

Tektronix AWG7000A — флагман индустрии сверхскоростных генераторов произвольных сигналов

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

Корпорация Tektronix (США) выпустила новейшую флагманскую серию сверхскоростных генераторов произвольных сигналов AWG7000A с прямым цифровым синтезом формы сигналов и самой быстрой в отрасли скоростью дискретизации в 50 Гвыб./с. В этой статье впервые детально описаны новые генераторы, особенности их конструкции, типовые параметры и разнообразные области применения. Особое внимание уделено применению генераторов при разработке и тестировании сверхскоростных и сверхширокополосных коммуникационных, связанных и измерительных устройств.

В наше время бурное развитие получила сверхскоростная твердотельная электроника [1, 2] — область науки и техники, связанная с генерацией и обработкой сигналов сверхмалой (пикосекундной) длительности, как правило, самой разнообразной формы с СВЧ-частотой повторения (до десятков ГГц). Такие сигналы находят широкое применение в технике сверхширокополосной и мобильной связи, в радиолокационных устройствах высокой точности, георадарах, измерительной технике, нанотехнологиях и других современных и актуальных отраслях науки и техники [1, 2].

До сих пор наиболее скоростными генераторами были модели корпорации Tektronix AWG7000 [3, 4]. Это довольно громоздкие (245×465×500 мм) и тяжелые (19 кг) стационарные приборы с потребляемой от промышленной сети мощностью 450 Вт. Но так как они имеют высокие временные и частотные характеристики, то Tektronix продолжает серийный выпуск этих генераторов. Сравнение с ними позволяет оценить новые модели серии AWG7000A (рис. 1).

Генератор сигналов произвольной формы AWG7122C имеет два канала с прямым циф-

ровым синтезом формы сигналов при дискретизации по уровню 10 бит и максимальной скорости выборки 12 Гвыб./с (и 24 Гвыб./с при объединении каналов в двухканальном генераторе). Приборы оснащены памятью 32 Мбайт (опция — 64 Мбайт). Аналоговая полоса (прямой выход с АЦП) — 4,8 ГГц, опция — 9,6 ГГц, полоса модуляции — до 4,3 ГГц, амплитуда — от -22 до +10 дБм (нормальный выход), секвенсор тестовых последовательностей в реальном времени (опция). Приборы содержат встроенный персональный компьютер (ПК) с операционной системой Windows. Цена приборов в России — около 4 млн рублей.

Другой прибор этой серии — AWG7012C — имеет несколько более скромные частотные параметры: скорость дискретизации — 8 Гвыб./с (16 Гвыб./с при объединении каналов), аналоговая полоса (прямой выход с АЦП) — 3,2 ГГц (опция — 6,4 ГГц),

полоса модуляции — до 3,2 ГГц. Стоимость этих приборов — около 3 млн руб.

По максимальной частоте сигналов конкурировать с этими генераторами могут приборы фирмы Agilent 81133A (одноканальные) и 81134A (двухканальные). Они имеют диапазон частот от 15 МГц до 3,35 ГГц при глубине памяти кодовых последовательностей 12 Мбит/канал.

Презентация нового лидера в области

8 марта 2013 года корпорация Tektronix [5] представила новую серию сверхскоростных генераторов произвольных сигналов с прямым цифровым синтезом формы выходных сигналов [6] (рис. 2). Построенные на основе специализированных сверхскоростных твердотельных микросхем, за многие годы отработанных фирмой при разработке сверх-

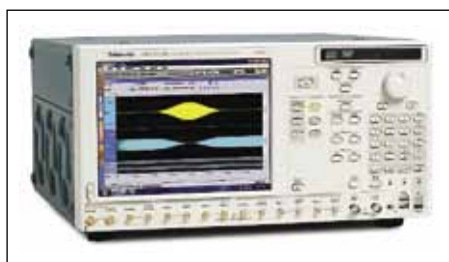


Рис. 1. Внешний вид генератора AWG7122C



Рис. 2. Новые сверхскоростные генераторы произвольных сигналов AWG7000A корпорации Tektronix



Рис. 3. Сравнение генераторов AWG7000A и AWG7000C

широкополосных осциллографов с полосой до 70 ГГц, новые генераторы обеспечивают самую высокую скорость (и частоту) дискретизации сигналов генераторов в отрасли — 50 Гвыб./с. Это вдвое превышает уровень прежних лидеров техники Tektronix, генерирующей внешние сигналы, и в несколько раз уровень, достигнутый другими фирмами. В разработке новых генераторов участвовала фирма Bell Labs.

Пока предложено два генератора — одноканальный AWG70001A и двухканальный AWG70002A. Внешне они отличаются лишь числом выходных разъемов — для дифференциальных аналоговых и маркерных цифровых сигналов. Отметим, что новые генераторы стали менее громоздкими. На рис. 3 они показаны слева в сравнении с генераторами серии AWG7000. Видно, что по высоте генераторы уменьшились почти в полтора раза, но они немного глубже генераторов серии AWG7000C. Габариты новых приборов — 153×460×603 мм, масса — 16,78 кг. Потребляемая от промышленной сети мощность даже немного выросла, достигнув 500 Вт. Стоимость приборов — около \$120 000 — вполне сопоставима с ценой престижной модели автомобиля.

Основные области применения генераторов серии AWG7000A, судя по их описанию [5]:

- Широкополосные и сверхширокополосные коммуникационные и связные электронные системы.
- Получение сверхширокополосных радиочастотных (RF) сигналов.
- Получение широкополосных RF-сигналов с частотой до 20 ГГц.
- Исследование и комплексное тестирование высокоскоростных микросхем и коммутационных устройств в обычном и интегральном исполнении.
- Исследование радиоприемных и радиопередающих сверхширокополосных устройств.
- Когерентные оптические системы.
- Получение разнообразных (в том числе произвольных) сигналов с широкой полосой и различными видами аналоговой и кодоимпульсной модуляции.

- Обеспечение лидерства в исследованиях и разработке в области электроники, физики и химии.
- Получение сигналов с заданной спецификацией, с высокой скоростью, малой (пикосекундной) длительностью импульсов и их фронтов, малым джиттером и фазовым шумом.
- Имитация реальных потоков данных и тактовых сигналов.
- Получение данных для генерируемых сигналов от осциллографов реального времени и анализаторов спектра корпорации Tektronix, просмотр и редактирование таких сигналов.
- Получение реальных сигналов с формой и параметрами, задаваемыми современными системами компьютерной математики — в первую очередь MATLAB [7].

Интерфейсы внешних устройств

AWG7000A имеют встроенный персональный компьютер, который обеспечивает полную автономность работы генераторов и управление ими с помощью типичных средств передней панели — прежде всего кнопок. Однако, следуя современным требованиям в области внешнего управления (в том числе дистанционного и через Интернет), приборы имеют необходимые интерфейсы для связи с внешним ПК, внешними устройствами, линиями и локальными сетями. Они расположены на задней панели генератора, показанной на рис. 4.

Помимо разъема питания, на задней стенке расположено четыре стандартных разъема универсальной последовательной шины USB, разъем локальной сети 10/100/1000 Mpps, разъем внешнего диска eSATA, выход опорного ге-



Рис. 4. Задняя панель генераторов AWG7000

нератора, разъем VGA для подключения внешнего дисплея, интерфейсы синхронизации, гнездо заземления и разъемы внешнего запуска и коаксиальные разъемы дополнительных выходов. Разъемы принтерного порта LPT, последовательной шины RS-232 и приборного порта GPIR отсутствуют как устаревшие.

Основные параметры и характеристики

Прежде всего отметим некоторые общие характеристики новых генераторов:

- Скорость дискретизации: от 1,5 до 50 Гвыб./с у одноканальной модели и от 1,5 до 25 Гвыб./с на каждый канал у двухканальной модели.
- Эффективная выходная частота: 20 ГГц у одноканальной и 10 ГГц у двухканальной модели.
- Джиттер RMS: типовой — 0,4 пс, общий — 20 пс (от пика до пика).
- Разрешение по вертикали: 10 бит без применения дополнительных маркерных выходов для цифровых сигналов и 8 бит при применении маркерных выходов.
- Амплитуда дифференциальных сигналов от пика до пика: 0,5–1 В с разрешением 1 мВ и погрешностью 2% + 1 мВ.
- Время нарастания и спада аналоговых сигналов: 36 пс при высоком уровне 1 В и низком 0 В (нагрузка 50 Ом).
- Разрешение сигналов по вертикали: 10 мВ.
- Создание длинных кодовых сигналов без построения палитры и описывающих их последовательностей.
- Наличие памяти на 16 Готсчетов и просмотр их за 320 мс со скоростью 50 Готсчетов/с позволяют легко анализировать длинные и сложные последовательности таких сигналов, часто встречающиеся в современных коммуникационных и связных системах.
- Высокоскоростная синхронизация в мультисигнальных AWG-системах, регулируемая временная задержка от 0 до 100 пс с разрешением 1 пс.
- Полное управление без внешнего ПК только с помощью кнопок и других органов управления на передней панели.
- Встроенный дисплей и удобные органы управления на передней панели приборов.
- Симуляция реального мира сложных сигналов и простота их просмотра.
- Получение данных от сигналов сверхширокополосных цифровых осциллографов реального времени, анализаторов спектра и систем компьютерной математики, просмотр, редактирование и изменение частоты дискретизации таких сигналов средствами генераторов AWG.
- Импорт векторов сигналов с систем компьютерной математики MATLAB, Excel и др. и эффективное их применение для обработки и визуализации этих сигналов.
- Выход опорного сигнала 10 МГц с уровнем 4 ± 2 дБм.

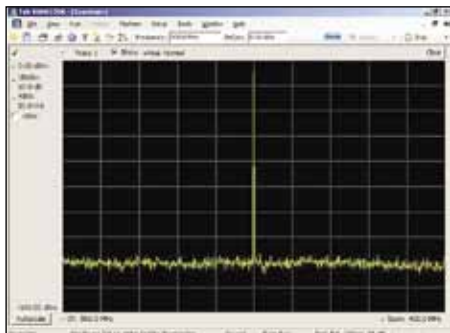


Рис. 5. Реальный спектр синусоидального радиосигнала с частотой 0,9 ГГц

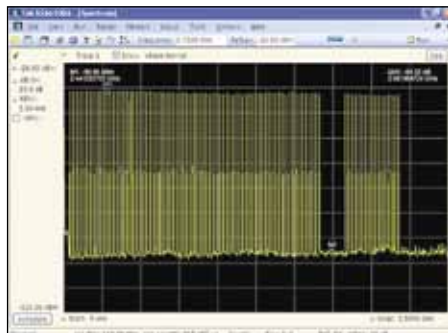


Рис. 6. Осциллограмма 3-ГГц мультикомпонентного сигнала с уровнем 60 дБс SFDR

угольной, пилообразной, $\sin(x)/x$, ISI, DCD, SSC и др. Поддерживается генерация сигналов, характерных для различных последовательных шин — SDATA, Display Port, SAS, PCI-E, USB и Fibre Chanel. Программа обеспечивает построение специальных диаграмм, например глазковых, звездных и спектральных, гистограмм и амплитудно-частотных характеристик (рис. 8).

Генераторы осуществляют прямой цифровой синтез сверхширокополосных сигналов с частотой до 20 ГГц без внешних RF-конвертеров. Это достигнуто благодаря возможности съема сигналов прямо с выхода сверхскоростного АЦП, минуя сглаживающие фильтры. Обеспечена симуляция в реальном масштабе времени всех видов высокоскоростных аналоговых эффектов при скоростной передаче данных до 12,5 Гбит. Пример наблюдения передачи данных для скоростной последовательной шины показан на рис. 9. Возможно создание высокоскоростных сигналов для оптических линий передачи данных.

Другое программное обеспечение RF Xpress позволяет задавать и анализировать более 25 типов сигналов, например импульсные и кодоимпульсные сигналы с различными типами модуляции, включая WiMAX, Wi-Fi, GSM, GSM-EDGE, EGPRS 2A, EGPRS2B, CDMA, W-CDMA, DVB-T, OFDM, Noise и CW Radar. Они применяются в радиолокаторах высокой точности (рис. 10) и широкополосных линиях связи, в частности сотовых и спутниковых.

Встроенный персональный компьютер генераторов на основе операционной системы Windows 7 имеет ОЗУ емкостью 4 Гбайт и твердотельный жесткий диск емкостью 500 Гбайт с интерфейсом SATA. Есть шесть разъемов универсальной последовательной шины USB 2.0: из них два на передней панели прибора, остальные — на задней. Они позволяют подключать модули USB флэш-

Максимальная скорость дискретизации у новых приборов достигает значения 50 Гвыб./с, то есть повышена более чем вдвое по сравнению с самыми скоростными моделями серии AWG7000С. Это открывает возможности исследования и тестирования самых высокочастотных компонентов и устройств, в частности всех моделей аналоговых и цифровых электронных осциллографов. Новые приборы имеют память 16 млн отсчетов при 10-битовом кодировании по вертикали и максимальной частоте повторения RF-сигналов до 20 ГГц. Динамический диапазон сигналов — свыше 80 дБ. Спектр аналоговых сигналов также простирается до частот 10–20 ГГц.

О числе аналоговых выходов генераторов уже было сказано. Они работают на стандартную нагрузку 50 Ом. Сигналы на аналоговых выходах — дифференциальные (два коаксиальных выхода каждого канала), для цифровых сигналов предусмотрены маркеры. Разрешение соответствует восьми разрядам индикатора, точность составляет ± 1 ppm. Предусмотрены следующие режимы работы: автоколебательный, ждущий, пачка и генерация произвольного сигнала с данными, набранными с передней панели или извне

(в том числе с помощью систем компьютерной математики MATLAB, Excel и др.).

Реальный спектр синусоидальных сигналов (рис. 5) демонстрирует не только спектральную чистоту сигнала, но и большой динамический диапазон, а также малый уровень шумовой дорожки. Динамический диапазон сигналов составляет около 80 дБ.

Высокая чистота спектра характерна и для многокомпонентных сигналов (рис. 6), что позволяет легко различать частотные компоненты сигналов. Это имеет большое значение при исследовании и тестировании линий связи, использующих такие сигналы.

На рис. 7 показан достигаемый уровень фазового шума для синусоидального сигнала в зависимости от сдвига частоты относительно несущей и при разных значениях несущей частоты. Нельзя не отметить малый уровень фазового шума.

Программное обеспечение генераторов серии AWG7000A

Программное обеспечение SerialXpress (рис. 8) для генераторов и осциллографов Tektronix позволяет задать генерацию сигналов различной формы: синусоидальной, тре-

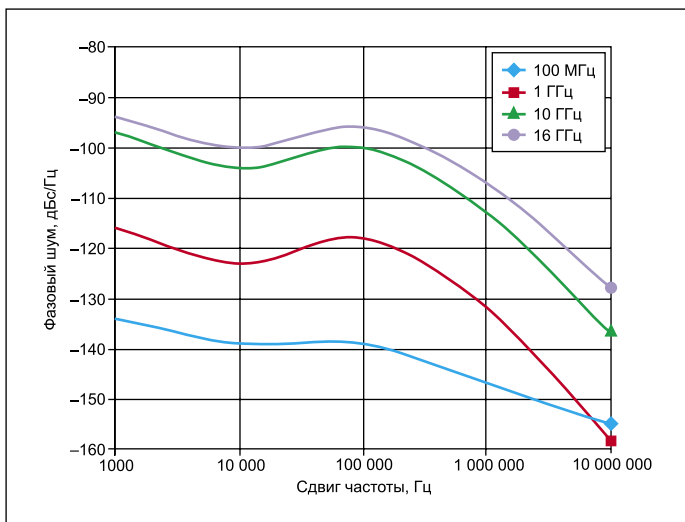


Рис. 7. Зависимость фазового шума генераторов AWG от сдвига частоты относительно частоты несущей

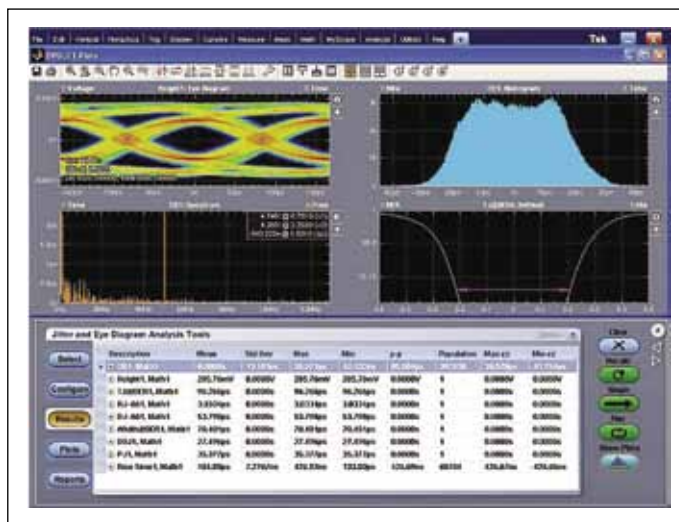


Рис. 8. Окно программы SerialXpress широкополосного осциллографа со значениями исследования джиттера цифровых данных

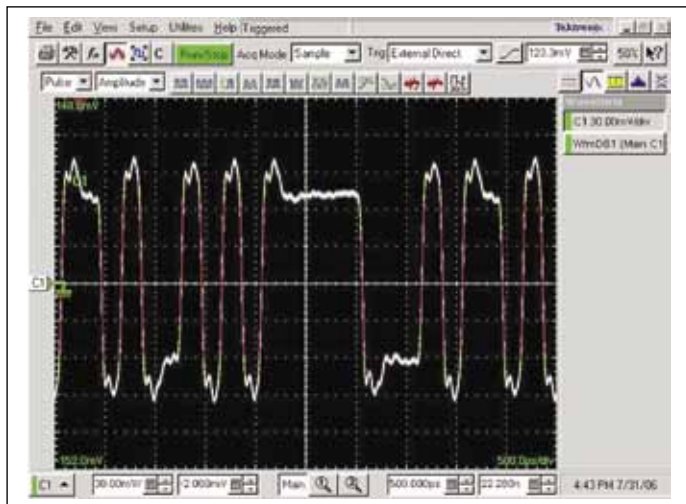


Рис. 9. Сигнал от последовательной шины при передаче данных

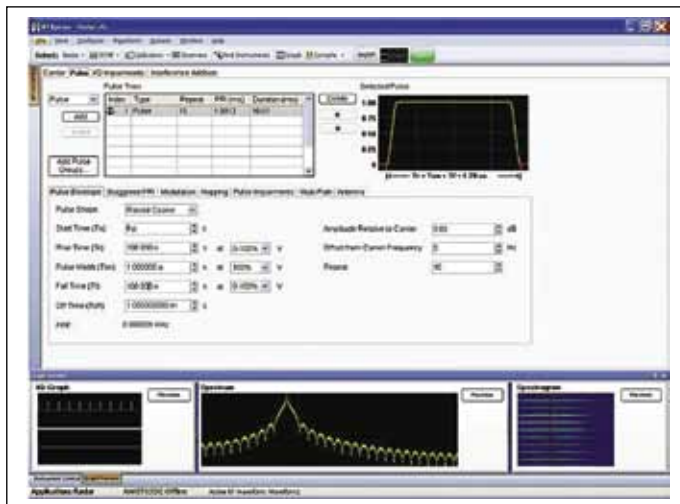


Рис. 10. Импульс радиолокатора, созданный генератором AWG70000A с программой RF Xpress

памяти, клавиатуру, мышь, принтеры и другие внешние устройства. Компьютер имеет ЖК-индикатор со светодиодной подсветкой и разрешением 1024×768 пикселей, размер экрана по диагонали составляет 165 мм.

Обеспечение совместимости с матричной системой MATLAB

В последние годы большое внимание уделяется совместимости цифровых осциллографов и генераторов с матричной системой компьютерной математики MATLAB [7]. Она имеет огромный арсенал средств по визуализации быстротекущих процессов, проектированию и тестированию как отдельных компонентов, так и сложных радиоэлектронных устройств и систем. Это сочетается с возможностью блочного и наглядного имитационного моделирования с помощью пакета расширения Simulink (рис. 11).

Специфика MATLAB заключается в применении современных методов построения виртуальных измерительных приборов, по интерфейсу подобных тем, что привычны для инженеров и ученых. Например, помимо обычного последовательного анализа спектра сигналов при моделировании СВЧ-устройств в MATLAB+Simulink широко применяются алгоритмы параллельного построения спектров, основанные на шумовых сигналах с широким и равномерным спектром (рис. 12). Источники таких сигналов, будучи подключенными к тестируемым устройствам и системам, дают отклик в виде зависимости спектральной плотности от частоты.

Подобные анализаторы спектра существенно более быстродействующие, чем обычные, и обычно позволяют отображать спектры в динамике. Фактически речь идет о наблюдении динамически изменяющихся спектров с использованием принципа параллелизма при получении представлений о спектре.

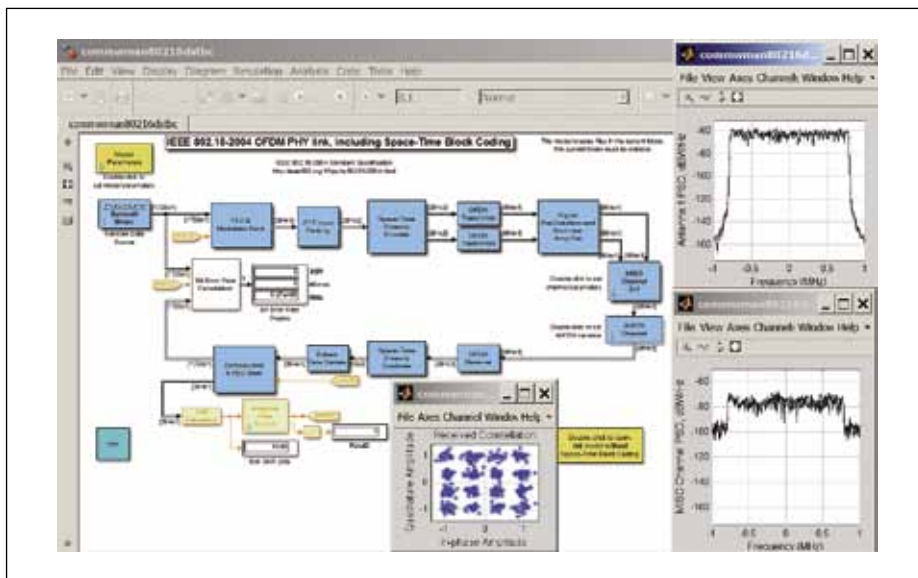


Рис. 11. Диаграмма Simulink-модели беспроводной системы связи WiMax

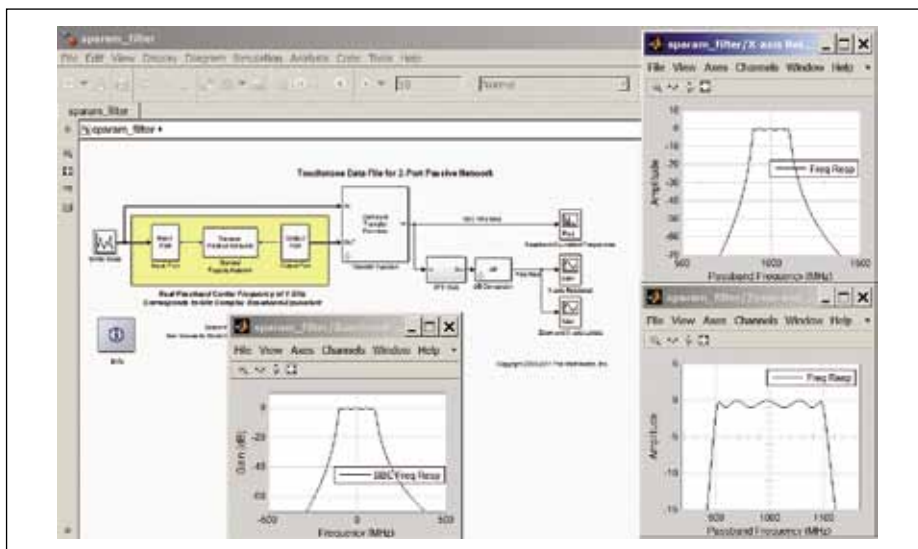


Рис. 12. Диаграмма модели широкополосной системы связи

Совместимость приборов с MATLAB подразумевает применение единых алгоритмов обработки сигналов и единых форматов их визуализации для удобства сравнения результатов тестирования с помощью реальных аппаратных средств и методов имитационного блочного моделирования, использованных в MATLAB. Это, естественно, предполагает и единство средств визуализации формы сигналов и их спектров. Наличие в генераторах персонального компьютера с жестким диском большого объема позволяет устанавливать MATLAB прямо на жесткий диск, что обеспечивает вполне естественную интеграцию приборов с этой мощной системой.

Генерация сигналов с широким спектром

Одной из сложных задач, решенной при разработке генераторов серии AWG70000A, стала разработка средств генерации реальных сигналов с широким и равномерным спектром до частот около 10–20 ГГц. По-видимому, найти генератор шума с такими параметрами сигнала не удалось, и при разработке генераторов AWG70000A был использован другой метод получения равномерного спектра — применение коротких импульсов с временной зависимостью типа $\sin(x)/x$.

Как видно на рис. 13, при линейном масштабе и умеренной длительности импульсов сигнала $\sin(x)/x$ его спектр мощности выглядит как идеально равномерный в некотором диапазоне частот (в данном примере — примерно до 32 МГц). При разработке генераторов серии AWG70000A стояла задача обеспечить равномерный спектр при логарифмическом законе его визуализации и расширить область равномерности спектра на два-три порядка. Теоретический спектр сигнала $\sin(x)/x$ при логарифмическом масштабе показан на рис. 14.

Сравнение реального спектра сигналов $\sin(x)/x$ минимальной длительности с теоретическим спектром этого сигнала приведено на рис. 15. Частота дискретизации у генератора AFG3101 составляет всего 1 Гвыб./с, тог-

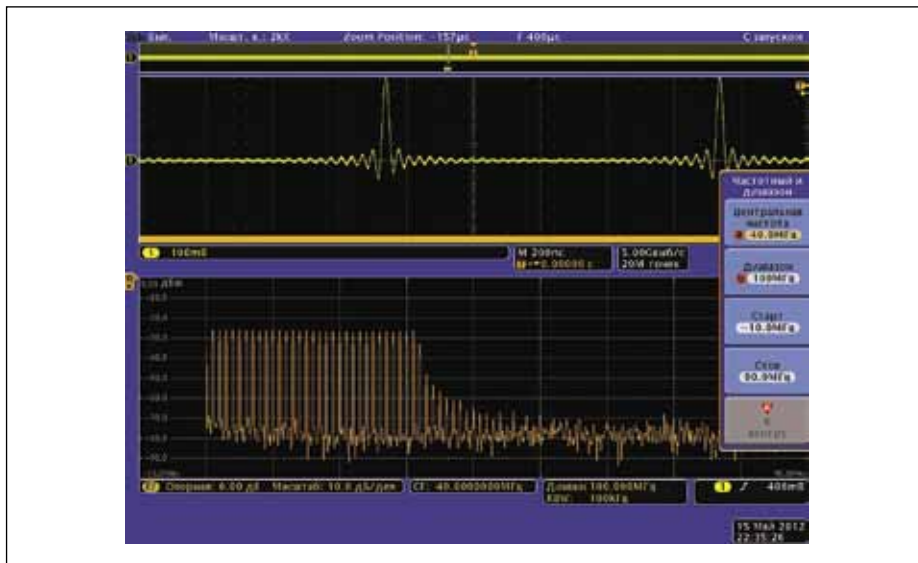


Рис. 13. Реальная осциллограмма и спектр сигнала $\sin(x)/x$ от генератора AFG3101, полученные от многоканального осциллографа Tektronix MDO4000 со встроенным анализатором спектра радиочастот

да как в новой серии генераторов она возросла и доведена до 50 Гвыб./с. Это расширяет диапазон частот спектра в десятки раз.

В генераторах AWG70000A реализована простая пассивная коррекция спада спектра

на его высших частотах, что позволило получить скорректированный спектр с уровнем спада до 3 дБ у генераторов AWG70001A до частот около 15 ГГц и даже менее 1 дБ у AWG70002A до частот выше 10 ГГц (рис. 16).

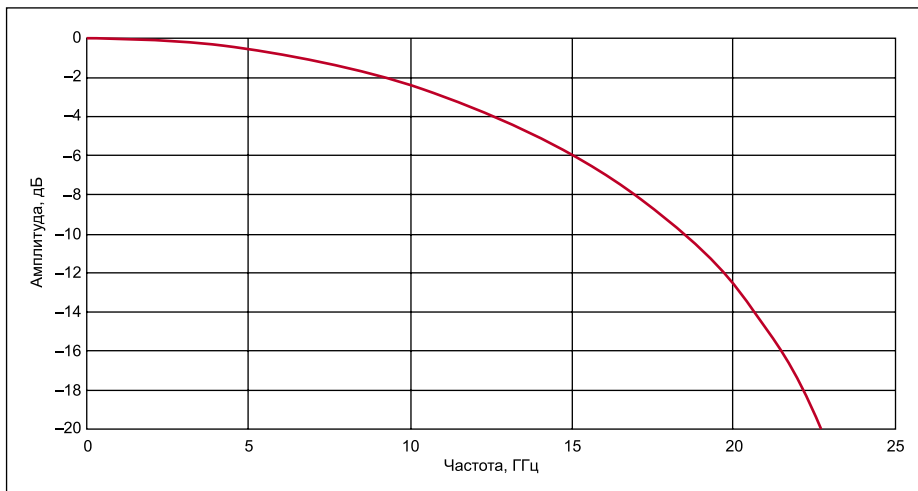


Рис. 14. Теоретический спектр сигнала $\sin(x)/x$ малой длительности

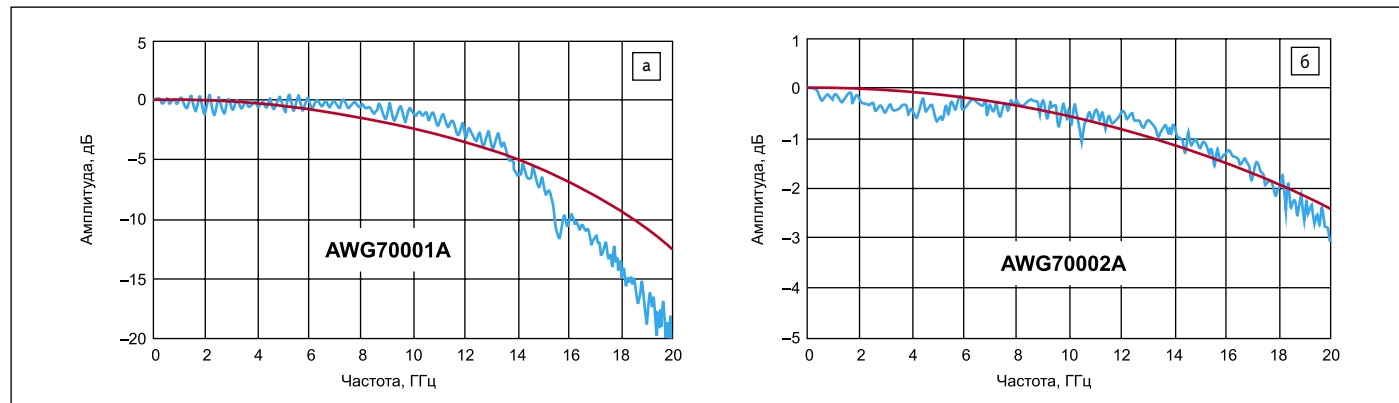


Рис. 15. Сравнение спектра сигнала $\sin(x)/x$ с амплитудно-частотной характеристикой спектра у различных генераторов серии AWG70000

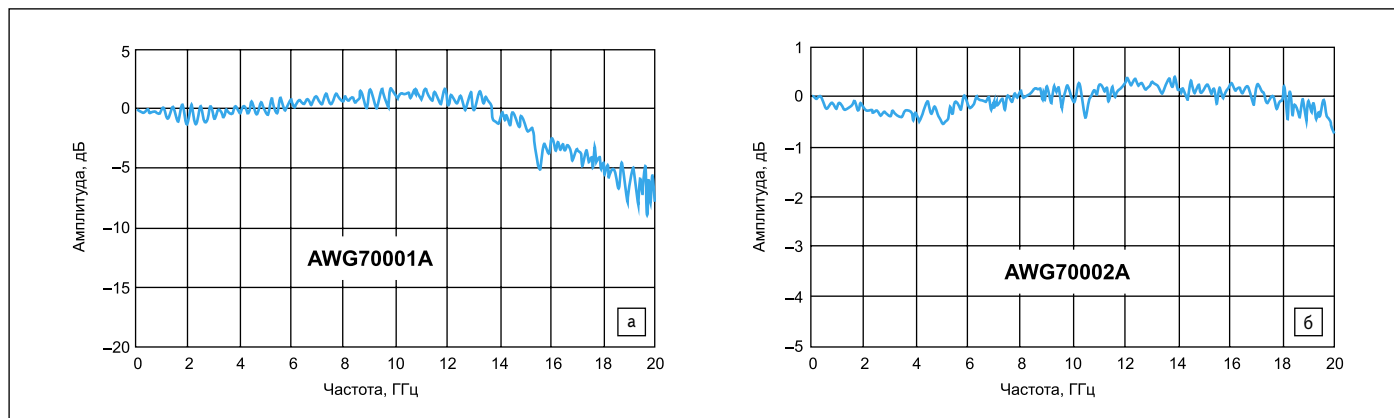


Рис. 16. Спектр скорректированного сигнала генераторов AWG70001A и AWG70002A

Заключение

Предложив рынку новейшие сверхскоростные генераторы сигналов произвольной формы с рекордной скоростью дискретизации в 50 Гвыб./с, корпорация Tektronix совершила рывок к беспорному лидерству на этом рынке. По совокупности параметров и характеристик новые генераторы согласуются с самыми скоростными цифровыми осциллографами реального времени этой фирмы. Приборы открывают новые обширные возможности в исследовании, разработке и тестировании современных сверхскоростных и сверхширокополосных коммуникационных и связных устройств с широким спектром частот их сигналов. ■

Литература

1. Дьяконов В. П. Сверхскоростная твердотельная электроника. М.: ДМК-Пресс, 2013.
2. <http://www.dmk-press.ru/catalog/electronics/measurement/>
3. Дьяконов В. П. Современные измерительные генераторы сигналов. М.: ДМК-Пресс, 2011.
4. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК-Пресс, 2011.
5. www.tek.com
6. Arbitrary Waveform Generators AWG70000 Series Data Sheet. Tektronix, 2013.
7. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК-Пресс, 2012.