

Осциллографы смешанных сигналов — анализаторы спектра MDO4000 фирмы Tektronix

Не успели в наш обиход войти осциллографы смешанных сигналов, как в ушедшем 2011 году корпорация Tektronix — лидер мировой осциллографии — объявила о выпуске нового революционного продукта — осциллографа смешанных сигналов со встроенными, вполне полноценными анализаторами спектра радиочастот. Новая серия приборов получила обозначение MDO4000 и дополняет хорошо зарекомендовавшие себя осциллографы DPO/MSO4000 корпорации Tektronix с закрытой архитектурой [1]. 14 декабря 2011 г. на конкурсе Elektra European Electronics Industry Awards (Великобритания) новый прибор стал победителем в номинации «Лучший продукт года» среди контрольно-измерительного оборудования. Эта награда предназначалась модели, достойной звания самой интересной новинки среди контрольно-измерительного оборудования за прошедший год. Статья подробно знакомит читателей с возможностями новых комбинированных приборов.

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

Название серии MDO происходит от слов Multi-Domain Oscilloscope [2], то есть осциллографы, работающие в разных областях определения сигналов. Сейчас их три (рис. 1а):

- Time Domain (Analog) — временная область определения аналоговых сигналов, в которой работают обычные (в том числе цифровые) осциллографы.
- Time Domain (Digital) — временная область определения цифровых и логических сигналов, в которой работают логические анализаторы.
- Frequency Domain — частотная область определения сигналов, в которой работают анализаторы спектра радиочастот (аналоговые и цифровые).

Всего лет десять тому назад в каждой из этих областей применялись отдельные приборы — осциллографы, логические анализаторы и анализаторы спектра. Всё это были сложные, дорогие, довольно большие и, как правило, цифровые приборы. Они изрядно загромождали рабочий стол инженеров и ученых, требовали немалых затрат на приобретение и обслуживание. Чтобы использовать их в работе, нужно было дополнительно пройти специальный курс обучения.

Работу в каждой области можно рассматривать как меру или координату в измерениях. Работа в трех областях придает измерениям трехмерность, которую, разумеется, не следует прямо отождествлять с чисто геометрическими представлениями. Такая трехмерность

представления сигналов осциллографами класса MDO открывает новые возможности в получении разнообразной информации о сигналах с учетом конкретных областей их применения. Например, сигналы обычных импульсных устройств определены во временной аналоговой области, цифровые и импульсные сигналы — во временной цифровой области, а сигналы различных радиотехнических и связанных устройств — в частотной области. Теперь их все можно исследовать одним прибором серии MDO4000.

В серию осциллографов MDO входит четыре модели (табл. 1). Приборы поставляются во многие страны, включая Россию. Их описание есть и на русском языке [3], его объем — 251 страница.

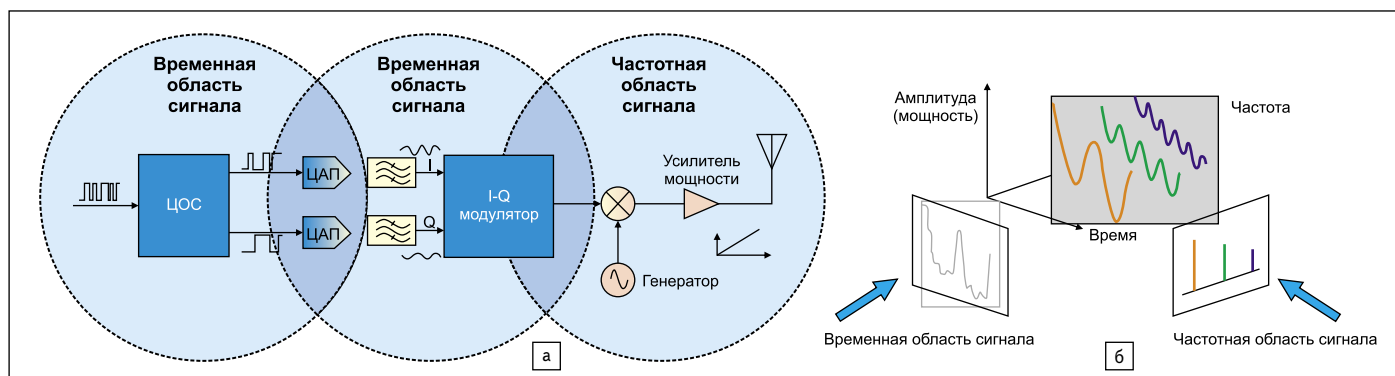


Рис. 1. Три области определения и измерения сигналов: а) блок-схема современного модуля беспроводного передатчика; б) временная и частотная области сигнала

Таблица 1. Основные параметры осциллографов — анализаторов спектра серии MDO4000

Модель	Число аналоговых каналов	Полоса частот аналоговых каналов, ГГц	Частота дискретизации аналоговых каналов, Гвыборок/с	Число цифровых каналов	Частота дискретизации цифровых каналов/MagniVu, Гвыборок/с	Диапазон рабочих частот
MDO4054-3	4	0,5	2,5	16	0,5/16,5	50 кГц...3 ГГц
MDO4054-6						50 кГц...6 ГГц
MDO4104-3		1	5			50 кГц...3 ГГц
MDO4104-6						50 кГц...6 ГГц

Примечание. MagniVu — частота дискретизации цифровых каналов, увеличенная за счет запатентованной Tektronix технологии (при работе с повышенным временным разрешением — до 60 пс).

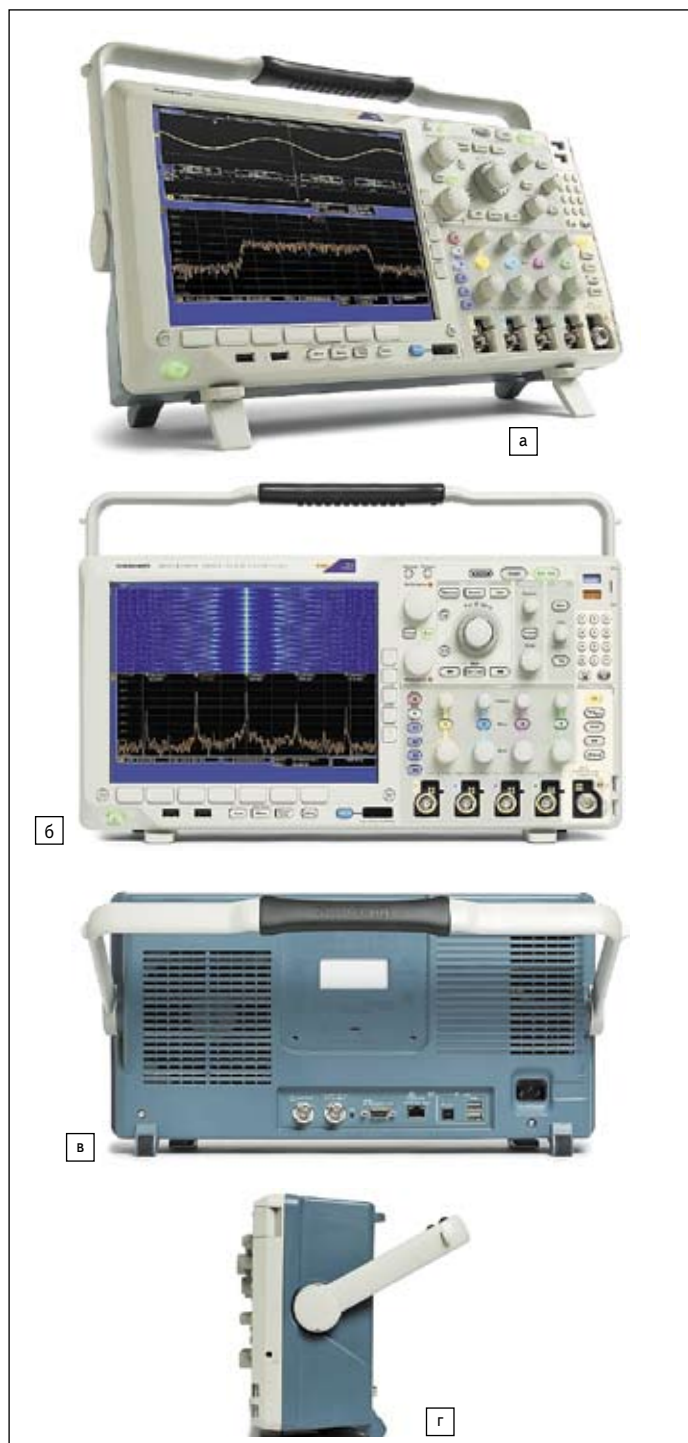


Рис. 2. Осциллограф MDO4000: а) внешний вид; б) вид спереди; в) вид сзади; г) вид сбоку

Внешний вид приборов новой серии показан на рис. 2а. Они напоминают приборы серий DPO4000 и MSO4000 (осциллографы смешанных сигналов).

Внешний вид приборов спереди показан на рис. 2б. Левую половину передней панели занимает экран прибора. Справа от него и снизу находятся кнопки меню. Под нижними кнопками расположены разъемы USB, группа кнопок и разъем для подключения пробников цифровых и логических сигналов. Другую половину занимает рабочая панель с органами управления. На нее можно установить сменную накладку с надписями на других, кроме английского, языках: например, на русском языке при поставке приборов в Россию и страны СНГ. На передней панели видна двойная ручка Wave Inspector для ручной и автоматической прокрутки осциллограмм. В нижней части панели расположены органы управления четырьмя аналоговыми каналами (их входы обозначены цифрами от 1 до 4) и дополнительный радиочастотный вход RF анализатора спектра.

Вид прибора сзади показан на рис. 2в. В центре задней панели расположено гнездо для подключения защитного тросика. Снизу расположены (слева направо): разъем AUX Out, разъем выхода опорного генератора (10 МГц), разъем выхода для подключения внешнего дисплея, разъем для подключения к локальной сети, разъемы универсальной последовательной шины USB и разъем для подключения сетевого кабеля.

Вид прибора сбоку изображен на рис. 2г. Ничего необычного здесь нет. Разве что стоит отметить гнездо «земли» для антистатического браслета.

На рис. 3 приведена функциональная схема упрощенной аналоговой части прибора. Она, как и у осциллографа DPO/MSO4000, содержит четыре аналоговых входа для сигналов, исследуемых осциллографической частью прибора. А под ними расположен новый канал анализатора спектра радиочастот.

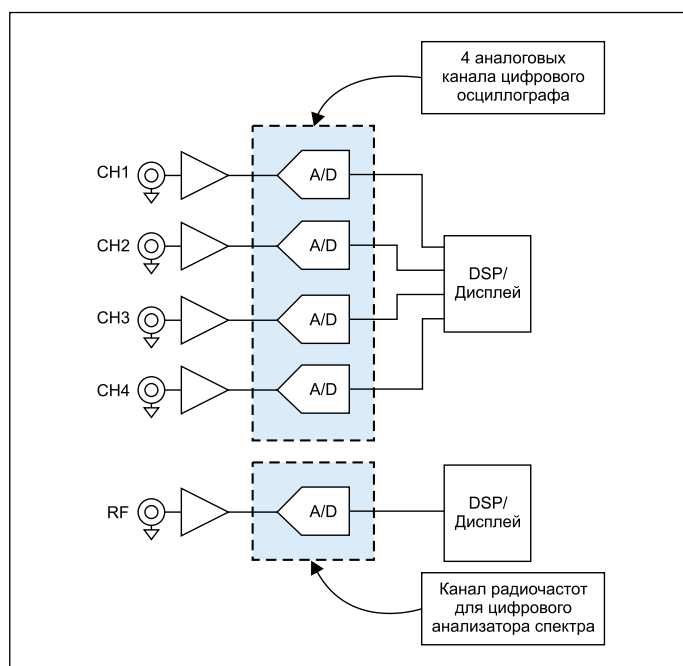


Рис. 3. Упрощенная аналоговая часть осциллографа MDO4000

Осциллограф комплектуется цифровым 16-канальным пробником и четырьмя аналоговыми пассивными пробниками. Отдельно можно приобрести и активные, дифференциальные, токовые, высоковольтные и другие пробники. На рис. 4 осциллограф показан с подключенными к нему пробниками. А на рис. 5 — с подключенным пробником радиоканала RF. Все каналы можно подключать совместно.

Типичный вид экрана осциллографа представлен на рис. 6. Экран состоит из двух частей. В верхней части отображаются обычные осцил-



Рис. 4. Осциллограф MDO4000 с пробниками цифровых и обычных аналоговых сигналов



Рис. 5. Осциллограф MDO4000 с RF пробником анализатора спектра

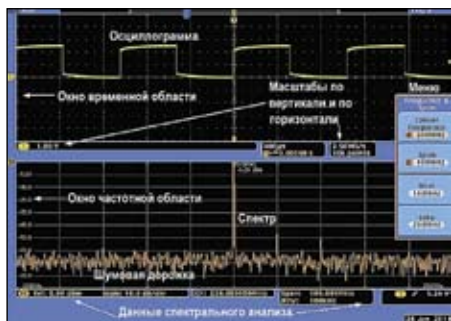


Рис. 6. Типичный вид экрана осциллографа MDO4000

лограммы и логические диаграммы, а в нижней части — спектр и спектрограммы.

MDO4000 в роли цифрового осциллографа

При работе осциллографической части прибора он имеет возможности, присущие описанным в [1] возможностям осциллографов DPO/MSO4000. Стоит напомнить, что это лучшие из осциллографов корпорации Tektronix с закрытой архитектурой. Благодаря специальной памяти прибор имеет свойство послесвечения — цифрового фосфора. Это позволяет наблюдать осциллограммы сигналов с редкими аномалиями сигналов — глюками (рис. 7). При этом чем

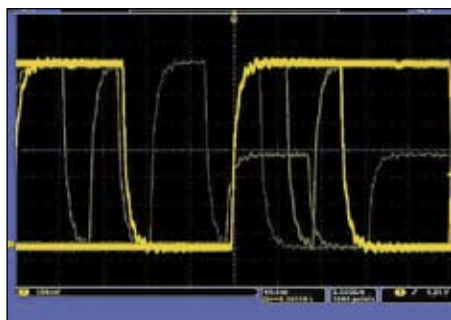


Рис. 7. Осциллограмма импульса с глюками, иллюстрирующая действие цифрового фосфора

реже повторяются глюки, тем менее яркими выводятся их осциллограммы. Тем не менее, будучи запоминающим осциллографом, прибор фиксирует даже одиночные глюки. На рис. 7 показано, что при желании осциллограмму можно развернуть на весь экран.

Осциллографическая часть прибора позволяет наблюдать осциллограммы сигналов с сильной временной нестабильностью — джиттером. Пример наблюдения быстрых перепадов с сильным временным дрожанием (джиттером) дан на рис. 8. В верхней части экрана показано построение микрогистограмм для оценки статистических параметров джиттера. В нижней части экрана приведена таблица параметров джиттера. Так же выводится и таблица результатов автоматических измерений, выполняемых осциллографом. При необходимости можно вывести опорные и расчетные осциллограммы.

В правом верхнем углу передней панели есть два отсека для встраиваемых модулей программного обеспечения осциллографа. Они поставляются и приобретаются отдельно. Есть модули для анализа джиттера, исследования энергетических устройств и источников электропитания, тестирования параллельных и последовательных шин различного типа, телевизионных устройств высокого разрешения и др.

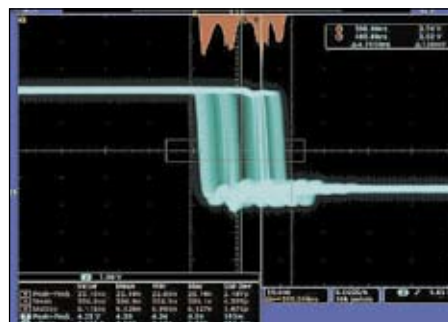


Рис. 8. Осциллограмма перепадов напряжения с сильным джиттером и ее контроль (сверху) с помощью микрогистограмм

MDO4000 в роли анализатора спектра

Наличие в составе осциллографов серии MDO4000 анализатора спектра радиочастот — главная особенность этих приборов. Тут уместно отметить, что функции программного построения спектра осциллограмм есть ныне даже в простых цифровых осциллографах. У некоторых, в частности DPO/MSO4000, они реализованы очень хорошо. Особенно хороши они в низкочастотной области (сигналы с частотами звукового диапазона и промышленной сети переменного тока), недоступной многим анализаторам спектра радиочастот. Так в чем же преимущества MDO4000?

Основное преимущество в том, что MDO4000 содержит канал вполне полноценного анализатора спектра с отдельным радиочастотным входом RF. Сравнение анализатора спектра MSO4000 с программным анализатором спектра обычного цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) и массового анализатора спектра дано в таблице 2. Сразу отметим, что высококачественные анализаторы спектра с полосой частот в десятки и даже сотни ГГц [4, 5], конечно, намного превосходят по своим характеристикам MDO4000, и сравнение с ними просто лишено смысла. Это все равно, что сравнивать «жигули» с огромным карьерным самосвалом.

Из этих данных можно заключить, что анализатор спектра осциллографа MDO4000 занимает среднее положение между обычными ЦЗО и массовыми анализаторами спектра. Приборы имеют уникально широкую по-

Таблица 2. Сравнение MDO4000 с ЦЗО и массовым анализатором спектра по основным параметрам

Параметр	MDO4000	ЦЗО	Анализатор спектра — самостоятельный прибор
Область частот	50 кГц...6 ГГц	DC...3,5 ГГц	100 кГц...3 ГГц
Шум, дБс	-60...-50	-45	-60...-40
Остаточный шум, дБм	-90...-80	-70	-90...-70
DANL, дБм/Гц	-152	-125	-123

лосу захвата спектра — более 12 ГГц! И позволяют анализировать большинство радиочастотных устройств с частотами сигналов до 3 и даже 6 ГГц. Но низкочастотная граница спектра у них довольно велика — 50 кГц.

Поскольку между разными областями анализа обычно существует корреляция по времени, можно производить точные измерения временных интервалов, чтобы определить значения времени задержки и ожидания между событиями, оценивать время прохождения команд и изменения радиочастотного спектра. Например, просмотр спектра при включении ГУН с ФАПЧ либо измерение переходных характеристик при скачкообразной перестройке частоты РЧ-сигнала — теперь достаточно простые задачи. Определение источника нерегулярных, аппаратно-зависимых электромагнитных помех никогда не было таким простым, благодаря способности MDO4000 обеспечить полное исследование системы с временной корреляцией в обеих областях, что просто невозможно осуществить с помощью другой современной контрольно-измерительной аппаратуры.

Внешне отличие новых приборов от предшествующих серий осциллографов DPO/MSO4000 проявляется в наличии небольшой панели анализатора спектра, расположенной в правой части передней панели (рис. 3). Над ней расположены разъемы для подключения программных модулей анализа джиттера, последовательных шин, источников электропитания и т. д. На рис. 9 показана панель анализатора спектра с набором дополнительных меню, которые создают ее кнопки. Панель имеет также цифровые кнопки, которые служат для набора значений частот и других параметров анализатора спектра.

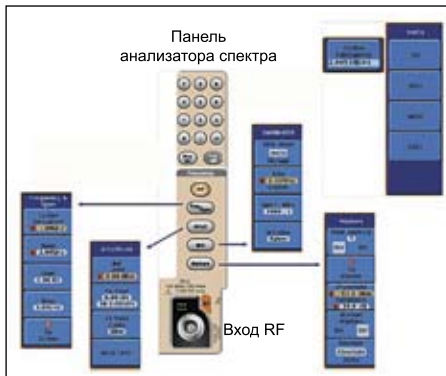


Рис. 9. Панель анализатора спектра MDO4000 и относящиеся к ней меню

Совместное представление осциллограмм и спектров полезно не всегда. Но часто оно позволяет оценивать работу сложных систем с различными сигналами в комплексе, отслеживая изменения тех или иных сигналов во времени. Для примера на рис. 10 представлены данные о работе синтезатора синусоидального сигнала. Верхние осциллограммы отражают переходные режимы синтезатора, а спектр сиг-

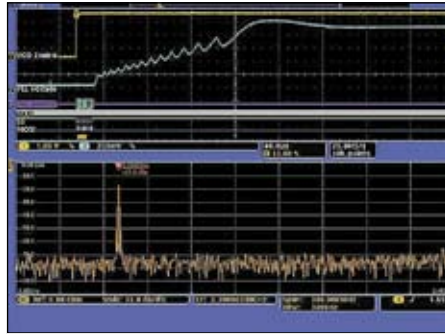


Рис. 10. Пример представления осциллограмм и спектра

нала внизу дает частотное представление сигнала. На нем, в частности, видно, что формируется амплитудно-модулированный сигнал с двумя боковыми полосами, примыкающими к линии спектра несущей частоты.

Перемещая область наблюдения спектра, можно вывести различные его составляющие (пример на рис. 11). Установки анализа спектра в осциллографах DPO/MSO4000 не являются самостоятельными и увязаны с установками осциллограмм. Но в DPO4000 этого недостатка нет: он имеет установки, типичные для специализированных анализаторов спектра. Например, область исследуемых частот можно задать начальной и конечной частотами или центральной частотой и диапазоном частот. Есть и другие установки, привычные для специальных анализаторов спектра.

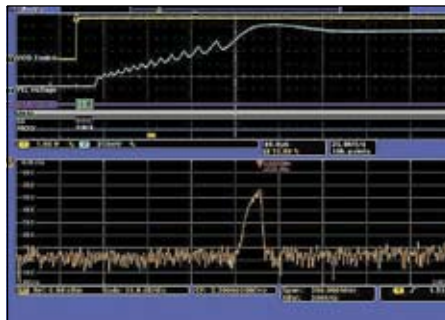


Рис. 11. Наблюдение за изменением спектра

Второй пример такого рода дан на рис. 12. Здесь уже исследуется другой сложный сигнал, и спектр (на рис. 12 внизу) имеет иной

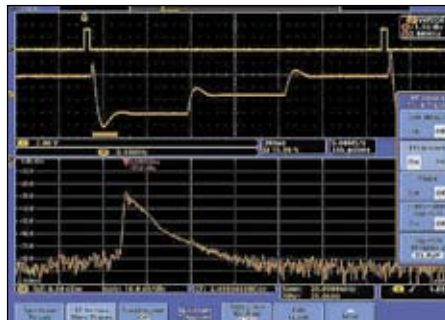


Рис. 12. Изменение времени спектрального анализа

вид. Область сигнала, для которой строится спектр, выделяется характерной жирной чертой под осциллограммами сигнала.

Пример одновременного построения осциллограммы цифрового сигнала и спектра показан на рис. 13. Спектр строится для сигнала, поданного на вход RF. О соответствии спектра тому или иному сигналу можно судить по цвету линий сигнала и спектра.

При необходимости детального изучения спектра можно под его представление выделить все окно и рассматривать спектр максимально детально. Пример такого представления спектра показан на рис. 14.

В технике спектрометрии принято обозначать различные линии или пики спектров маркерами с указанием их частоты и уровня. Пример такого указания для одной линии спектра дан на рис. 14, а на рис. 15 показано применение маркеров для обозначения нескольких линий спектра.

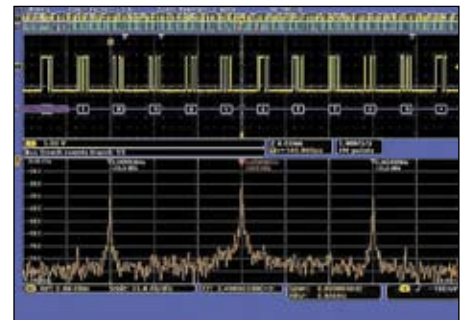


Рис. 13. Пример наблюдения одновременно цифрового сигнала и спектра

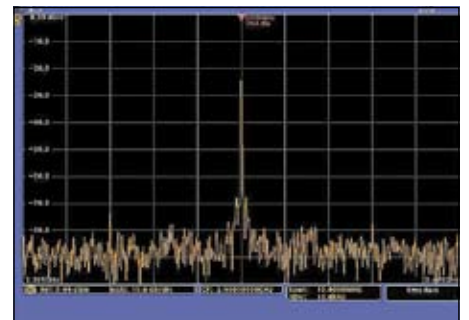


Рис. 14. Пример наблюдения спектра в расширенном окне

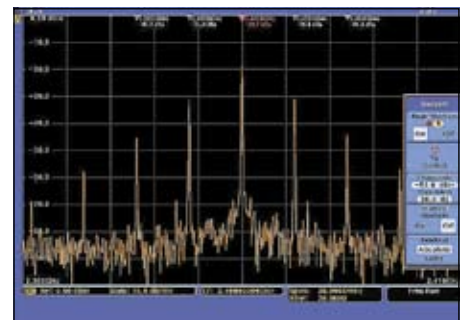


Рис. 15. Пример спектра с маркерами в верхней части окна спектра

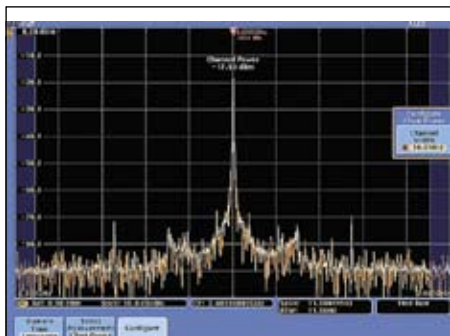


Рис. 16. Пример операции усреднения спектра

Анализатор спектра MDO4000 обладает очень эффективным средством усреднения (Average) множества спектров. Это особенно полезно для очистки спектров от шумов, импульсных и высокочастотных помех. Эффективность этого средства можно видеть на рис. 16. Здесь усредненный спектр показан линией белого цвета. Нередко усреднение позволяет четко выделить короткие пики спектра небольшой высоты, которые могут маскироваться шумами. Впрочем, не стоит забывать, что усреднение увеличивает общее время построения спектров.

Помимо усреднения, при построении спектров используются и другие операции, например фиксация максимума и минимума спектра. Действие этих операций демонстрирует рис. 17. Меню операций показано в правой части окна на рис. 17.

Различные типы окон

В осциллографах — анализаторах спектра MDO4000 — применяется оконное быстрое преобразование Фурье (БПФ, или FFT). При этом вид пиков спектра сильно зависит от вида применяемого окна. Для примера на рис. 18 показано окно Кайзера, построенное в линейном и в логарифмическом масштабах по вертикали. Такие масштабы характерны и для построения спектров в целом.

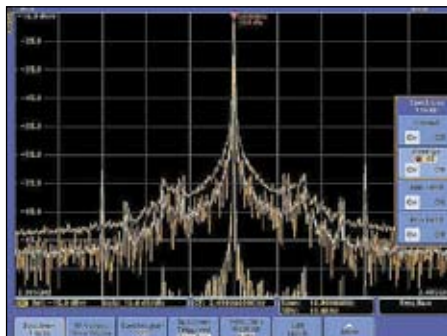


Рис. 17. Примеры операций и меню операций спектра

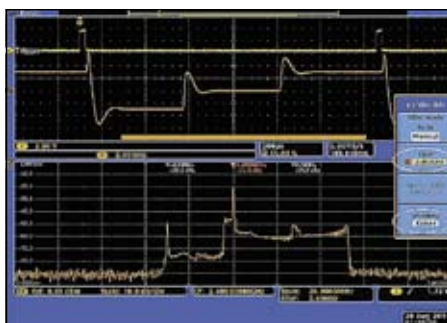


Рис. 19. Пример выбора RBW и типа окна при построении спектра

В рассматриваемых приборах можно задать окна различного типа. Пример вывода RBW (полосы частот разрешения) и типа окна (Window) при построении спектра показан на рис. 19. Обратите внимание, что выбрать RBW можно как вручную (с помощью панели цифровых кнопок), так и в автоматическом режиме.

Таблица 3. Виды окон спектрального анализа

Окно	Window-фактор	Время анализа, мкс
Kaiser (по умолчанию)	2,23	223
Rectangular	0,89	89
Hamming	1,3	130
Hanning	1,44	144
Blackman-Harris	1,9	190
Flat-Top	3,77	377

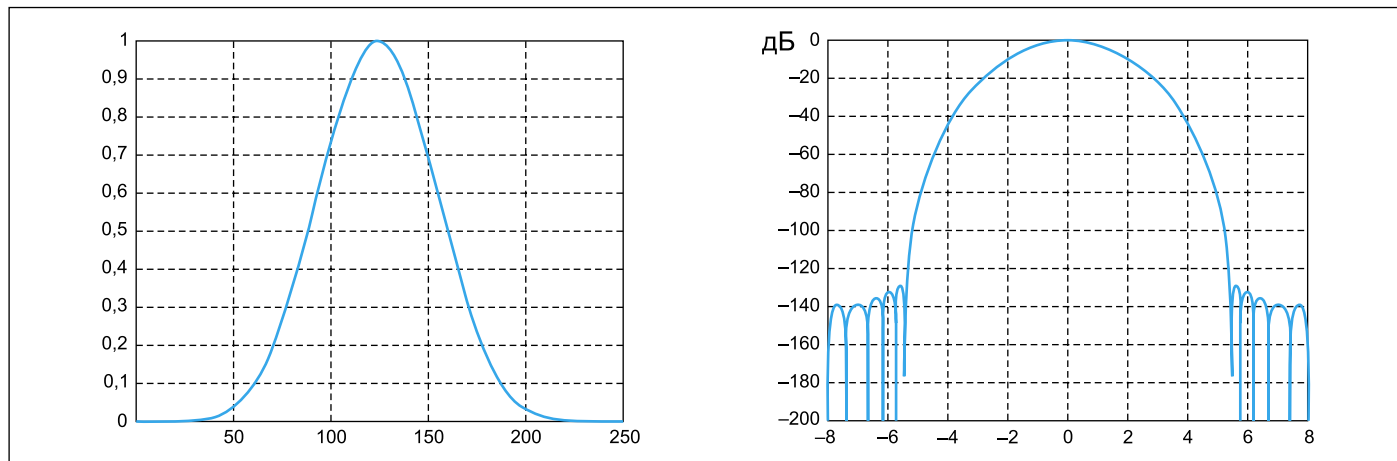


Рис. 18. Пример окна Кайзера в линейном и логарифмическом масштабах по вертикали

В таблице 3 приведены параметры возможных типов окон, применяемых при проведении спектрального анализа с помощью осциллографов — анализаторов спектра MDO4000.

Возможность построения спектрограмм

Одним из мощных средств исследования спектров являются спектрограммы. Они строятся в плоскости время-частота с представлением уровня спектра цветом. Для этого используется быстрое оконное преобразование Фурье. Этот вид спектрального анализа обычно недоступен для простых анализаторов спектра. Но в MDO4000 он введен (рис. 20).

При необходимости окно спектрограммы может быть расширено и выведено одновре-

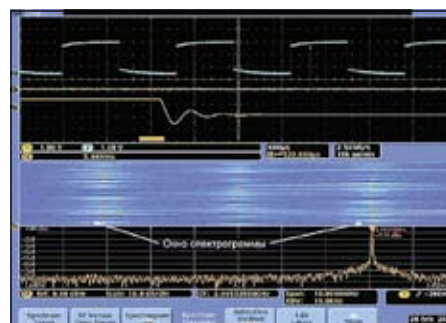


Рис. 20. Пример вывода окна спектрограммы

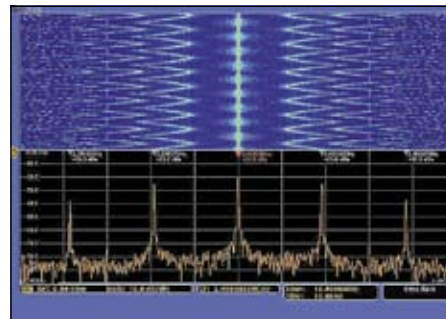


Рис. 21. Окна спектрограммы (сверху) и спектра (снизу)

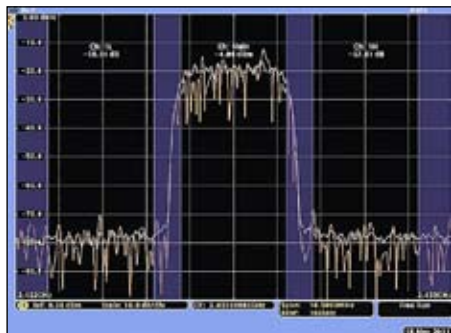


Рис. 22. Пример просмотра спектра в отдельном канале многоканальной системы

менно с заданным участком спектра. Такой случай показан на рис. 21.

Просмотр спектра каналов в многоканальных системах

Нельзя не упомянуть еще одну важную возможность анализатора спектра осциллографов MDO4000 — просмотр спектров отдельных каналов в многоканальных системах связи. Ограничимся примером, представленным на рис. 22. Здесь показаны спектры в трех каналах — среднем с большим уровнем сигнала и соседних с малым уровнем сигнала.

Для повышения точности спектрального анализа в многоканальных системах также используется усреднение множества спектров. Спектр, построенный с усреднением, на рис. 22 представлен белой кривой.

Применение шумоподавления

Осциллограф DMO позволяет наблюдать разнообразные временные зависимости, например амплитуды (сноска 1 на рис. 23), частоты (сноска 2 на рис. 23) и фазы (сноска 3 на рис. 23). Некоторые из них сильно

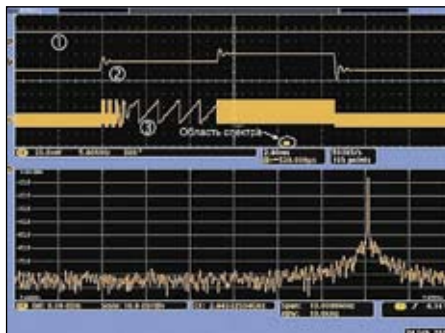


Рис. 23. Наблюдение разных временных зависимостей и спектра сигнала на входе RF

засорены шумами, например, это характерно для зависимости фазы от времени (рис. 23). Шумы приводят к тому, что некоторые зависимости могут содержать хаотические участки, которые желательно убрать. Это особенно характерно для зависимостей фазы от частоты. Для выделения нужных зависимостей и удаления ненужных предусмотрена операция выделения нужного участка зависимостей и подавления шумов вне этого участка (рис. 24).

Заключение

Осциллографы серии MDO4000 компании Tektronix — первые в мире комбинированные приборы, объединившие в себе функции обычных цифровых запоминающих осциллографов, анализаторов цифровых и логических сигналов и анализаторов спектра радиочастот. О новизне разработки говорит подача 26 патентов, которые в настоящее время находятся на рассмотрении. Новые приборы имеют обширные области применения, в частности, позволяют исследовать сложные системы с различными видами сигналов, коррелированными во времени [4]. ■

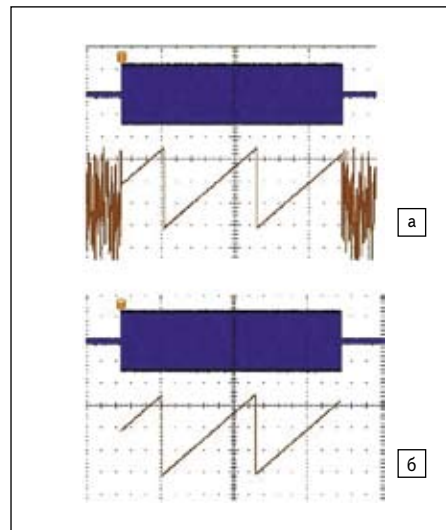


Рис. 24. Пример выделения участка зависимости фазы от времени и подавления шума за пределами выделенного участка:
а) шумоподавление отключено;
б) шумоподавление включено

Литература

1. Дьяконов В. П. Осциллографы компании Tektronix с закрытой архитектурой // Компоненты и технологии. 2009. № 12. 2010. № 1.
2. Fundamentals of the MDO4000 Series Mixed Domain Oscilloscope. Application Note. Tektronix, 2011.
3. Серия MDO4000. Осциллографы для смешанных типов сигналов. Руководство по эксплуатации. Tektronix, 2011.
4. Афонский В. П., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК-Пресс, 2011.
5. Афонский В. П., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: ДМК-Пресс, 2011.