	+	+	+	+	+
Пиковая амплитуда (размах)	+	+	+	+	+
Фаза	-	+	+	+	+
Период	+	+	+	+	+
Положительная скважность	-	+	+	+	+
Положительный выброс	-	+	+	+	+
Длительность положительного импульса	+	+	+	+	+
Время нарастания	+	+	+	+	+
Среднеквадратичное значение	-	+	+	+	+
Среднее значение	-	-	+	+	+
Медиана	-	-	+	+	+
Стандартное отклонение	-	-	+	+	+
Число точек в окне гистограммы	-	-	+	+	+
Число осциллограмм	-	-	+	+	+
Число пиковых значений	-	-	+	+	+
Размах	-	-	+	+	+
Максимум	-	-	+	+	+
Минимум	-	-	+	+	+
Среднее (1 ст. отклонение)	-	-	+	+	+
Среднее (2 ст. отклонения)	-	-	+	+	+
Среднее (3 ст. отклонения)	-	-	+	+	+



Особенность проведения этих измерений заключается в большом объеме обрабатываемых данных (который определяется объемом задействованной памяти) при ограничении времени на их обработку (которое должно обеспечивать выдачу результатов в режиме реального времени). Использование для этих целей встроенных DSP-функций системного микропроцессора или специализированных заказных чипов DSP — обычная практика, дающая впечатляющие результаты. Так, интегрированные в архитектуру осциллографов серии WaveMaster функции DSP, оптимизированные с точки зрения последовательной передачи данных от высокоскоростных АЦП и высокоскоростных DRAM в микропроцессор, позволяют утверждать, что технология «X-stream» от LeCroy обеспечивает рекордные скорости вычислений с большими массивами собранных данных (до 100 Мбайт).

Курсорные измерения — первые средства автоматизации осциллографических измерений, которые появились еще в аналоговых моделях со встроенным цифровым модулем. Однако в современных ЦЗО курсорные измерения стали универсальным стандартным инструментом, а цифровой характер сбора данных позволил реализовать очень удобный режим курсорных измерений — функцию «зашелкивания» курсоров на ближайших точках осциллограммы, что значительно упрощает и ускоряет измерения параметров осциллограммы.

Для типичных измерительных задач производители high-end осциллографов предлагают функции автоматических измерений практически всех основных параметров типовых сигналов (табл. 1).

На предельно высоких частотах (порядка нескольких гигагерц), когда частота дискретизации ненамного превышает частоту сигнала, и, следовательно, один период сигнала содержит всего несколько точек дискретизации, качество отображения осциллограммы на экране цифрового осциллографа существенно

Таблица 2

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ОСЦИЛЛОГРАФОВ				
Производитель	Базовая серия	Области измерений		
		Видео	Телекоммуникации	HDD-анализатор
Tektronix	TDS7000	VM5000HD	CSA7154 CSA7404B	опц. TDSDDM2
	TDS5000 TDS8000B		CSA8000B SDA6000 SDA5000 SDA3000	
LeCroy	WaveMaster			DDA5005 DDA3000
Agilent Technologies	Infiniium		86100A DCA	

зависит от метода интерполяции, т. е. способа, по которому выборки на экране пользователя соединяются в сплошную кривую. Линейная экстраполяция в этом случае дает сильные искажения синусоидального сигнала (рис. 5), поэтому общепринятым является использование экстраполяции типа «sin(x)/x» (рис. 6). Для получения «дополнительных точек» между реальными выборками необходимо проводить достаточно сложные рас-

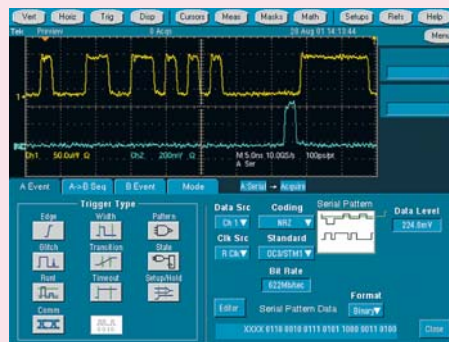


Рис. 8. Режим «Serial Triggering» в CSA7000(B)

четы с большим массивом данных. В осциллографах Tektronix (в отличие от LeCroy и Agilent) интерполяция sin(x)/x является стандартной и реализуется аппаратно с помощью DSP. Это позволяет достигнуть высокой скорости обновления экрана в этом режиме (например, несколько сотен кадров в секунду при объеме 40 тыс. выборок), тогда как приборы с программной реализацией этой функции могут обеспечить только несколько запусков (кадров) в секунду, что выражается в «замираниях» осцилло-

граммы в режиме автоматического запуска синхронизации.

Построение старших моделей осциллографов на базе компьютера дает пользователю широкие возможности по документированию и обработке полученных результатов и интегрированию осциллографа в пользовательскую автоматизированную систему сбора и обработки данных.

Открытая архитектура Windows в осциллографах серий TDS5000/7000 означает открытый доступ к рабочей среде MS Windows, благодаря чему такие приборы превратились в новый мощный инструмент исследователя и инженера. С помощью технологии DPX™, открытого интерфейса Windows и прикладных программных интерфейсов Windows и UNIX обеспечивается исключительно высокая скорость сбора данных, анализ и сетевые возможности. С использованием встроенной шины PCI собранные осциллограммы могут быть перемещены непосредственно в приложения Windows с намного большей скоростью, чем при использовании даже интерфейса USB. Сетевые возможности приборов позволяют просматривать информацию через Интернет, осуществлять электронный обмен сообщениями, печатать и использовать файлы в общем доступе. Использование стандартных промышленных протоколов типа TekVISA и ActiveX позволяет расширять возможности приложений Windows, напр., Excel, для анализа данных и документирования результатов измерений. С помощью приложений типа

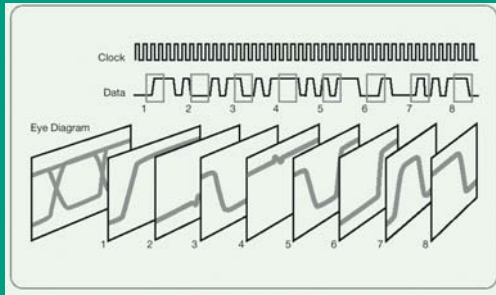
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОСЦИЛЛОГРАФАХ ТЕКТРОНИК

Таблица 3

Технология	TDS1000/TDS2000	TDS3000B	TDS5000	TDS7000/TDS7000B	CSA7000/CSA7000B	TDS6000
Цифровой фосфор	—	+	+	+	+	—
Скорость захвата, осциллограмм/сек	180	3600	100000	400000	400000	100
FISO	+	+	—	—	—	+
FastFrame	—	—	+	+	+	—
Усреднение, кол-во осциллограмм	до 128	—	до 10000	до 10000	до 10000	до 10000
Пик-детектор	12 нс	+	до 1 нс	400 пс	400 пс	до 50 пс
Огибающая	—	+	до 2·10 <sup>9</sup>	до 2·10 <sup>9</sup>	до 2·10 <sup>9</sup>	до 2·10 <sup>9</sup>
HiRes	—	—	+	+	+	+
Гистограмма	—	—	опция	+	+	+
Кол-во автоизмерений	11	25	25	37	53	37
Длинная память, 1/2/4 канала	2500 точек на канал, фикс.	10000 точек на канал, фикс.	400/200/100К, опц. до 8 Мбайт	2М/1М/500К, опц. до 64 Мбайт	2М/1М/500К, опц. до 64 Мбайт	250/250/125
Стробоскопический режим	—	—	до 250 ГГц	до 1000 ГГц	до 1000 ГГц	до 1000 ГГц
Интерфейс пробников	BNC	Tekprobe™	Tekprobe™	Tekprobe™ TekConnect™	TekConnect™, опт. вход Rifocs	TekConnect™
Восстановление тактовой частоты	—	—	—	опция SM	+	опция SM
Запуск по последовательному шаблону	—	—	—	опция ST	+	опция ST

## ГЛАЗКОВАЯ ДИАГРАММА — ОСНОВНОЙ ИНСТРУМЕНТ ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Телекоммуникационные сигналы не являются строго периодическими. Они характеризуются примерно одинаковым нулевым уровнем и уровнем единицы, примерно одинаковыми передними и задними фронтами, которые синхронизированы с тактовыми импульсами. Осуществляя синхронизацию по тактовым импульсам, можно получить кадры, отображающие различные участки потока данных: передний и задний фронты, нулевой и единичный уровень. С помощью функции бесконечной персистенции собранные «кадры» накладываются, образуя «глазковую» (похожую на глаз) диаграмму, что позволяет наблюдать на диаграмме верхний и нижний уровень цифрового потока, передний и задний фронт, а также оценить разброс. Измерение геометрических параметров глазковой диаграммы (апертуры, ширины, высоты «глаза», коэффициента формы, джиттера) позволяет судить о качестве передачи сигнала в линии. В CSA7000 параметры «глазковой» диаграммы измеряются автоматически.



Принцип формирования «глазковой диаграммы»



Отображение глазковой диаграммы и расчет ее параметров в CSA7000

Visual Basic, C, C++, MATLAB и др. пользователь может создавать собственное специализированное программное обеспечение с целью автоматизации многоступенчатых процессов сбора данных и их анализа.

На базе старших моделей осциллографов с рекордными полосами пропускания производители начали разработку специализированных модификаций для применения в конкретных секторах рынка, требующих высокоскоростного сбора данных (табл. 2). Это выражается в появлении как специализированного программного обеспечения, так и аппаратных опций. Для некоторых областей применения иногда достаточно специализированного программного пакета, для других областей необходимо внесение конструктивных изменений в прибор.

Фирма Tektronix, традиционно производящая тестовое телекоммуникационное оборудование, в т. ч. анализаторы протоколов (см. КИПиС, № 2, 2002 г.), выпустила специализированные модели осциллографов серий TDS7000/7000B и TDS8000B, предложив потребителю анализаторы телекоммуникационных сигналов CSA7000B/8000B (рис. 7), что потребовало добавления новых функциональных возможностей и использования новейших технологий.

Во-первых, анализаторы телекоммуникационных потоков CSA7000 получили оптический вход, что позволяет работать с оптическими телекоммуникационными сигналами типа SONET OC-48/STM-16 и Datascom со скоростью передачи данных до 2,5 Гб/с, гигабитным Ethernet и InfiniBand. Оптический сигнал с длиной волны от 700

до 1650 нм после преобразования в электрический во встроенном оптоэлектронном конвертере попадает на цифровой фильтр, характеристика которого выбирается в зависимости от требований конкретного сетевого стандарта. Работа цифрового фильтра в режиме реального времени реализуется с помощью DSP.

CSA7000 имеют дополнительные режимы синхронизации, используемые только для телекоммуникационных по-

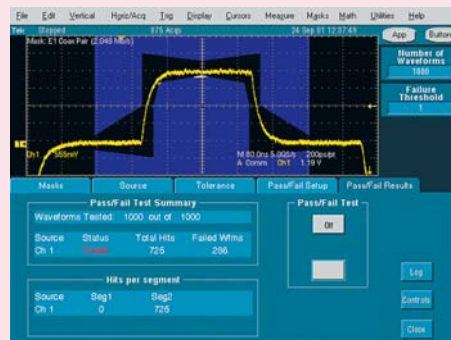


Рис. 9. Тестирование сигнала в CSA7000B по стандартной маске (поток E1-2,048 Мб/с, коакс.)

токов. Среди них — техническая «изюминка» CSA7000, отсутствующая у конкурентов. Это реализованная на аппаратном уровне система последовательной синхронизации «Serial Triggering», выделяющая в потоке данных указанный пользователем шаблон (длиной до 32 бит) в заданном стандарте, кодировке и формате, по которому может осуществляться запуск горизонтальной развертки (рис. 8).

Анализаторы телекоммуникационных сигналов также имеют систему восстановления тактовой частоты, позволя-

ющей выделить из потока телекоммуникационных данных тактовую частоту, что значительно улучшает возможности и точность построения «глазковых» диаграмм и проведения измерений других параметров сигнала. Стандартной возможностью в CSA7000 является тестирование сигнала по маске, определяемой сетевым стандартом (рис. 9).

При этом автоматически происходит нормализация вида сигнала относительно границ маски, вписывание сигнала в поле допуска, а после запуска процедуры верификации — автоматический подсчет собранных осциллограмм, попавших или не попавших в поле допуска. У пользователя есть возможность редактирования тестовой маски, осуществления нескольких десятков дополнительных по отношению к обычным осциллографам автоматических измерений сигнала, параметров «глазковых» диаграмм (см. врезку), джиттера и шума.

Отдельно пользователю предлагаются дополнительные программные пакеты, автоматизирующие решение типовых измерительных задач, например, тестирование USB, Ethernet, джиттера и др.

Насыщенность всех моделей современных осциллографов новейшими техническими решениями на базе патентов и ноу-хау — это главный залог покупательского интереса к ним и их востребованности на современном рынке высокотехнологичного оборудования.

Высокие цены на осциллографы hi-end (достигающие порой уровня цен на престижные иномарки) лишь отражают уровень использования новых технологий. В табл. 3 представлена сводная информация об использовании упомянутых в статье технологических особенностей в различных сериях осциллографов фирмы Tektronix.

Таким образом, даже такой краткий обзор показывает, что мировое лидерство в области осциллографии невозможно без непрерывной разработки и внедрения новых технологий, элементной базы, программных продуктов, алгоритмов, а главное — непрерывного обновления модельного ряда. Выпуск нескольких новых моделей в год — это стало нормой для ведущих мировых производителей осциллографов и ориентиром для ответственных разработчиков контрольно-измерительной техники.

(В статье использованы материалы компаний Tektronix, LeCroy и Agilent Technologies). □

*The key directions of modern oscillography progress, as well as know-how used in high-end oscilloscopes design are considered in this article. The basic specifications of the oscilloscopes with analog bandwidth more than 1 GHz and maximum sampling rate up to 20 GHz are represented.*