

# Сверхскоростные осциллографы Agilent 90000Q перешли 10-пс барьер

29 января 2013 г. серия настольных Hi-End осциллографов класса Infiniium 90000Q компании Agilent Technologies с полосой частот до 63 ГГц получила заслуженную награду — Best in Test. Четыре прибора этой серии претендуют на звание лучших в мире по совокупности параметров — времени нарастания, скорости дискретизации, полосе частот, глубине памяти, числу прикладных программ и количеству аксессуаров. Но главное — впервые в мире серийные осциллографы достигли и превзошли очередной «магический» барьер по временному разрешению в 10 пс ( $10^{-11}$  с). Статья достаточно детально знакомит читателей с новейшими приборами.

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

## Введение

Еще весной 2012 г. компания Agilent Technologies [1] сообщила об успешной разработке и начале серийного производства трех серий новых Hi-End цифровых осциллографов реального времени: Infiniium 90000, 90000A и 90000X. Приборы имеют аналоговую полосу пропускания от 2,5 до 13 ГГц и частоту выборок (дискретизации) 20 или 40 Гвыб./с и ориентированы на массовое применение в высокоскоростной электронике [2].

Совершенствование этих приборов позволило вскоре выпустить серию из десяти осциллографов Infiniium 90000Q с аналоговой полосой пропускания от 20 до 63 ГГц на уровне спада АЧХ в  $-3$  дБ, при частоте дискретизации 80 и 160 Гвыб./с, со стандартной памятью осциллограмм в 20 Мвыборок и максимальной 2 Гвыборок [3]. А затем компания Agilent Technologies объявила о проведении новой специальной акции: в период с 1 ноября 2012 г. по 31 марта 2013 г. покупатели осциллографа серии Infiniium (90000A, 90000A, 90000X или 90000Q) полу-

чали возможность бесплатной модернизации прибора с расширением глубины памяти до 1 Гвыборок.

Модели анализаторов сигналов (DSA) имеют самую глубокую в отрасли память в стандартной комплектации 50 Мвыборок и расширенное программное обеспечение. Осциллографы серии Infiniium 90000X и 90000Q могут оснащаться максимальной памятью в своем классе глубиной до 2 Гвыборок.

В осциллографах с традиционной архитектурой увеличение глубины памяти обычно приводит к снижению скорости обновления осциллограмм на экране прибора в связи с увеличением времени, необходимого для обработки и отображения захваченных сигналов. Осциллографы Infiniium имеют самую высокую скорость обновления сигналов для больших объемов памяти, что устраняет сразу две проблемы, которые могут привести к потере критически важной информации: медленную реакцию органов управления осциллографа при использовании большой глубины памяти и большое «мертвое» время, которое может быть причиной пропуска

аномалий сигнала. Благодаря большей глубине памяти осциллографы Infiniium могут отобразить наиболее важные подробности сигнала.

## Конструкция и внешний вид осциллографов 90000Q

Новая линейка флагманской серии цифровых осциллографов Agilent Infiniium 90000Q включает десять четырехканальных моделей с верхней границей полосы пропускания от 20 до 63 ГГц и возможностью расширения полосы для всех моделей за счет дополнительных опций. Это, например, убираемые ручки на рис. 1а, где показан внешний вид прибора. Все осциллографы допускают модернизацию пользователем — разумеется, при приобретении добавочных опций, выпускаемых в большом ассортименте.

На рис. 1б показан внешний вид осциллографа Agilent Infiniium 90000Q спереди. Прибор имеет одноблочную конструкцию

Таблица. Основные электрические параметры всех моделей осциллографов серии 90000Q

Модель	Полоса частот 2к/4к, ГГц	$f_s$ 2к/4к, Гвыб./с	Объем памяти стандартный/ max, Мточек	$t_r$ , * пс
DSAX96204Q	63/33	160/80	50/2000	7/5
DSOX96204Q				
DSAX95004Q	50/33	160/80	50/2000	9/7
DSOX95004Q				
DSOX93304Q	33/33	80/80	20/2000	13/10,6
DSAX92504Q	25/25	80/80	20/2000	18/14
DSOX92504Q				
DSAX92004Q	20/20	80/80	20/2000	22,5/17,5
DSOX92004Q				

Примечание. \* Первое значение при измерении на уровнях 10 и 90% от амплитуды, второе — на уровнях 20 и 80%.

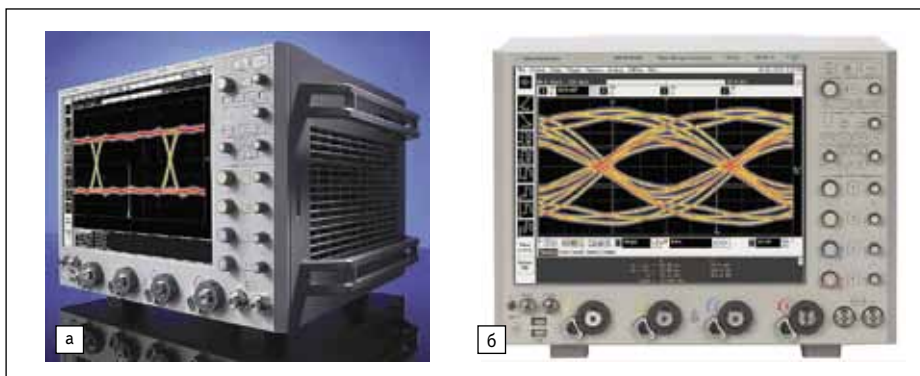


Рис. 1. Новейший сверхскоростной осциллограф Agilent Infiniium 90000Q

с очень простой и удобной передней панелью управления, большую часть площади которой занимает большой 15,4-дюймовый экран XGA ЖК-дисплея с высоким разрешением (1024×768 пикселей, 256 градаций яркости). Размеры прибора — 2×14,3×19,4 дюйма. Потребляемая от сети переменного тока мощность — 1200 Вт.

Основные электрические параметры всех моделей осциллографов серии 90000Q представлены в таблице.

Осциллографы серии Agilent Infiniium 90000Q являются кульминацией развития этого типа измерительных приборов и превосходят все предыдущие модели по глубине памяти. Они отличаются самым низким уровнем собственных шумов и самой широкой полосой пропускания. Но, пожалуй, главным и имеющим поистине мировое значение обстоятельством является то, что впервые в истории мировой осциллографии четыре модели серийных осциллографов преодолели очередной «магический» барьер по временному разрешению в 10 пс. (Оно задается временем нарастания переходной характеристики.) Заметим, что каждый такой барьер преодолевается с огромным трудом и затратами.

Объективности ради нужно отметить, что у компании Agilent есть достойный конкурент — американская компания LeCroy. Вот уже много лет как ее стробоскопические осциллографы достигли предела по полосе пропускания в 100 ГГц. Например, сейчас выпускаются стробоскопы WaveExpert 100H с полосой частот от 20 до 100 ГГц и памятью в 512 Мбайт. Но стробоскопические осциллографы менее удобны для тестирования и исследования, чем осциллографы реального времени с принципиально более узкой полосой частот.

LeCroy выпустила также осциллографическую систему реального времени LabMaster 10 Zi с полосой частот 25–65 ГГц, частотой дискретизации до 160 ГГц и памятью до 1 Гбайт. Быстродействующие узлы системы построены на основе SiGe-технологии, которую использует и компания Tektronix. Система LabMaster 10 Zi (рис. 2) выполнена с довольно большим входным блоком,



Рис. 2. 65-ГГц осциллографическая система LabMaster 10 Zi компании LeCroy

который устанавливается на осциллографический блок, то есть по своему виду это не одноканальный осциллограф. Кроме того, система уступает старшим моделям осциллографов серии 90000Q по уровню шумов каналов вертикального отклонения и максимальной устанавливаемой глубине памяти.

### Архитектура и элементная база осциллографов 90000Q

Серия цифровых осциллографов Agilent Infiniium 90000Q улучшена за счет применения специализированных интегральных микросхем компании Agilent (рис. 3) и многочиповых модулей с новой эксклюзивной технологией, получившей название RealEdge. Технология RealEdge сочетает в себе новые архитектуры, ИС и тонкопленочные компоненты следующего поколения [3].

В основе технологии RealEdge лежит процесс изготовления полупроводниковых приборов на основе фосфида индия (InP). Новая технология позволяет работать с высокими частотами, при этом одновременно сохраняется минимальный уровень шумов и джиттера (всего 75 фс).

На рис. 4 показан модуль одного из четырех каналов входа осциллографов 90000Q. Модуль отличает предельно жесткая экрани-

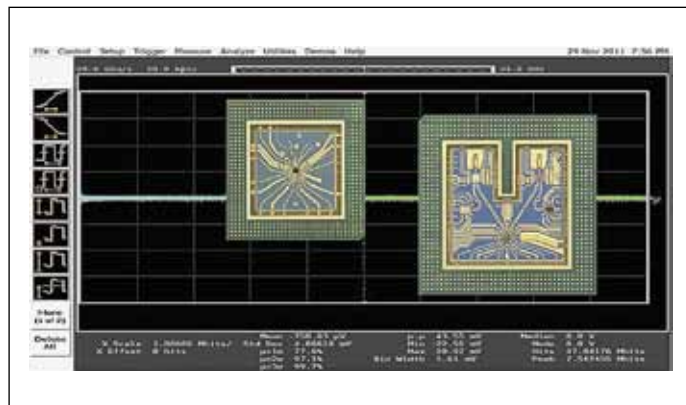


Рис. 3. Большие интегральные схемы на основе фосфида индия — основа сверхскоростных узлов

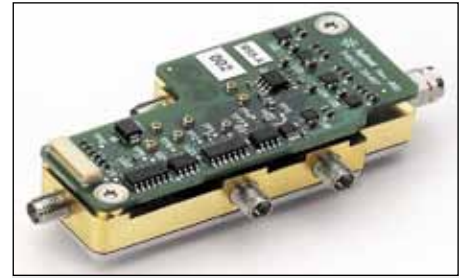


Рис. 4. Модуль одного входа осциллографа

рованная конструкция, созданная с учетом особенностей СВЧ-устройств.

Тщательная проработка входных модулей и применение в них InP-микросхем позволили реализовать разбивку спектра входного сигнала в диапазоне частот одного канала на две полосы с последующим их объединением и уменьшением (особенно в переходной области) уровнем шума (рис. 5). Кроме того, четыре канала осциллографа можно объединить в два канала с расширением полосы частот от 33 до 63 ГГц.

Осциллографы серии 90000Q относятся к приборам с открытой архитектурой. Это значит, что они созданы на основе встроенного персонального компьютера с открытой архитектурой и практически неограниченными возможностями в подключении периферийных устройств. В приборах использован современный персональный компьютер на двухъядерном микропроцессоре Intel Core 2 Duo с рабочей частотой 3,06 ГГц и ОЗУ 4 Гбайт на микросхемах DDR2. Компьютер оснащен встроенным жестким диском емкостью 250 Гбайт и более. Возможно его оснащение внешним пишущим DVD-RW приводом (опция 820).

Наличие столь мощного персонального компьютера позволяет подключать к нему клавиатуру, мышь, принтер, различные USB-устройства, сеть LAN и т. д. За счет этого можно существенно расширить возможности приборов и использовать для визуализации полученных от них результатов исследований множество программ.

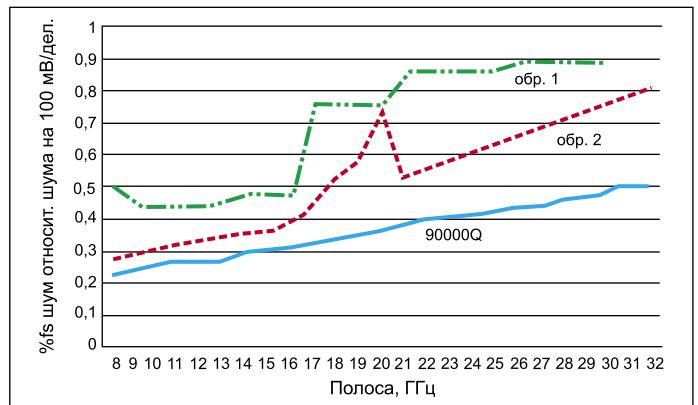


Рис. 5. Сравнение уровня шума вертикального канала осциллографа 90000Q с уровнем шума двух конкурирующих образцов

### Рекордные параметры в отрасли

Цифровые осциллографы серии Agilent Infiniium 90000Q обладают лучшими в отрасли характеристиками:

- Время нарастания: до 7 пс и менее.
  - Уровень шумов: 4,4 мВ при чувствительности 50 мВ/дел., 63 ГГц.
  - Минимальный измеряемый уровень джиттера: около 75 фс.
  - Максимальная скорость дискретизации: до 160 Гвыб./с.
  - Аналоговая полоса частот: 63 ГГц.
  - Обширный набор аксессуаров, в частности пробников.
  - Глубина памяти: стандартная 20 или 50 Мвыборок и максимальная 2 Гвыборок (опция).
  - Обширное программное обеспечение.
- Основные возможности осциллографов серии Agilent Infiniium 90000Q:
- Прямая оцифровка сигналов М-диапазона (от 60 до 100 ГГц).
  - Захват третьей гармоники цифровых сигналов, передаваемых со скоростью 28, 32 и 40 Гбит/с.
  - Анализ сигналов IEEE 802.3ba 40/100/400-GbE и сигналов Optical Internetworking Forum CEI 3.0.
  - Измерение до четырех дифференциальных каналов за один захват для решения сложнейших проблем перекрестных помех.
  - Прямые измерения напряжения более 1 Вп, когда широкополосные измерения и измерения общего назначения должны выполняться одним и тем же прибором.
  - 15 протоколов декодирования данных скоростных последовательных шин.

### Обычное снятие осциллограмм

Новые осциллографы серии Agilent Infiniium 90000Q отображают фронты аналоговых и цифровых сигналов намного точнее, чем другие аналогичные осциллографы, в большой степени благодаря лучшим частотно-временным параметрам и малому собственному джиттеру и шуму. Такое повышение точности позволяет исследовать самые сложные и высокоскоростные сигналы (рис. 6).

Каналы вертикального отклонения имеют чувствительность от 1 мВ/дел. до 1 В/дел. без пробников. Максимальный уровень входного сигнала — 5 В. Чувствительность регулируется с шагом 1/2/5. Масштаб по оси времени — от 1 или 2 пс/дел. до 200 с/дел. Канал синхронизации выполняет все массовые виды синхронизации осциллографов.

При необходимости можно воспользоваться цифровой «лупой» времени и наблюдать на экране осциллографа сигналы в разных масштабах времени (рис. 7, где обзорная осциллограмма показана сверху, а детальная снизу). Перемещаемые тонкие квадратные скобки на верхней осциллограмме выделяют область, видимую снизу.

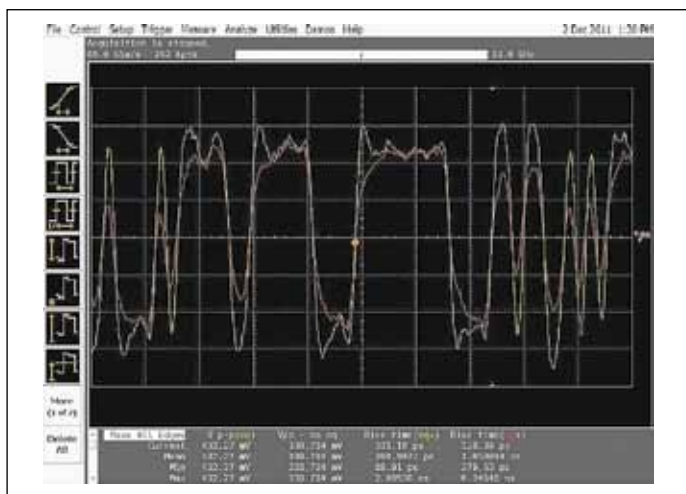


Рис. 6. Осциллограмма сигналов высокоскоростной шины DATA

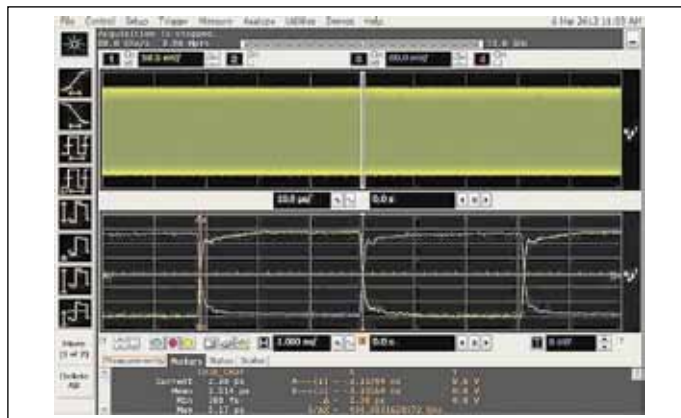


Рис. 7. Цифровая «лупа» времени в действии

С помощью этих приборов можно проводить стандартные курсорные измерения, автоматические измерения десятков амплитудных, временных, частотных, статистических и других параметров. Они отображаются в форме таблиц под осциллограммами (примеры на рис. 6 и 7).

### Спектральный анализ методом БПФ

Все современные цифровые осциллографы имеют реализованный программно спектральный анализ осциллограмм методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Это открывает качественно новые возможности анализа и изучения сигналов в частотной области. Но из-за ограничений в полосе частот и низкой скорости проведения такой анализ обычно не конкурирует с возможностями современных анализаторов спектра с аппаратной реализацией спектрального анализа.

Однако в осциллографах серии 90000Q спектральный анализ доведен до совершенства. Он реализует функции оконного векторного анализа спектра, то есть может вычислять как магнитуду, так и фазу гармоник. Диапазон частот спектрального анализа простирается от постоянного тока до частоты 80 ГГц при скорости дискретизации 160 Гвыб./с и до частоты 40 ГГц при скорости дискретизации 80 Гвыб./с. (В общем полоса составляет половину частоты дискретизации.) Выбор исследуемого диапазона частот осуществляется, как в анализаторах спектра, — выбором центральной частоты и полосы частот обзора span.

Экран с результатами спектрального анализа показан на рис. 8. Возможен выбор следующих широко распространенных типов окон: Hanning, flattop, rectangular, Blackman-Harris. Частотное разрешение определяется как частота дискретизации, деленная на общее число отсчетов (зависит от глубины памяти осциллограммы). Возможны

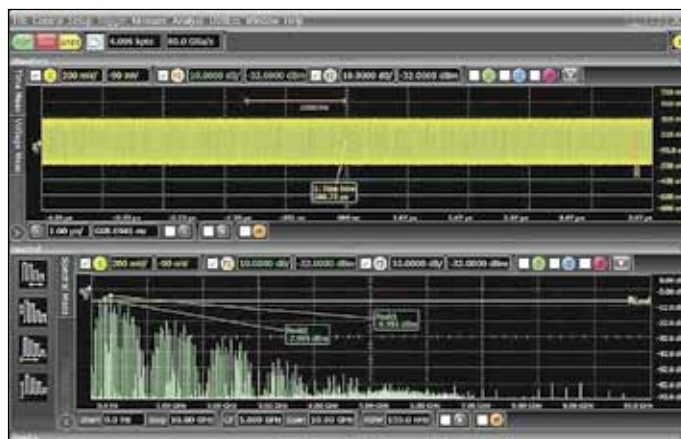


Рис. 8. Осциллограммы, иллюстрирующие проведение спектрального анализа методом БПФ

курсорные (с ручной и автоматической установкой маркеров на пики спектра) и автоматические измерения параметров спектров.

Описанные возможности относятся к традиционной области применения осциллографов. Она сводится к возможности увидеть в исследуемом процессе то, что есть на самом деле во временной и частотной областях. Такой подход в наибольшей мере соответствует научным исследованиям для традиционных областей применения осциллографии, к которым относятся ядерная электроника, микроэлектроника, физические узлы широкополосной связи, импульсные и радиолокационные устройства и т. д. [2]. Благодаря выдающимся электрическим параметрам и характеристикам осциллографов 90000Q они в области научных исследований стали мировыми лидерами, заменяя порой целую лабораторию из разнообразных измерительных приборов. И этому не мешает то обстоятельство, что ни одна из моделей приборов серии 90000Q не имеет встроенных средств контроля логических сигналов и не относится к осциллографам класса MSO. Такие приборы выпускаются в серии 90000X.

### Новые области исследования — новые типы диаграмм

По мере увеличения областей исследования осциллографов растет и число различных диаграмм для визуализации результатов исследований. Идеи их построения часто заимствованы из систем компьютерной математики, например MATLAB [4].

При тестировании скоростных компонентов и систем часто применяются «глазковые» диаграммы. Они строятся как две совмещенные и нормированные осциллограммы, например со входа и выхода исследуемого объекта (рис. 9). Ширина линий характеризует уровень джиттера и шумов. Малый уровень шума осциллографов серии 90000Q гарантирует малую ширину линий диаграммы и делает ее зависимой только от свойств сигналов. Для повышения наглядности используется «цифровой фосфор» — цифровая раскраска, хорошо выделяющая шумы и джиттер.

Если «глазок» открыт, то имеется достаточный запас для разделения стадий цифрового сигнала. А если он закрыт (и диаграмма попадает в установленную маску — многоугольник или «застывшую» диаграмму), то запас работоспособности будет исчерпан. Маски часто применяются для осуществления допускового контроля.

При отображении результатов статистических измерений и вычислений используются гистограммы (рис. 10). Наряду с обычными применяются гистограммы с технологией «цифрового фосфора» и миниатюрные гистограммы — микрогистограммы. Они часто комбинируются с обычными графиками или осциллограммами (рис. 10).

При работе с синусоидальными сигналами осциллографы серии 90000Q измеряют сигналы в комплексной форме и выдают их дей-

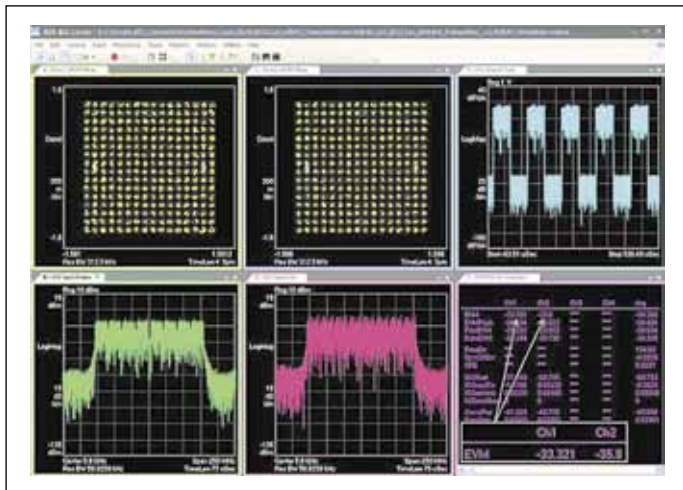


Рис. 11. «Звездные» диаграммы, огибающие спектра и фрагмент сигнала кодоимпульсной модуляции

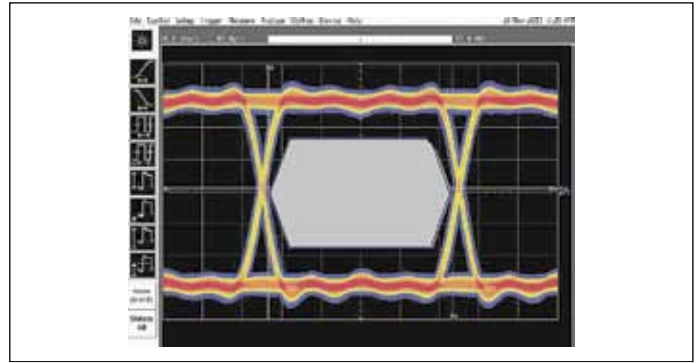


Рис. 9. «Глазковая» диаграмма с эффектом «цифрового фосфора» с маской

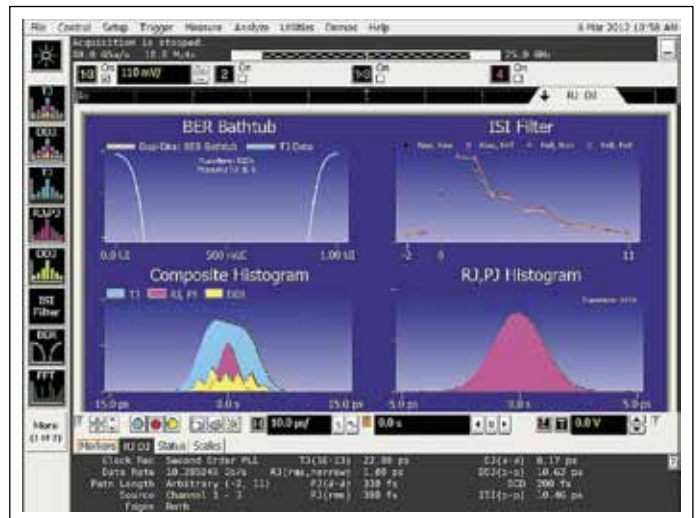


Рис. 10. Экран с гистограммами и результатами исследования битовой ошибки и джиттера скоростной цифровой системы (опция 067)

ствительную и мнимую составляющие. Помимо вычисления по ним фазового сдвига на заданной частоте, возможно построение их радиус-вектора. Положение точки — конца радиус-вектора системы — часто характеризует состояние исследуемой системы в частотной области, а набор точек показывает число состояний системы. Это особенно полезно при наблюдении сигналов с кодоимпульсной модуляцией и фазовой манипуляцией. На этом основано построение «звездных» диаграмм (рис. 11). На этом рисунке представлены также

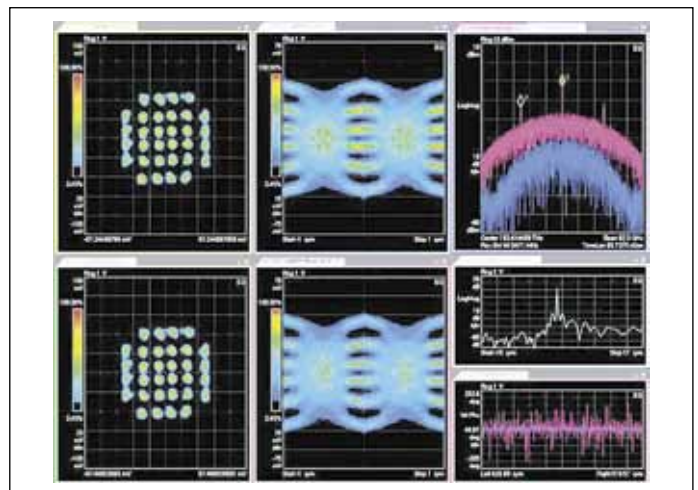


Рис. 12. Экран программы исследования систем с комплексной и оптической модуляцией

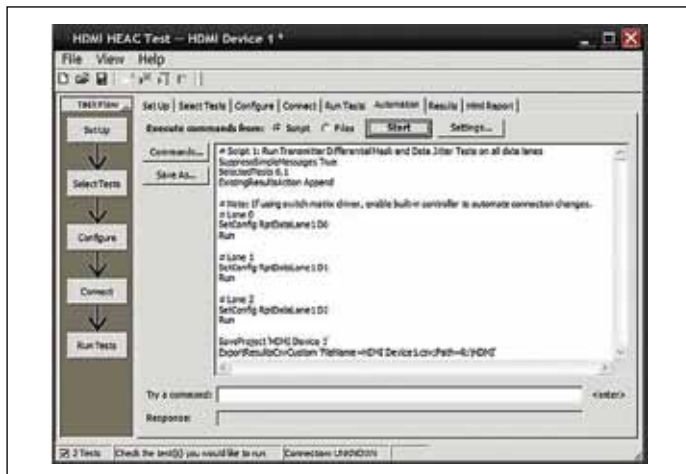


Рис. 13. Экран программы тестирования HDMI-интерфейса

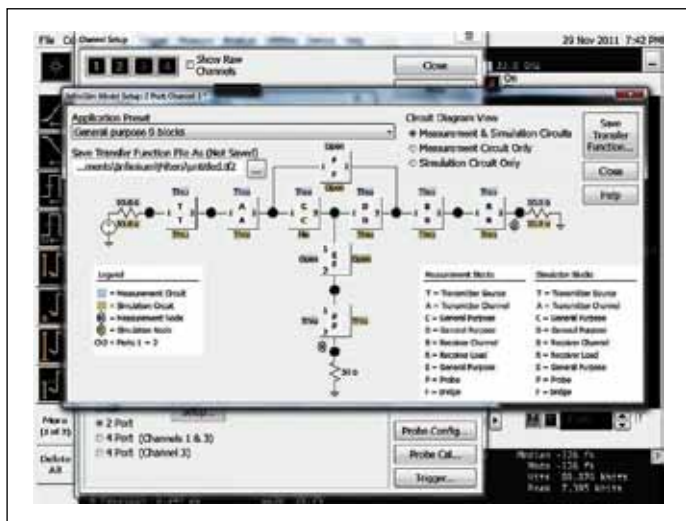


Рис. 14. Экран программы моделирования электронных систем

графики огибающей спектра и график фрагмента сигнала с кодоимпульсной модуляцией.

«Звездные» и «глазковые» диаграммы широко применяются при исследовании и тестировании широкополосных систем с комплексной и оптической модуляцией и манипуляцией. Пример экрана осциллографа с окном одной из программ для исследования таких систем показан на рис. 12.

В некоторых случаях полезно отображать листинг программы, осуществляющей тестирование. Пример наблюдения такой программы для тестирования скоростного интерфейса HDMI представлен на рис. 13.

Высокое разрешение экрана осциллографов 90000Q позволяет выводить графические диаграммы моделей от программ моделирования электронных систем и схем (опции 014 и 015). Пример этого дан на рис. 14.

### Интеграция с матричной системой компьютерной математики MATLAB

Во всем мире матричная система компьютерной математики MATLAB признана как лучший язык программирования для технических вычислений и расчетов, их визуализации и имитационного блочного моделирования различных систем и устройств [4]. MATLAB имеет мощные графические средства, которые становятся образцом расширенной графики современных цифровых осциллографов и анализаторов сигналов и спектров.

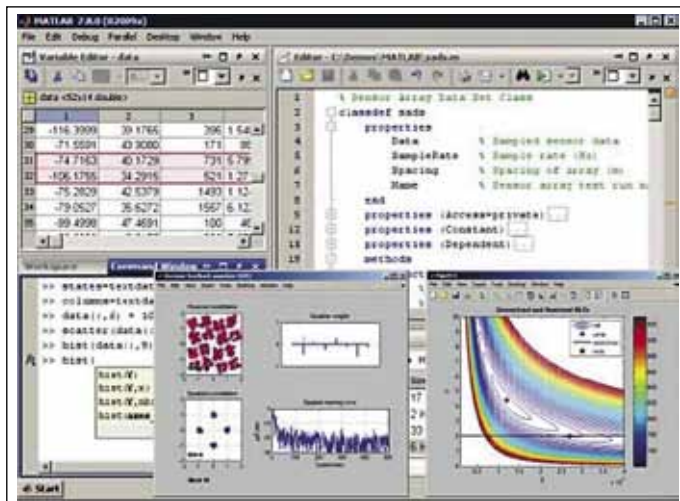


Рис. 15. Экран осциллографа с матричной системой компьютерной математики MATLAB

Agilent обычно предусматривает стыковку системы MATLAB со своими приборами. Приятно отметить, что при разработке новой серии осциллографов 90000Q компания не отошла от этой перспективной тенденции и выпустила несколько опций с использованием интегрированной с осциллографами серии 90000Q системы MATLAB (рис. 15). Это опции 10, 61, 62 и 65.

### Тестирование сверхскоростных шин

Тестирование современных скоростных последовательных шин — одна из самых распространенных задач для массового применения современных скоростных осциллографов. Она усложняется тем, что по шине данных передаются очень сложные и высокоскоростные сигналы (рис. 6). Такие сигналы не распознаются «на глаз». Они закодированы по определенным протоколам и требуют применения высокоскоростных демодуляторов для извлечения из сигнала данных битовой информации.

Осциллографы 90000Q могут декодировать сигналы данных последовательных шин по 15 протоколам. Имеется также опция для тестирования последовательных шин: пример ее работы дан на рис. 16.

### Тестирование высокоскоростных линий связи

Высокоскоростные линии связи используют различные методы кодоимпульсной модуляции и манипуляции, примеры тестирования которых уже приводились (рис. 11 и 12). Наряду с этим имеются спе-



Рис. 16. Экран программы тестирования шины PCI-Express



Рис. 18. Широкополосные аксессуары для подключения осциллографа

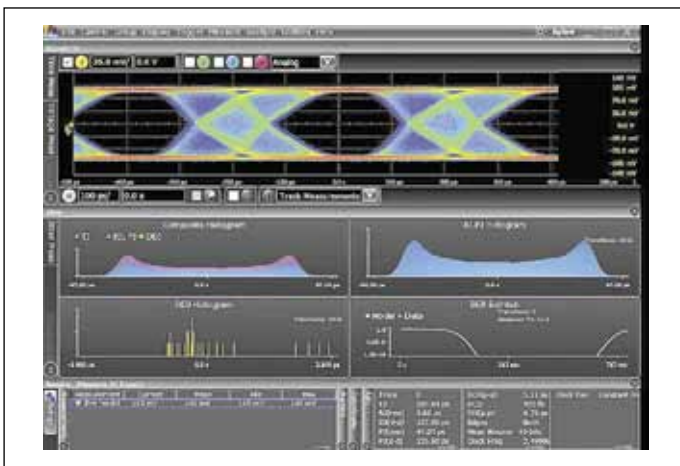


Рис. 17. Экран тестирования высокоскоростной линии связи



Рис. 19. Экран осциллографа с АЧХ пробника

циальные программы для исследования и тестирования таких систем связи. На рис. 17 показан экран с окном одной из таких программ. Окно дает представление о высокой степени визуализации исследуемых линий связи.

### Широкополосные пробники и аксессуары

При исследованиях в пикосекундном диапазоне времени обычно применяется работа с 50-Ом входами и по возможности без делителей напряжения. Однако это не всегда возможно. Например, при подключении осциллографов к выводам интегральных схем 50-омная нагрузка оказывается недопустимо низкоомной. Поэтому Agilent выпускает широкую номенклатуру делителей напряжения и согласующих устройств (рис. 18). Полоса частот таких аксессуаров обычно не превышает 30 ГГц, но и этот уровень в отрасли считается лучшим и вполне оправданным технически и экономически.

Особое внимание Agilent уделяет равномерности полосы пропускания у осциллографических пробников для приборов серии 90000Q (рис. 19). Предусмотрены меры калибровки таких пробников.

### Преимущества осциллографов серии Agilent Infiniium 90000Q

Итак, преимущества осциллографов серии 90000Q по сравнению с другими подобными приборами заключаются в лучших параметрах и повышенной функциональности. Для приборов этой серии характерны:

- Лучшие в отрасли технические характеристики.
- Гибкая система пробников Agilent Infiniium Max III, обеспечивающая полосу пропускания до 30 ГГц.
- Совместимость с более чем 40 пакетами измерительного ПО, предназначенного для измерения джиттера, расширения функций запуска, анализа результатов измерений и сертификационных испытаний.
- Возможность объединения нескольких осциллографов серии Q с помощью эксклюзивного программного обеспечения Agilent для создания системы с 40 и более каналами.
- Революционное ПО InfiniView, позволяющее анализировать результаты измерений на ПК или ноутбуке, что освобождает вычислительные ресурсы осциллографа.

- Расширенное ПО Agilent N2807A Precision-Probe, помогающее инженерам измерять характеристики и компенсировать влияние кабелей в полосе до 63 ГГц.

### Заключение

Приборы серии 90000Q определяют уровень развития осциллографической техники наших дней. Конечно, это уникальные и дорогие модели, приобрести которые может далеко не каждая лаборатория. Но они определяют планку научных и конструкторских разработок, многие из которых просто немислимы без таких приборов. Применяемые в них технические решения неизбежно становятся общим достоянием и постепенно проникают в более доступные модели. ■

### Литература

1. [www.agilent.com](http://www.agilent.com)
2. Дьяконов В. П. Сверхскоростная твердотельная электроника. М.: ДМК-Пресс, 2013.
3. Infiniium 90000 Q-Series Oscilloscopes. Data Sheet. Agilent Technologies. 30 сентября 2013.
4. Дьяконов В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров. М.: ДМК-Пресс, 2012.