

## Ликбез по массовым цифровым анализаторам спектра радиочастот

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

Еще недавно анализаторы спектра были редкими и дорогими приборами, и они встречались лишь в отдельных элитных лабораториях. Но в наше время частотный анализ современных телекоммуникационных устройств, например, сотовой связи, контроль радиопередающих станций, оценка электромагнитной обстановки и т. д., стали настолько актуальными и массовыми задачами, что в ряде радиотехнических лабораторий анализаторов спектра стало даже больше, чем электронных осциллографов, исследующих сигналы во временной области. Однако большинство радиоинженеров все еще мало знакомы с новым классом измерительных приборов — цифровыми анализаторами спектра радиочастот и работой с ними. Статья восполняет этот пробел.

### Внешний вид массовых анализаторов спектра радиочастот

Сразу стоит отметить, что анализаторов спектра существует великое множество — от простых анализаторов спектра промышленной сети переменного тока с набором резонирующих на ее гармониках пластинок с электромагнитами до сложнейших анализаторов тонкого спектра звуковых сигналов и миллиметровых волн с частотами до 300 ГГц и выше [1, 2]. В статье рассматриваются массовые и относительно дешевые (тысячи \$) «бюджетные» анализаторы спектра радиочастот с верхними исследуемыми частотами до 2–6 ГГц. Ныне именно эти прибо-

ры (рис. 1) широко используются при отладке современных беспроводных систем связи Bluetooth, WiFi, WiMax и аппаратуры сотовой телефонии, при разработке систем частотной идентификации объектов, оценке состояния эфира, отладке сотовых и спутниковых систем связи и телевидения, проверке электромагнитной совместимости и состояния эфира и т. д., и т. п. [4].

Первые две модели (АКТАКОМ АКС-1301/1601 и АК ИП 4201/4202) похожи друг на друга как две капли воды. И это неслучайно: их основой являются приборы южнокорейской фирмы ED Co. Анализатор R&S FS300/315 — это настольный прибор с воз-

можностью автономного питания. Из-за малых размеров он имеет маленький дисплей с невысоким разрешением. А новейшие DSA 1020/1030 стали успешным прорывом на рынках анализаторов спектра преуспевающей китайской компании RIGOL. Близки к ним и анализаторы спектра фирм LG (серия SA-9\*\*) и GW Instek (серия GSP-8\*\*). Подобные анализаторы (как правило, более дорогие) выпускают и другие фирмы, например Agilent Technologies (серия E4\*\*\*A). К отдельному классу приборов относятся и дорогие анализаторы спектра реального времени корпорации Tektronix. Почти все примеры использования анализаторов спектра, описанные в данной статье, вполне применимы и для них.

### Принципы построения анализаторов спектра радиочастот

Большинство анализаторов спектра построено по принципу работы супергетеродинного радиоприемника (рис. 2). От радиоприемника анализатор спектра отличается, прежде всего, автоматической перестройкой частоты гетеродина и графическим построением спектра — зависимости уровня напряжения или мощности сигнала от частоты в определенном диапазоне ее изменения.

Известно, что с учетом высших гармоник смесителя и гетеродина имеет место следующее соотношение частот у супергетеродинного радиоприемника:

$$f_{\Pi} = |mf_{\Gamma} \pm nf_{\text{вх}}|, \quad (1)$$

где  $f_{\Gamma}$  — частота гетеродина,  $f_{\text{вх}}$  — частота входного сигнала,  $f_{\Pi}$  — промежуточная частота (ПЧ);  $m$  и  $n$  — целые числа 1, 2, 4 и т. д.



Рис. 1. Внешний вид анализаторов спектра

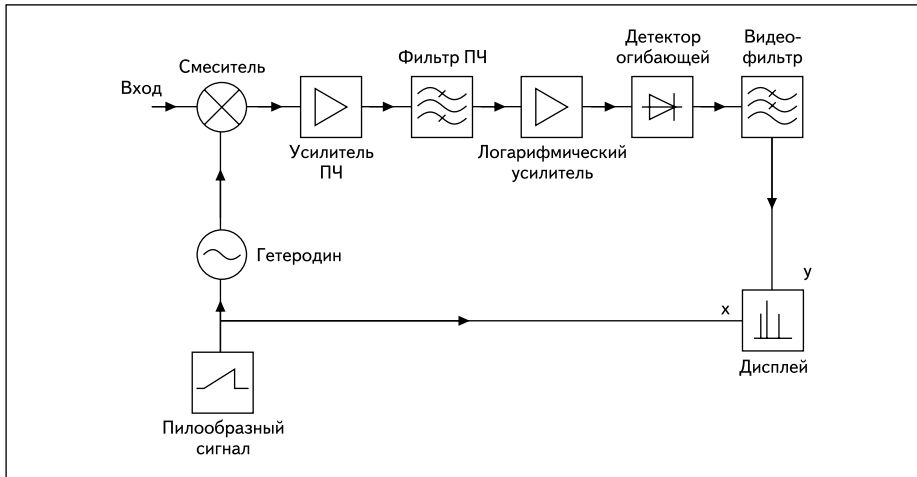


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема аналогового анализатора спектра на основе супергетеродинного радиоприемника с одним преобразованием

Меняя частоту гетеродина, можно изменять частоту приема при постоянной ПЧ. Если использовать только первые (фундаментальные) гармоники смесителя и сигнала гетеродина, то при  $f_n = \text{const}$  для входной частоты (1) можно получить:

$$f_{\text{вх}} = |f_{\text{г}} \pm f_{\text{п}}|. \quad (2)$$

Постоянство ПЧ означает, что можно построить высокочувствительный усилитель промежуточной частоты с заданной высокой избирательностью, одинаковой для всех значений  $f_{\text{вх}}$ .

Получение правильного спектра осложняется рядом обстоятельств. Диапазон частот сигнала у современных анализаторов спектра очень широк: у всех описанных ниже приборов он лежит в пределах от 9 кГц до 3–6 ГГц. Перекрыть непрерывно такой диапазон частот при одном преобразовании невозможно. Из формулы (2) следует, что супергетеродин имеет минимум два канала приема — один основной, а другой зеркальный. А если учесть нелинейность смесителя и гармоники гетеродина, то их будет куда больше — в соответствии с (1).

Эти проблемы удалось решить, применяя ПЧ, более высокую, чем максимальная рабочая частота анализатора. В результате зеркальная частота оказывается далеко за пределами рабочего диапазона частот, и ее легко обработать не очень сложным фильтром нижних частот. Резко сокращается кратность частот гетеродина. Так, при  $f_n = 3,476$  ГГц для получения  $f_0$  от 0 до 3 ГГц нужно использовать гетеродин с перестраиваемой частотой от 3,476 до 6,476 ГГц, то есть с кратностью частот меньше 2.

Но усилитель с высокой ПЧ трудно сделать с высокой избирательностью. А она нужна для четкого выделения линий спектра, в частности гармоник сигнала. Поэтому для повышения избирательности анализатора спектра применяется двойное и даже тройное пре-

образование частоты. Например, при двойном преобразовании для ПЧ1 применяется не перестраиваемый фильтр, а фильтры ПЧ2 делаются узкополосными, и они формируют вид пиков спектра на экране. Подавление паразитных каналов приема решается тщательным экранированием узлов анализатора.

В усилителе последней ПЧ (обычно логарифмическом) применяются фильтры с заданной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и заданной полосой частот BW (Band Wide). После фильтрации сигнал последней ПЧ подается на набор детекторов, выделяется его огибающая, уровень которой пропорционален логарифму амплитуды входного сигнала, его среднего значения или иному амплитудному значению сигнала. Логарифмический масштаб анализатора по вертикали позволяет выводить спектры в очень широком диапазоне амплитуд входных сигналов.

Высокочастотные составляющие сигнала после детектора и шумы ослабляются фильтрами видеочастоты (VBW), после чего сигнал с их выхода подается на канал вертикального отклонения индикатора (электронно-

лучевой трубки или жидкокристаллического). Генератор пилообразного напряжения осуществляет развертку индикатора по горизонтали и одновременно перестройку гетеродина и, соответственно, частоты входного сигнала. Так, в принципе получается график спектра сигнала в виде функции уровня сигнала от частоты. При этом вместо вертикальных линий дискретного спектра периодического сигнала [2, 3] анализаторы дают набор пиков, ширина которых зависит от вида АЧХ и BW фильтров в тракте последней ПЧ. Обычно форма АЧХ близка к Гауссовой кривой, что обеспечивает малое время переходных процессов при изменении частоты.

Аналоговый гетеродин (особенно с широкой перестройкой частоты) имеет низкую стабильность частоты [5]. Современный анализатор спектра должен измерять частоты с малой погрешностью, сравнимой с погрешностью цифрового частотомера (порядка  $10^{-6}$ – $10^{-5}$ ), и обеспечивать такую погрешность без подстройки в течение года. Это было реализовано применением в качестве гетеродина цифрового синтезатора частот на основе делителей частоты и схемы фазовой автоподстройки частоты. Генератор пилообразного напряжения был заменен цифровой схемой подсчета импульсов опорного генератора. На этих принципах строятся цифровые анализаторы спектра.

Наконец, есть еще одна, по сей день не вполне решенная проблема. Это получение высокой скорости построения графика спектра. Особенно она существенна при использовании аналоговых фильтров в тракте ПЧ. Они сильно искажают быстро меняющийся по частоте сигнал. В современных анализаторах спектра эта и сопутствующие ей проблемы (например, точное детектирование и ослабление шума) решаются переходом на цифровые методы обработки сигналов в тракте последней ПЧ. Для этого применяются цифровые фильтры и цифровые детекторы. Полная функциональная схема типичного анализатора спектра на диапазон частот от 9 кГц до 3 ГГц (с расширением

Таблица 1. Основные параметры бюджетных цифровых анализаторов спектра

Тип анализатора спектра	АКТАКОМ АКС 1301/1601	АКИП-4201/4202	RIGOL DSA 1020/1030	R&S FS300/315
Частотный диапазон	9 кГц – 3–6 ГГц	9 кГц – 3–6 ГГц	9 кГц – 2–3 ГГц	9 кГц – 2–3 ГГц
Полоса обзора (Span)	0–100 Гц/дел – 300 МГц/дел	0–100 Гц/дел – 300 МГц/дел	0–100 Гц – 300 МГц/дел	0–100 Гц – 300 МГц/дел
Полоса частот ПЧ (RBW)	0,3, 1 кГц, ..., 3 МГц	0,3, 1 кГц, ..., 3 МГц	10 Гц – 1 МГц (шаг 1, 2, 5)	0,2, 0,5, 1 кГц, ..., 1–20 МГц
ЭМФ в тракте ПЧ	9 кГц/120 кГц	9 кГц/120 кГц	–	–
Полоса видео частот (VBW)	10 Гц – 3 МГц (шаг 1, 3, ...)	10 Гц – 3 МГц (шаг 1, 3, ...)	1 Гц – 3 МГц (шаг 1, 2, 5)	10 Гц – 1/20 МГц (шаг 1, 2, 5)
Амплитуда сигнала, дБмВт	–(130–105)...+20	–105...+20	–148...+30	–110...+35
Предусилитель	Есть/нет	Нет	Опция	Нет
Время сканирования	100 мс – 1000 с	100 мс – 1000 с	10 мс – 3000 с	30 мс – 1000 с
Разрешение дисплея (пикс.)	640×480	640×480	800×480	320×240
Интерфейсы	USB, RS-232, Centronix, LAN (опция – GPIB)	USB, RS-232, Centronix, (опция – GPIB, LAN)	USB, RS-232, LAN (опция – GPIB, LAN)	USB, RS-232, Centronix, (опция – GPIB, LAN)
USB-управление	Нет	Нет	Есть	Есть
Габариты, мм	175×350×195	175×350×195	399×223×159	219×147×350
Масса, кг	9,4	9,4	6,2–7,4	8,5–9
Потребляемая мощность, Вт	80	80	35–60	45–60
Питание от аккумулятора	Нет	Нет	Есть	Нет
Трекинг-генератор	Есть/нет	Есть/нет	Есть	Нет/есть

до 7 ГГц за счет еще одного преобразования частоты) довольно сложна и приведена в [5].

Шум в анализаторах спектра, как и в супергетеродинных радиоприемниках, определяется, в основном, усилителем до первого смесителя. Он задает средний отображаемый уровень шума DANL (Displayed Average Noise Level). DANL доведен до  $-(110-150)$  дБмВт. Меньшие уровни DANL характерны для анализаторов, использующих дополнительный предварительный малошумящий усилитель.

### Параметры массовых анализаторов спектра

В результате оценок типовых областей применения анализаторов спектра радиочастот [4] было выявлено, что верхняя граница исследуемых частот должна составлять примерно 2–3 ГГц. Это на порядок выше, чем у массовых осциллографов. Осциллографы с такой граничной частотой чрезвычайно дорогие и далеко не массовые приборы: их стоимость заметно выше \$20 000. Низкочастотная граница у анализаторов спектра рассматриваемой группы обычно составляет 9 кГц, что позволяет охватить даже высокочастотную часть звукового диапазона частот (до 20 кГц). Но искажения в этой области все же велики и требуют оценки.

В таблице 1 приведены основные параметры анализаторов данной группы (4 серии прибора и 8 разновидностей моделей). Близость технических характеристик приборов налицо. Это следствие применения унифицированной элементной базы. Унифицирован также интерфейс пользователя приборов.

Анализаторы спектра АКТАКОМ АКС1301/1601 и АКИП 4201/4202 имеют гетеродин на основе цифрового синтеза частот, перестраиваемый с шагом в 1 Гц. В них входит генератор опорной частоты (10 МГц) с малой нестабильностью, нормированной на уровне  $\pm 1 \times 10^{-6}$  и типичной до  $\pm 0,5 \times 10^{-6}$ . Полосы пропускания фильтров ПЧ — от 1 кГц до 3 МГц. В последних моделях введен фильтр ПЧ с полосой 300 Гц, некоторые модели (например, АКТАКОМ) поставляются с электромеханическими фильтрами (ЭМФ) с полосами пропускания 9 и 120 кГц, принятыми в радиовещательной аппаратуре. Диапазон входных уровней сигнала — от  $-105$  до 20 дБмВт. Модель АКС 1301 имеет встроенный предварительный усилитель с коэффициентом усиления 20 дБ, что снижает уровень исследуемых сигналов примерно до  $-130$  дБмВт. Есть в ней и опция трекинг-генератора.

Цветной дисплей этих приборов жидкокристаллический с довольно высоким разрешением —  $640 \times 480$  пикселей и размером по диагонали 14 см. Он дает четкое изображение, как линий спектра, так и элементов интерфейса (прежде всего меню) и информационных надписей на экране. Малым ве-

сом приборы не отличаются: их масса около 10 кг. К недостаткам приборов можно отнести и ограниченные возможности USB-порта на передней панели: он допускает подключение только модулей флэш-памяти и USB-принтеров. Зато есть привычные порты — параллельный Centronix и последовательный RS-232. Последний, как и порт локальной сети LAN, можно использовать для управления прибором от ПК. Опционально поставляется и модуль приборного порта GPIB. У приборов под торговой маркой АКТАКОМ сетевой порт уже встроено.

Новейшие анализаторы спектра DSA1020/1030 выпускает китайская компания RIGOL. Ее массовые (бюджетные) осциллографы давно известны и популярны, они выпускаются даже под маркой такой крупной фирмы, как Agilent Technologies (США). Хотя «начинка» анализаторов спектра фирмы RIGOL практически та же, что у указанных выше приборов, есть ряд интересных особенностей их.

Улучшенные характеристики DSA1020/1030 достигнуты во многом благодаря применению современного процессора Blackfin фирмы Analog Devices и хорошей проработке прибора в целом. Процессор Blackfin обладает хорошим соотношением цена/качество, высоким энергопотреблением и богатым набором инструментов и приложений для разработки.

Цветной 8,5-дюймовый широкоформатный ЖК-дисплей DSA1030A имеет самое высокое разрешение ( $800 \times 480$  пикселей), что дает высококачественное отображение спектров. Приборы имеют удобный интуитивный графический интерфейс и опции для связи с ПК: LAN/USB-хост, USB-устройство. При этом порт USB-устройства можно использовать для связи с ПК и полноценного управления прибором от него. VGA-выход и опция приборного порта GPIB дополняют возможности этого анализатора спектра.

Этот прибор — самый легкий из упомянутых. Он позволяет использовать встроенную литиевую аккумуляторную батарею для автономного питания с временем работы до 3 часов. Компактная и прочная конструкция корпуса прибора позволяет легко его переносить. Он имеет встроенную энергонезависимую память, в которой возможно хранение данных непосредственно и в USB-модуле флэш-памяти.

Линейка анализаторов спектра RIGOL представлена тремя моделями: DSA1020, DSA1030, DSA1030A, которые различаются рабочим диапазоном частот, наличием (индекс А) или отсутствием предусилителя и, соответственно, уровнем собственных шумов. Фильтрация у этих анализаторов имеет характеристики вполне на уровне анализаторов спектра более высокого класса. Однако узкие полосы ПЧ (от 1 до 300 Гц) при исследовании радиочастот, как правило, применять непрактично, так как время построения спектра становится очень большим, достигая многих сотен секунд. Стабильностью частоты опорного гене-

ратора эти приборы не блещут (она составляет  $3 \times 10^{-6}$  в год).

Минимальный уровень собственных шумов (DANL) для DSA1020, DSA1030 (без предусилителя)  $-130$  дБм, а для DSA1030A (с предусилителем)  $-148$  дБм. Это рекордные показатели для данного класса анализаторов, как и широкий амплитудный диапазон: от DANL...+30 дБм. Высокое значение этого параметра означает, что к входу анализатора можно подключать напрямую сотовые телефоны с передатчиками мощностью до 2 Вт.

Имея улучшенные характеристики (хотя и не все), анализаторы фирмы RIGOL по стоимости занимают среднее положение между относительно дешевыми приборами АКТАКОМ и АКИП и подобными по характеристикам анализаторами спектра ведущих фирм Agilent Technologies, Tektronix, R&S и др.

Все анализаторы имеют три режима запуска: свободный, видео, внешний. Но режимы детектирования различны:

- Normal — обычный детектор.
- Positive-peak — пиковый на положительный пик.
- Negative-peak — пиковый на отрицательный пик.
- Sample — детектор выборок.
- RMS — среднеквадратический детектор.
- Voltage Average — детектор с усреднением по заданному числу отсчетов.

Из типовых функции измерений у анализаторов можно отметить следующие:

- Мощность во временном интервале.
- Мощность канала.
- Мощность в соседних каналах.
- Ширина занимаемой полосы пропускания.
- Отношение уровня несущей частоты к шуму.
- Гармоническое искажение.
- Интермодуляционное искажение.
- Подсчет частот.
- Количество измерительных точек (N), дБ.
- Маркер шумов и т. д.

Функции выбора предварительной установки позволяют быстро и легко вернуть предыдущие настройки измерений: пользовательские или заводские параметры настройки.

### Начало работы с массовым анализатором спектра

В большинстве статей и книг по анализаторам спектра (увы, их очень мало) пользователю предлагается сразу начать работу с прибором. Дескать, смотрите, как это просто: нажал кнопку *Autoset* и сразу получил спектр сигнала от подключенного к его входу генератора. Нередко такое испытание оканчивается не только первым, но и последним перед отправкой прибора в ремонт и выговором от начальства.

Начать работу с прибором нужно с детального изучения описания к прибору — если оно, конечно, есть. За основу описанной

ниже работы возьмем анализаторы спектра российских торговых марок АКТАКОМ и АК ИП как самых дешевых и достаточно мощных профессиональных приборов.

Прежде чем выполнить включение прибора, стоит установить на его входе адаптер с разделительным конденсатором, чтобы не повредить анализатор при подаче на вход сигнала с постоянной составляющей. Полезно установить на вход и аттенюатор на  $-20$  дБ, что частично защитит прибор от случайной подачи сигнала от генератора: многие генераторы развивают на выходе напряжение, на порядок превышающее допустимое для входа анализатора спектра.

Подключив к анализатору кабель питания и проверив заземление прибора (от розетки или с помощью зажима заземления), можно спокойно включить прибор выключателем на задней стенке прибора. Он включает спящий режим прибора (загорается красный индикатор на передней панели у кнопки **Power** в нижнем левом углу). Нажав эту кнопку, можно перевести прибор в рабочий режим: загорается зеленый индикатор. На экране появится заставка прибора, которая продемонстрирует наличие используемых опций и фильтров. Можно задать перезагрузку прибора (**Preset**) при каждом включении. Примерно через 1–2 минуты экран анализатора приобретет рабочий вид, показанный на рис. 3. Перед работой рекомендуется прогреть прибор в течение 15–20 минут.

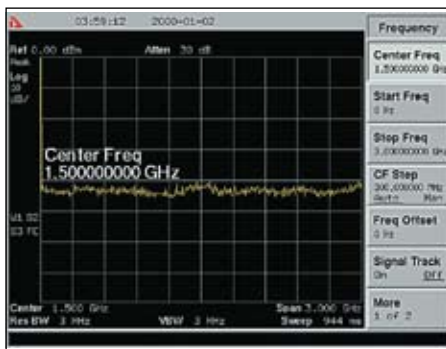


Рис. 3. Экран анализатора спектра АКТАКОМ АКС-1301 после включения

Для выключения прибора с переходом в спящий режим (с сохранением настроек) нужно нажать кнопку **Power** на передней панели и удерживать ее до загорания индикатора красного цвета (индикатор зеленого цвета при этом гаснет). Для полного выключения используется выключатель на задней стенке прибора, при этом настройки и установки прибора теряются.

### Системные установки анализатора спектра

В принципе, после включения с прибором можно начинать работу. Но не будем спешить и ознакомимся с некоторыми систем-

ными возможностями анализатора спектра. Если прибор ранее использовался, его стоит привести в начальное состояние, нажав кнопку **Preset** в группе кнопок **System** передней панели (средняя группа в правой части передней панели). Будет получено показанное на рис. 3 изображение экрана. Его нужно внимательно изучить.

Справа от рабочего окна экрана видно меню, управляемое кнопками, которые находятся напротив его позиций. Сверху, слева и снизу видны информационные записи о рабочих установках прибора. Их смысл будет понятен немного позже. Отметим лишь, что при ручной установке какого-либо параметра перед его обозначением помещается символ #. Последняя установка отмечена на экране надписью крупными белыми буквами. Пока обратите внимание на желтую линию спектра. Она содержит две части — почти вертикальную линию (нерабочая часть спектра в области частот менее 9 кГц) и широкую горизонтальную шумовую дорожку. Линия спектра строится бегущей маленькой птичкой белого цвета. По умолчанию анализатор готов отразить максимально широкий спектр. Он имеет полосу частот 3 ГГц и центральную частоту 1,5 ГГц, то есть перекрывает область частот от 0 до 3 ГГц.

Нажмите кнопку **System** и в меню в правой части экрана выберите позицию **Show System** («Показать данные о системе»). Будет выведено окно с данными о системе (рис. 4). Из него можно узнать серийный номер прибора, состав его частей и опций. Например, можно узнать, что данный экземпляр прибора имеет опции локальной сети LAN и трекинг-генератора TRK и что у него отсутствуют опции приборного порта GPIB и генератора CDMA.

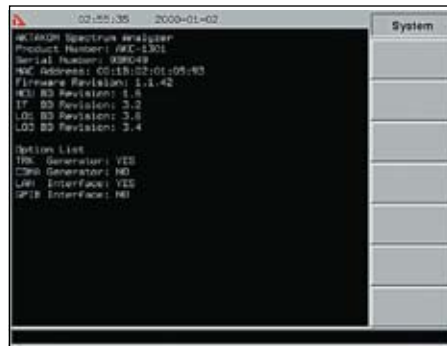


Рис. 4. Окно с данными о системе анализатора

Нажав кнопку **Return**, можно вернуться к прежнему окну (рис. 3). Теперь обратите внимание на самую верхнюю светлую строку экрана: в ней должны отображаться данные о текущих дате и времени.

Установка даты и времени очень проста. Допустим, нужно установить дату. Выберите позицию меню **Time/Date** (рис. 5) и затем снова **Time/Date**: внизу этой позиции подчеркивание перейдет от надписи **Off** (вывод отключен) к надписи **On** (вывод включен).

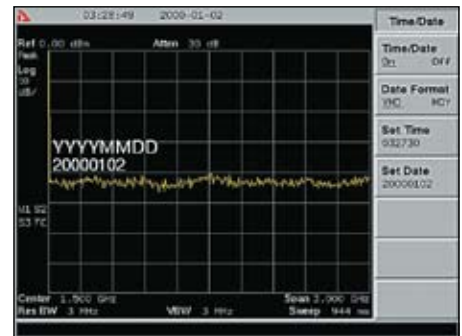


Рис. 5. Установка текущей даты

Установите формат даты **YMD** (год – месяц – день) или **MDY** (месяц – день – год) и активизируйте позицию меню **Set Date** («Установка даты»). На экране появится выбранный формат даты и установленная дата. Ее можно сменить, набрав нужную запись на цифровых клавишах (слева от большой поворотной ручки). Набираемые данные отображаются на экране крупным шрифтом.

Нажав кнопку **Return**, вернитесь к меню **System**. Аналогично установите текущее время, используя в подменю **Time/Date** позицию **Set Time** («Установить время»). Учтите, что при рестарте анализатора происходит сброс установленных значений даты и времени. При этом созданные файлы будут начинаться с января 2000 г. Установив в позиции **Time/Date** команду **Off**, можно вообще отключить вывод даты и времени.

Теперь следует разобраться с использованием файловой системы прибора и его памяти. Для этого, нажав кнопку **File**, выведем меню этих операций (рис. 6).

Оно имеет следующие позиции и возможности:

- **Save** — управление записью файлов.
- **Load** — управление загрузкой файлов.
- **Delete** — стирание файлов.
- **Copy** — копирование файлов из одной директории в другую.
- **Rename** — переименование файлов.
- **Create Dir** — создание новой директории.

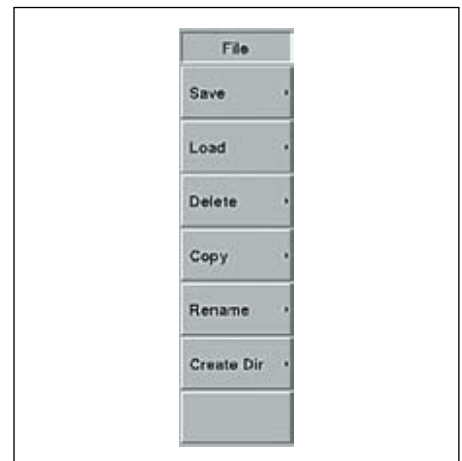


Рис. 6. Меню файловых операций File

В наше время эти возможности прекрасно известны любому пользователю ПК и в особом описании не нуждаются. Поэтому остановимся на управлении записью файлов. Она возможна в заранее созданную анализатором директорию screen. Если к USB-порту на передней панели подключен модуль флэш-памяти, то подменю **Save** выводит экран с перечнем директорий:

- **screen** — запись во встроенную память;
- **usb-storage** — запись во внешнюю флэш-память.

С помощью кнопок ▲ и ▼ над поворотной ручкой можно перемещать выделение по этим и другим директориям и установить его на нужную директорию. Аналогично можно просмотреть директории на флэш-модуле памяти и выбрать директорию для записи своих файлов. Выбор директории фиксируется нажатием кнопки **Return**. Активизируя подменю **Save**, можно получить подменю с рядом команд записи файлов:

- **Save Now** — новая запись.
- **Type** — выбор типа файла (**Screen** — копия экрана, **State** — установки анализатора, **Trace** — линия спектра).
- **Format** — выбор формата (для копии экрана GIF или обратный GIF, для спектров Trace+State или CSV).
- **Source** — выбор источника спектральной линии.
- **Name** — задание имени с помощью простого редактора.
- **Update List** — обновление листа файлов.
- **Dir Select** — выбор директории для записи и считывания файлов.

Эти операции также вполне очевидны. Для записи файла, помимо команды **Save Now**, можно использовать кнопку **Save** в группе кнопок **System**. Полное имя файла (с указанием директории) выводится в статусной строке на экране снизу. На время записи построение текущего спектра приостанавливается и затем автоматически возобновляется.

Анализатор позволяет распечатать изображение на экране принтером, подключаемым к принтерному порту Ethernet, или

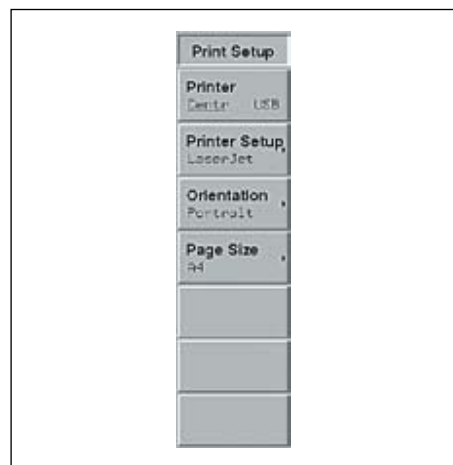


Рис. 7. Подменю установок принтера Print Setup

USB. Для этого прежде всего нужно установить настройку на принтер, нажав кнопку **Print Setup**. Появится подменю, показанное на рис. 7.

Это подменю имеет следующие позиции:

- **Printer** — выбор порта принтера (Cent — параллельный или USB).
- **Printer Setup** — выбор из списка используемой модели принтера.
- **Orientation** — ориентация страницы печати.
- **Page Size** — размер страницы (A3, A4 и т. д.).

После этих установок для печати содержимого экрана достаточно нажать кнопку **Print** в группе кнопок **System**.

### Установка основных параметров частоты, полосы обзора и амплитуды

Теперь мы готовы к осмысленному применению анализатора спектра по его прямому назначению. Есть три основные группы параметров, которые задаются при спектральном анализе:

- **Frequency** — частотные параметры.
- **Span** — полоса частот обзора.
- **Amplitude** — амплитудные параметры.

Их меню выводится при нажатии соответствующих кнопок, выделенных только прямоугольником из тонких черных линий. При нажатии кнопки **Frequency** появляется подменю частотных установок, показанное на рис. 3. Область исследуемых частот в современных анализаторах спектра задается двумя способами: автоматически (например, при нажатии кнопки автоустановки **Autoset** в группе кнопок контроля **Control**) и вручную. Ручная установка задается:

- Вводом начальной и конечной частот, при этом центральная частота автоматически принимается равной их полусумме.
- Заданием центральной частоты и полосы обзора, при этом начальная и конечная частоты устанавливаются автоматически как  $\text{Center Freq} \pm \text{Span}/2$ .

### Контроль спектра опорного генератора

Для последующей работы целесообразно рассмотреть спектр синусоидального сигнала. Если под рукой нет генератора синусоидальных сигналов (например, при покупке анализатора спектра), то можно воспользоваться сигналом опорного генератора с частотой 10 МГц. Его сигнал выведен на коаксиальный разъем типа N на задней стенке прибора. Подключите вход анализатора к этому разъему подходящим кабелем. Сигнал опорного генератора по уровню меньше допустимого, и такое соединение безопасно. Теперь нажмите кнопку автоматической установки **Autoset** и дождитесь проведения этой установки анализатором в течение нескольких секунд.

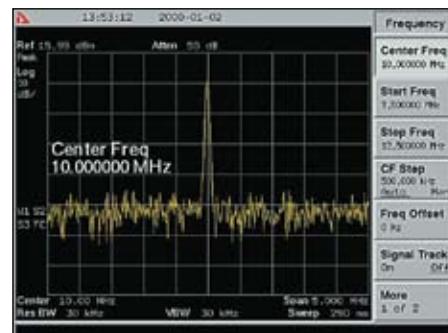


Рис. 8. Спектр сигнала от опорного генератора, полученный автоматически, и меню установок частоты Frequency

Экран примет вид, показанный на рис. 8. На нем виден реальный спектр синусоидального сигнала в виде достаточно острого пика в самом центре экрана.

Теоретически такой спектр имеет вид отрезка вертикальной прямой, но, как отмечалось, в реальности он выглядит, как пик конечной ширины. Пик посажен на шумовую дорожку, которую анализатор воспроизводит, будучи очень чувствительным прибором. Благодаря логарифмическому масштабу по вертикали шум хорошо заметен на экране внизу и практически совсем не заметен в верхней части экрана, где отображаются вершины пиков. Но он все же может вызвать небольшую нестабильность вершин пиков и погрешность измерения их уровней.

Обратите внимание на то, что при автоматической настройке параметры Center Freq и Span резко изменились. Они оказались равными 10 (примерно) и 5 МГц соответственно (против изначальных 1,5 и 3 ГГц). Это и есть главный результат автоматической установки. Внимательный читатель заметит и другие изменения параметров, в частности полос RBW и VBW.

Специалиста спектр на рис. 8 должен насторожить. Дело в том, что автоматически центральная полоса и полоса обзора оказались выбранными так, что регистрируется только первая гармоника сигнала. Высшие гармоники с частотами 20, 30 МГц и т. д., даже если они есть, не попадают в автоматически установленную полосу частот от 5 до 15 МГц и потому на рис. 8 не отображаются.

На этом рисунке видно меню частоты **Frequency** с активной позицией **Center Freq**. Попробуем изменить эту частоту, сделав ее равной 8 МГц. Для этого достаточно ввести новое значение частоты, нажав цифровую клавишу 8. Вид экрана изменится на показанный на рис. 9. Тут видны два изменения: изменилась надпись **Center Freq** (появилось значение 8) и изменилось меню в правой части экрана — оно сменилось на меню **Units** («Единицы измерения»). В этом меню можно выбрать единицы измерения частоты: GHz (ГГц), MHz (МГц), kHz (кГц) и Hz (Гц). В нашем случае активизируем позицию MHz

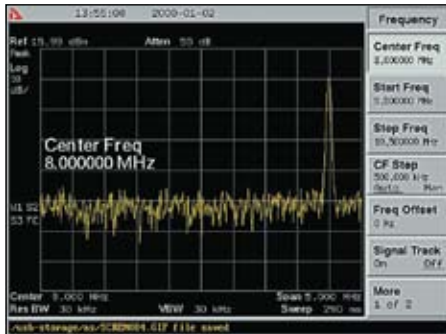


Рис. 9. Спектр сигнала от опорного генератора после изменения центральной частоты

и тут же увидим новый спектр, показанный на рис. 9. Как и следовало ожидать, пик спектра сместился вправо относительно новой центральной частоты на 2 МГц (цена деления горизонтальной шкалы  $\text{Span}/10 = 0,5$  МГц).

Вернемся к прежнему значению центральной частоты в 10 МГц, нажав кнопку **Return**, и рассмотрим состав меню **Frequency**:

- **Center Freq** — явная установка центральной частоты.
- **Start Freq** — установка начальной частоты.
- **Stop Freq** — установка конечной частоты.
- **CF Step** — задание шага изменения частоты поворотной ручкой.
- **Freq Offset** — установка сдвига центральной частоты относительно ранее установленного значения.
- **Signal Trace** — включение (**On**) или выключение (**Off**) отображения сигнала.
- **More** — другие специальные установки (здесь не используются).

Если нажать кнопку **Span**, то справа от окна спектра появится меню **Span**:

- **Span** — текущее значение **Span** и его изменение.
- **Full Span** — значение **Span** = 3 ГГц (полная полоса).
- **Zero Span** — значение **Span** = 0 (нулевая полоса).
- **Last Span** — возврат к предыдущему значению **Span**.

В нашем примере значение **Span** автоматически устанавливалось равным 5 МГц. Установим его (аналогично описанной уста-

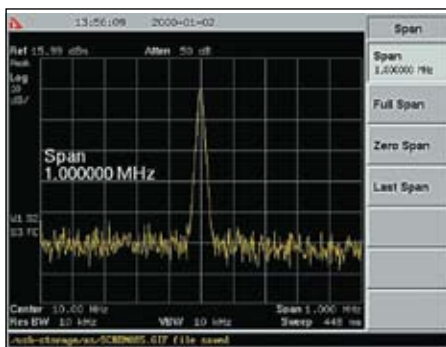


Рис. 10. Спектр сигнала от опорного генератора после изменения центральной частоты

новке центральной частоты) на новое значение — 1 МГц, то есть сузим полосу обзора в пять раз — до  $\pm 0,5$  МГц относительно центральной частоты. Спектр явно изменится, и пик станет менее острым (рис. 10).

Заметьте, что пик расширился по основанию вовсе не в 5 раз, а заметно меньше. Почему? Дело в том, что ширина пика зависит не только от полосы обзора, но и от полосы фильтра ПЧ **Res BW** (или **RBW**). В нашем случае она выбирается автоматически и оказалась разной (рис. 8 и 10: 30 и 10 кГц соответственно).

### Контроль амплитудных параметров

Кнопка **Amplitude** открывает меню контроля амплитудных параметров (рис. 11). Одним из важнейших амплитудных параметров является опорный уровень. Это максимальный уровень сигнала, соответствующий верхней линии шкалы масштабной сетки экрана. Он может устанавливаться в широких пределах.

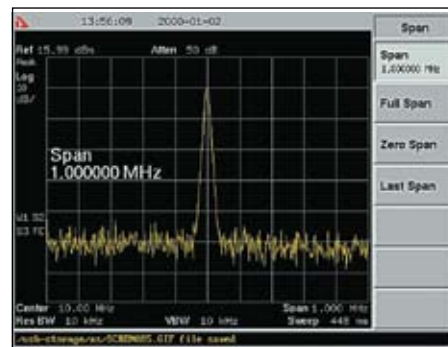


Рис. 11. Меню амплитудных параметров и установка опорного уровня

Меню амплитудных параметров содержит следующие установки:

- **Ref Level** — установка опорного уровня, то есть максимального уровня сигнала, характерного для верха экрана.
- **Attenuation** — установка ослабления аттенюатора на входе анализатора.
- **Scale/Div** — установка масштаба по вертикальной оси.
- **Ref Level Offset** — изменение опорного уровня относительно ранее установленного значения.
- **Y Axis Units** — установка единиц измерения по вертикальной оси (dBm, dBmV, dBuV, V, W).
- **More** — автоматическое (**Auto**) или ручное (**Man**) включение встроенного предварительного усилителя, его включение (**On**) или выключение (**Off**).

Установка опорного уровня и других амплитудных параметров может быть автоматической или ручной. При ручной установке используются цифровые клавиши или поворотная ручка. Если сигнал превышает опорный уровень, то он обрезается и появляется сообщение **IF Overload** (рис. 12). Этот слу-

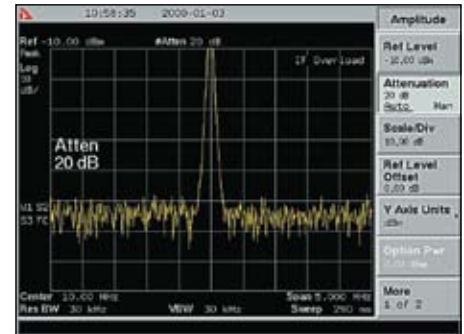


Рис. 12. Пример превышения опорного уровня сигнала и установки ослабления аттенюатора

чай можно устранить смещением опорного уровня или изменением ослабления аттенюатора. Иногда нужно увеличить ослабление аттенюатора.

Амплитудные установки в анализаторе спектра физически означают задание режимов работы смесителя. Их неверный выбор может вызвать сильные нелинейные искажения сигнала и привести к появлению искажений сигнала, в частности, к появлению ложных составляющих спектра.

### Управление фильтрами ПЧ и видеочастоты

Как уже отмечалось, полоса частот фильтра ПЧ **Res BW** (**RBW**) задает ширину спектральных пиков. Чем она уже, тем резче пики и меньше уровень шумов спектра. Управление фильтрами осуществляется из меню **BW/Avg**, вызываемого нажатием кнопки **BW/Avg** из группы кнопок **Control**. Эта кнопка находится в правом верхнем углу передней панели. Установив минимальное значение **RBW** = 300 Гц (у старых моделей оно равно 1 кГц), можно получить спектр, показанный на рис. 13. Спектр разительно изменился: его пик стал очень острым и похож на отрезок вертикальной прямой — почти как предсказанный теоретически спектр синусоиды. Заметно снизился и уровень шума: шумовая дорожка опустилась вниз почти до границы экрана. Но время построения спектра **Sweep** возросло до 44 с. При умень-

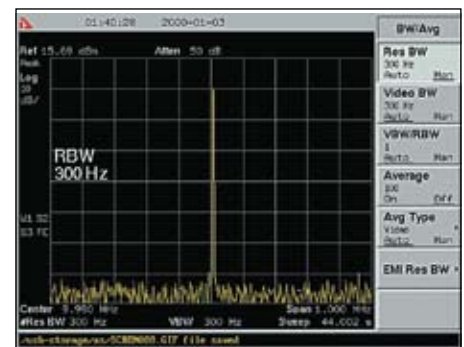


Рис. 13. Спектр сигнала от опорного генератора при выборе **RBW** = **VBW** = 300 Гц

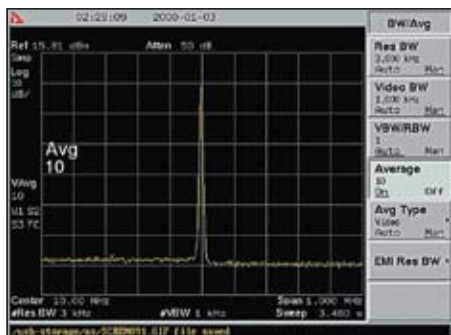


Рис. 14. Спектр сигнала от опорного генератора при выборе  $RBW = VBW = 300$  Гц

шении  $VBW$  (а оно возможно до 10 Гц) время построения спектра доходит до многих сотен секунд, что обычно неприемлемо.

Весьма эффективным методом уменьшения шума является усреднение заданного числа  $n$  спектров (задается командой **Average** — «усреднение»). На рис. 14 показан спектр при выборе  $RBW = VBW = 3$  кГц и **Average** = 10 Гц (усреднение по 10 спектрам). Произошло дальнейшее существенное уменьшение уровня шума, при вполне приемлемом времени построения спектра (менее 4 с на 1 спектр и в 10 раз больше для усредненного спектра). Учтите, однако, что усреднение может привести к большим погрешностям при измерении амплитуды коротких пиков спектра и даже к их исчезновению.

### Выявление гармоник спектра почти синусоидального сигнала

С первого взгляда опорный генератор генерирует синусоидальный сигнал, спектр которого имеет один пик на частоте 10 МГц (рис. 8–11). Да и осциллограмма этого сигнала, снятая цифровым 1-Гц осциллографом DPO4101 (рис. 15), показывает идеально чистую синусоиду.

Но на самом деле сигнал все же имеет отклонения от синусоидальной формы, просто не заметные на глаз. Высокочувствительный анализатор спектра легко выявляет высшие гармоники в спектре сигнала, которые просто невозможно увидеть, рассматривая осциллограмму. И это одно из принципиальных и замечательных достоинств анализаторов спектра.

Выполните установки, показанные на рис. 16, и постарайтесь получить самостоятельно показанный на нем спектр. Обратите внимание на то, что установка центральной частоты на 50 МГц и полосы обзора на 100 МГц делает горизонтальную ось с ценой деления 10 МГц и дает диапазон частот от 0 до 100 МГц. Это позволяет наблюдать первую гармонику (первый большой пик) и до 10 высших гармоник. Отчетливо видны только вторая и третья гармоники. Уровень других оказался на уровне шумов, и они не заметны.

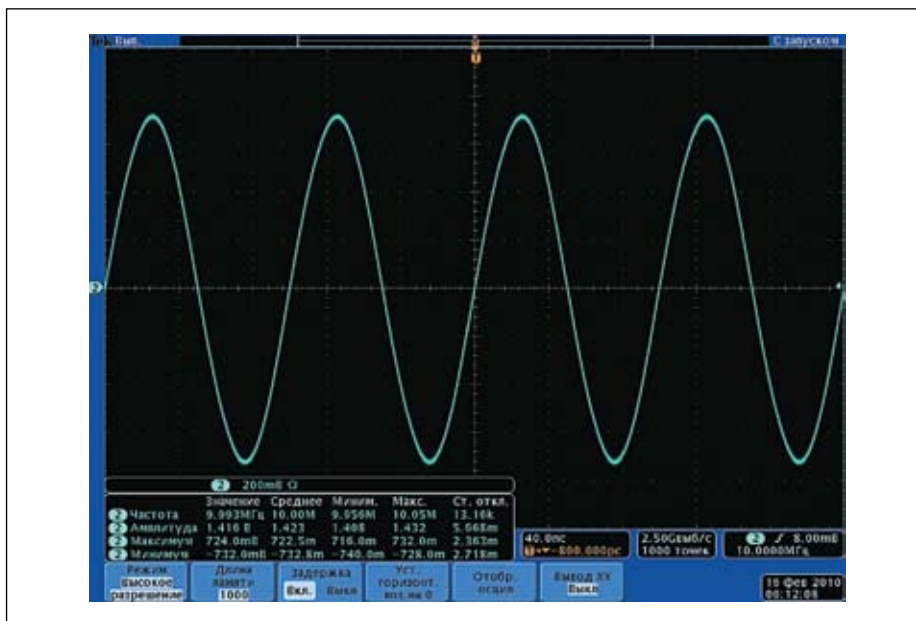


Рис. 15. Осциллограмма сигнала опорного генератора

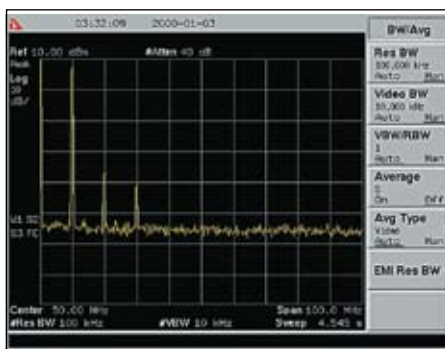


Рис. 16. Пример построения спектра сигнала опорного генератора с гармониками

Радиотракт анализатора спектра линейен только при малых уровнях сигнала. При больших уровнях он проявляет присущую ему нелинейность. Поэтому при больших уровнях сигнала можно обнаружить ложные гармоники, которые присущи сигналу, искаженному самим анализатором. Такое возможно при перегрузке анализатора (рис. 17).

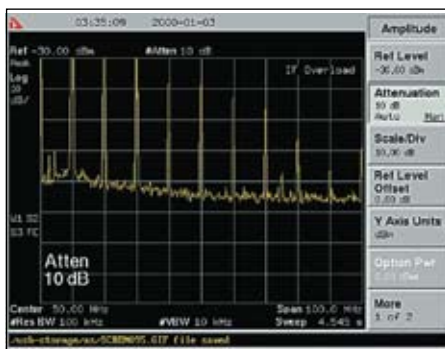


Рис. 17. Пример появления ложных гармоник и негармонических искажений из-за перегрузки анализатора

Обратите внимание на два небольших пика перед пиком первой гармоники и на пик между пиками 7-й и 8-й гармоник. Такие пики обусловлены негармоническими искажениями, которые появляются также при перегрузке анализатора. Признаком перегрузки является ограничение амплитуды первой гармоники и появление предупреждающей надписи **IF Overload** на экране. Всегда избегайте перегрузки, для этого следует правильно выбрать опорный уровень и установить коэффициент ослабления сигнала входным attenuатором.

### Дисплей и линия экрана (горизонтальный курсор)

Современный анализатор спектра не просто прибор для построения графиков спектров, но и многофункциональный измеритель параметров сигналов — как частотных, так и амплитудных. Грубо эти параметры можно измерять по графику спектра с использованием масштабной сетки экрана. Однако при этом погрешность измерений велика — до нескольких процентов.

Тут уместно отметить, что удобный для просмотра графиков спектров жидкокристаллический дисплей современных анализаторов спектра плохо приспособлен для точных измерений из-за своего конечного разрешения (640×480 пикселей для анализаторов АКТАКОМ и АКИП). Этот недостаток заметно ослаблен специальной техникой курсорных и маркерных измерений, которые реализованы цифровыми методами.

Доступ к курсору (горизонтальной линии дисплея) дает кнопка **Display** («Дисплей») в группе кнопок контроля (**Control**). Она выводит меню, представленное на рис. 18.

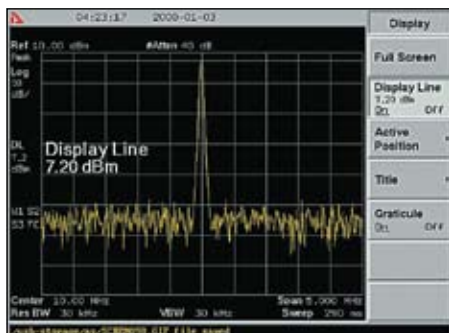


Рис. 18. Экран с меню Display и горизонтальной линией экрана

Это меню содержит позиции:

- **Full Screen** — удаление меню экрана и переход к представлению экрана в полном виде.
- **Display Line** — вывод зеленой горизонтальной линии дисплея (горизонтального курсора).
- **Active Position** — вывод активной позиции (надпись жирным крупным текстом) вверх (**Top**), в центр (**Center**) или вниз (**Bottom**) экрана, по умолчанию используется вывод в центр.
- **Title** — установка (выбором набора символов редактора) титульной надписи, помещаемой в верхнюю (титульную) часть

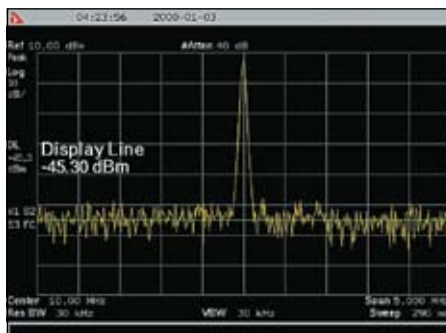


Рис. 19. Полный экран (без меню)

экрана, изменение и стирание этой надписи.

- **Graticule** — вывод (**On**) или удаление (**Off**) масштабной сетки экрана.

Горизонтальная линия (курсор) экрана может плавно перемещаться вверх или вниз поворотной ручкой или устанавливаться в заданную позицию цифровыми клавишами. На рис. 18 показан пример установки этой линии на пик спектра и контроль его уровня. А на рис. 19 показан переход к полноэкранному изображению командой **Full Screen**. Линия дисплея здесь установлена в середине шумовой полоски спектра и позволяет оценить текущий средний уровень шума. ■

*Окончание следует*

## Литература

1. Кузнецов В. А., Долгов В. А., Коневских В. Н. и др. Измерения в электронике: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-Пресс, 2009.
3. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
4. Дьяконов В. П., Образцов А. А., Смердов В. Б. Электронные средства связи. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
5. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК-Пресс, 2009.
6. Дьяконов В. П. Развитие серии генераторов произвольных функций AFG3000 компании Tektronix и их применение // Компоненты и технологии. 2009. № 11.
7. Дьяконов В. П. Современные методы Фурье- и вейвлет-анализа и синтеза сигналов // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2009. № 2.
8. Основы анализа спектра в реальном масштабе времени. Tektronix — [www.tektronix.com/rsa](http://www.tektronix.com/rsa)
9. Анализаторы спектра реального времени. Tektronix — [www.tektronix.com/rsa](http://www.tektronix.com/rsa)
10. Дьяконов В. П. Компьютерная математика в измерительной технике // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2009. № 5.