

Выбор цифровых анализаторов спектра с учетом их нелинейности и измерений уровня

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

Анализаторы спектра в наши дни нашли широчайшее применение в технологиях оценки сигналов и тестирования различных радиотехнических устройств. Эта статья продолжает серию статей автора по современным цифровым анализаторам спектра [1, 2] и посвящена их выбору на основании изучения нелинейных свойств анализаторов спектра и проведения ими измерений уровня сигналов. Особое внимание в статье уделено массовым приборам малой и умеренной стоимости, находящим наиболее широкое применение, особенно в период мирового финансового кризиса.

Роль нелинейности и измерений уровня

Хотя спектральный анализ сигналов основан на линейных математических операциях [3–5], современный цифровой анализатор спектра является нелинейным устройством с множеством принципиально нелинейных узлов: входным усилителем, смесителями, усилителями промежуточной частоты (в том числе логарифмическим) и детекторами. Нелинейность присуща как самым дорогим анализаторам спектра [1], так и самым дешевым [2].

Нелинейность ведет к появлению в строящихся спектрах новых линий (пику), принципиально отсутствующих у спектра самого входного сигнала и сильно затрудняющих его анализ. Это может привести к погрешностям измерений, грубым просчетам при анализе сигналов и даже к неверным выводам о физике работы тестируемых компонентов. Разумеется, степень этих искажений зависит

от класса приборов и должна учитываться при их выборе.

Современные цифровые анализаторы спектра имеют высочайшую точность задания частот с помощью цифровых синтезаторов: разрешение порядка 10^{-6} достигается даже у самых дешевых анализаторов спектра АКТАКОМ АКС-1301 [1, 2, 6] (рис. 1). Такой же порядок имеет нестабильность частоты за длительный период (порядка года). Это делает настройку частот анализаторов стабильной как на высоких, так и на низких частотах и позволяет использовать для спектрального анализа фильтры с очень узкой полосой пропускания (разрешения) — до единиц и десятков гигагерц, а также исследовать не только широкополосные устройства, но и устройства с высокой избирательностью.

Однако погрешность измерений уровня сигналов у анализаторов спектра довольно велика, поскольку она определяется массой факторов: погрешностью входного делителя, усилителей перед смесителями, самими смесителями, уровнями сигналов гетеродина, нестабильностью логарифмического усилителя промежуточной частоты, погрешностью коэффициента передачи детекторов и конечной точности цифровых измерений уровня. Разумеется, погрешность измерений уровня зависит и от частоты сигнала: она возрастает как на низких, так и на высоких частотах. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) составляет $\pm(1-3)$ дБ в диапазоне частот от 9 кГц до 3 ГГц, но часто имеет сильный спад на низких (менее 100 кГц) частотах.

Полоса разрешения фильтров промежуточной частоты RBW задает вид и ширину пиков линий спектра и также вносит вклад в суммар-

ную погрешность оценки высоты пиков спектральных линий, а зачастую и их положения (частоты). А полоса частот видеофильтров на выходе блока детекторов сильно влияет на уровень шума, погрешность оценки уровня сигнала и время проведения измерений.

У дешевых анализаторов спектра вполне удовлетворительной является абсолютная погрешность измерения уровня пиков спектра порядка $\pm(1-1,5)$ дБм (децибел мощности), и лишь у дорогих анализаторов спектра высокого класса она достигает значений $\pm(0,2-0,4)$ дБм и ниже. Однако эта погрешность может многократно возрастать при проявлении анализатором его скрытых нелинейных свойств, возникающих при неудачных установках параметров приборов. Поэтому пользователь должен буквально чувствовать работу анализатора и не полагаться на полученные даже дорогим прибором первые результаты. Прибор надо тщательно и всесторонне обследовать, вначале на теоретически понятных примерах, а затем — на близких к решаемым задачам практических примерах.

Динамический диапазон анализатора спектра

Особенность современных цифровых анализаторов спектра — огромный динамический диапазон тестируемых сигналов. Снизу он задается средним отображаемым уровнем шума DANL (Displayed Average Noise Level), достигающим значений $-(100-170)$ дБм. Это уровень середины шумовой дорожки анализатора спектра. А сверху он ограничен (на уровне $+20...40$ дБм) нелинейностью тракта анализатора спектра и допустимой мощностью, рассеиваемой на резисторе



Рис. 1. Самый дешевый цифровой анализатор спектра АКТАКОМ АКС-1301 с диапазоном частот от 9 кГц до 3 ГГц

50 Ом входа. Подача сигнала более высокого уровня может вывести входные цепи или смеситель анализатора из строя.

Такой огромный динамический диапазон (до 200 дБм) практически не реализуем. На практике всегда приходится работать в окне уровней сигнала с динамическим диапазоном порядка 40–70 дБм. Он задается двумя важными амплитудными параметрами анализатора:

- опорным уровнем Ref (Reference Level) — верхней границей уровня сигнала, соответствующей верхней части экрана дисплея анализатора;
- уровнем ослабления сигнала Atten линейного входного аттенюатора, задающим наклон линейной части передаточной характеристики.

Изменение опорного уровня физически означает выбор верхней границы видимого окна нелинейной передаточной характеристики анализатора спектра (в первую очередь его смесителя). Ее превышение означает физическое ограничение уровня сигнала и генерацию высших гармоник.

Уровень сигнала в анализаторах спектра и опорный уровень задается в децибелах мощности (с единицами мощности Вт, мВт, мкВт и т. д.):

$$\text{дБм} = 10 \log(P/\text{Единица_мощности}), \quad (1)$$

или в децибелах напряжения (с единицами напряжения В, мВ, мкВ и т. д.):

$$\text{дБм} = 20 \log(U/\text{Единица_напряжения}). \quad (2)$$

Помимо входного аттенюатора с дискретно регулируемым (часто электронным путем) ослаблением (например, от 0 до 50 дБ с шагом 10 дБ, а иногда и 1 дБ), многие анализаторы спектра имеют встроенный предварительный усилитель с коэффициентом усиления +20 дБм (иногда +20 дБн по напряжению). Он позволяет повысить чувствительность анализатора, то есть уровень воспринимаемого сигнала, и повысить отношение сигнал/шум анализатора.

Сквозная передаточная характеристика анализатора спектра

Нелинейность анализатора спектра во многом зависит от его сквозной передаточной характеристики — зависимости уровня выходного напряжения, определяемого индикатором, от мгновенного значения входного сигнала. В радиотехнике принято, в первом приближении, представлять эту характеристику полиномом (степенным многочленом) с целочисленными показателями степени:

$$u_{\text{вых}}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n u_{\text{вх}}^n = a_1 u_{\text{вх}}(t) + a_2 u_{\text{вх}}^2(t) + a_3 u_{\text{вх}}^3(t) + \dots \quad (3)$$

Обычно при малых амплитудах входного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ достаточно ограничиться тремя членами полинома, но при больших амплитудах нужно учитывать и члены более высокого порядка. Подстановка выражения для конкретного входного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ в (3) позволяет найти зависимость $u_{\text{вых}}(t)$.

Если у передаточной характеристики проявляется симметрия, то коэффициенты a_n с четными n имеют малые значения и $u_{\text{вых}}(t)$ содержит в основном нечетные гармоники. Но чаще встречается случай, когда коэффициенты полинома a_n уменьшаются по мере n , и наиболее существенными являются первые три гармоники, порождаемые синусоидальным входным сигналом с частотой первой гармоники (и частотой повторения) f_1 :

$$u_{\text{вых}}(t) = U_m \sin(2\pi f_1 t). \quad (4)$$

Общепринятой мерой нелинейных искажений одночастотных сигналов является коэффициент нелинейных искажений:

$$k_2 = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2}}{U_1} \times 100\%, \quad (5)$$

где U_i — амплитуда i -й гармоники сигнала (в единицах измерения напряжения). Для его оценки достаточно измерить и вычислить амплитуды первых трех–пяти гармоник. Для чистого синусоидального сигнала $k_2 = 0\%$. Практически сигналы с $k_2 < 5\%$ неотличимы от синусоидальных, и обнаружить и измерить уровень их гармоник позволяют только анализаторы спектра и куда более редкие избирательные вольтметры. Иногда указывают уровень входного сигнала, при котором передаточная характеристика отклоняется от идеальной на 1 дБм. Это является более точной мерой ее нелинейности, чем ограничение на уровне Ref.

К сожалению, из-за сложности радиотехнического тракта анализаторов спектра вид и параметры его передаточной характеристики детально не нормируются и зависят от его амплитудных и даже частотных установок. Например, сужение полосы частот фильтров последней промежуточной частоты RBW и видеофильтров VBW существенно снижает уровень шумов анализатора спектра и позволяет тестировать очень слабые сигналы.

Современные цифровые анализаторы спектра содержат встроенный микропроцессор или даже строятся на основе архитектуры персонального компьютера. Они оснащены многочисленными автоматическими регуляторами, позволяющими в определенных пределах выбирать автоматически и оптимизировать значения параметров приборов. Но последние часто оказываются взаимно зависимыми и противоречивыми. Например, для получения более четких спектров надо сужать полосы фильтров, но это увеличивает время измерений и может увеличить погрешность измерения уровней. Поэтому, как

правило, предусмотрена и ручная регулировка большинства параметров. У анализаторов спектра АКС-1301 установленные вручную параметры помечаются знаком #. Все параметры представлены в окне дисплея анализатора, и указывать их отдельно обычно не требуется.

Для получения достоверных результатов спектрального анализа необходимо исследовать анализатор спектра с помощью высококачественного генератора сигналов, прежде всего синусоидальных [8, 9]. Ниже приведены некоторые дополнительные результаты такого исследования массового анализатора спектра АКС-1301, выпускаемого под торговой маркой АКТАКОМ, с помощью генератора сигналов AFG 3101 компании Tektronix.

На рис. 2 показан спектр синусоидального сигнала малого уровня, первая гармоника которого имеет уровень около 660 мкВ, то есть меньше 1 мВ. Для уменьшения уровня шума полоса разрешения задана RBW = 3 кГц (минимальное значение — 300 Гц), а ширина полосы видеофильтра 1 кГц (минимальное значение — 10 Гц). Основная (первая) гармоника отчетливо видна, и динамический диапазон анализатора при ослаблении входного аттенюатора 0 дБ составляет около 70 дБ.

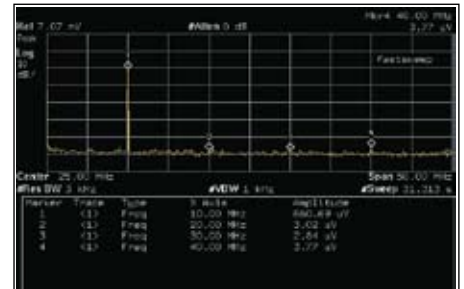


Рис. 2. Спектр синусоидального сигнала с частотой 10 МГц и уровнем первой гармоники около 660 мкВ

Уровень наблюдаемых гармоник (в единицах напряжения) тут измеряется с помощью маркеров с выводом таблицы их параметров. Нетрудно заметить, что этот анализатор способен измерять сигналы очень малого уровня даже на фоне сигнала первой гармоники большего уровня. Например, четвертая гармоника (с частотой 40 МГц) зафиксирована вполне отчетливо с уровнем 3,77 мкВ. И это далеко не предельный результат, так как возможно дальнейшее улучшение соотношения сигнал/шум за счет уменьшения RBW до 300 Гц, VBW даже до 10 Гц и введения операции усреднения Average. Многие анализаторы спектра высокого класса позволяют уменьшать эти полосы до 10 Гц и даже 1 Гц.

Важно отметить, что все эти меры неизбежно ведут к увеличению, порою чрезмерному, времени анализа и времени качения частоты Sweep, которое может стать недопустимо большим — до десятков, сотен и даже тысяч секунд. Обычно разумно установить его вручную на уровне 0 секунд: анализатор установит реально возможное минимальное значение

Sweep и выведет надпись FastSweep в правой и верхней частях экрана. При этом неизбежны динамические искажения, но их уровень обычно остается приемлемым: за этим следит микропроцессорная система анализатора.

Теперь можно исследовать, как меняется спектр при увеличении уровня входного сигнала. Можно заметить, что при этом будет расти высота пика первой гармоники и значительно быстрее будут расти высоты пиков высших гармоник — второй, третьей и четвертой (все они помечены маркерами с соответствующими номерами). На рис. 3 показан пример построения спектра при увеличении уровня первой гармоники примерно в 10 раз — до значения 6,93 мВ, это чуть меньше опорного уровня 7,07 мВ, возможного при нулевом уровне ослабления входного аттенюатора. Обратите внимание на то, что уровень высших гармоник существенно возрос.

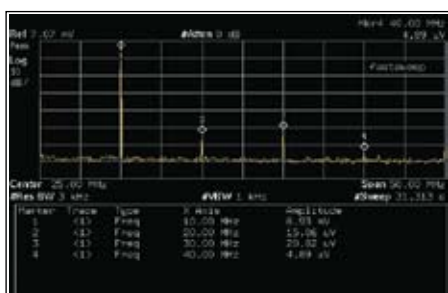


Рис. 3. Спектр синусоидального сигнала с частотой 10 МГц и уровнем первой гармоники около 7 мВ

При дальнейшем увеличении уровня входного сигнала он превышает опорный уровень Ref. Это приводит к появлению сообщения о перегрузке *If overload* и обрезанию верхней части спектрального пика первой гармоники (иногда и следующих гармоник) на уровне верхней кромки экрана. Но одновременно продолжается заметный рост высот пиков высших гармоник, что прямо вытекает из выражения (3): из него ясно, что уровень пика высших гармоник растет в n раз быстрее роста уровня первой гармоники. Перегрузка часто приводит к появлению негармонических искажений, частоты пиков которых не кратны частоте первой гармоники сигнала. Такой пик виден на рис. 4 на частоте около 90 кГц.

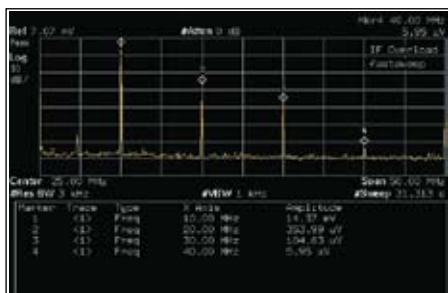


Рис. 4. Спектр синусоидального сигнала с частотой 10 МГц и уровнем первой гармоники, превысившим опорный уровень

Часто для учета нелинейности передаточной характеристики вводятся особые обобщенные параметры — точки пересечения передаточной характеристики с характеристиками по второй и по третьей гармоникам [4]. Построение точки пересечения по второй гармонике поясняет рис. 5. Здесь $L_{вх}$ и $L_{вых}$ — уровни сигнала на входе и выходе тестируемого устройства. Точка SHI соответствует пересечению идеальных передаточных характеристик в виде отрезков прямых с разным наклоном (у передаточной характеристики по второй гармонике он вдвое выше). Однако из-за существенной нелинейности передаточной характеристики по первой гармонике пересечение ее передаточной характеристикой по второй гармонике обычно происходит существенно ниже. Аналогичным образом задается точка пересечения по третьей гармонике TOI. Координаты точек пересечения указываются по оси входа в дБм.

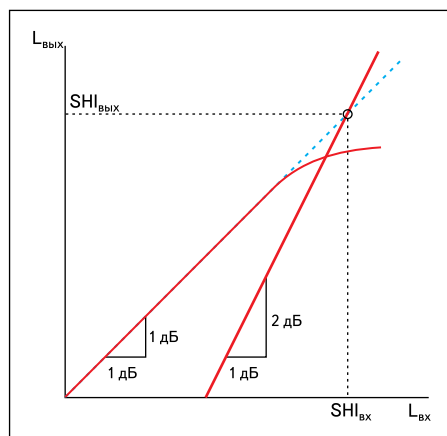


Рис. 5. К построению точек пересечения динамических характеристик по первой и второй гармоникам

Увеличение коэффициента деления входного аттенюатора — самый эффективный метод снижения нелинейных искажений входного сигнала. На рис. 6 показан пример, когда установлен параметр Atten = 50 дБ (максимальное ослабление). Сравнение рис. 6 с рис. 4 показывает, что в этом случае, несмотря на значительно больший уровень первой гармоники (430 мВ), относительный уровень высших гармоник меньше, а негармо-

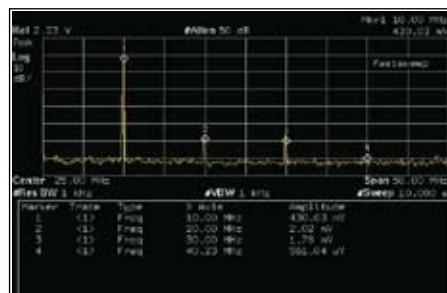


Рис. 6. Спектр синусоидального сигнала с частотой 10 МГц при установке коэффициента деления входного аттенюатора в 50 дБ

нические искажения практически исчезли. Разумеется, вместо увеличения коэффициента деления встроенного делителя можно просто уменьшить амплитуду входного сигнала или применить внешний аттенюатор.

Интермодуляционные искажения при двухчастотном сигнале

Тестирование анализатора двухчастотным сигналом:

$$u_{вх}(t) = U_{m1} \sin(2\pi f_1 t) + U_{m2} \sin(2\pi f_2 t) \quad (6)$$

позволяет выявить еще ряд явлений, присущих нелинейным системам и способным сильно исказить результаты анализа входного сигнала. Это, прежде всего, интермодуляционные искажения. Чаще всего их оценивают при сигналах разной частоты, но одинаковой амплитуды. На рис. 7 показан случай вполне благополучного тестирования двухчастотного сигнала анализатором АКС-1301. Сигнал с частотой 10 МГц получен с выхода опорного генератора (на задней стенке прибора), а сигнал с частотой 11 МГц — от генератора Tektronix AFG 3101. Для объединения сигналов использовался 50-омный тройник. Никаких признаков интермодуляционных искажений в этом случае нет. Четко наблюдаются пики обоих сигналов, и они примерно на 20 дБ ниже опорного уровня (в данном случае максимального).

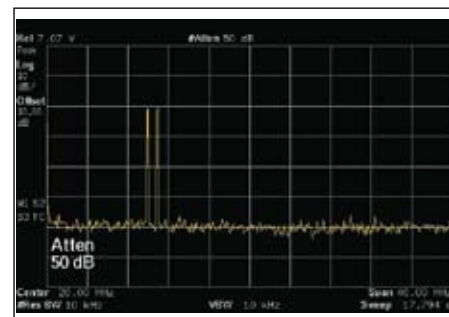


Рис. 7. Случай благополучного представления двухчастотного сигнала (10 и 11 МГц) равной амплитуды при максимальном ослаблении входного аттенюатора

К сожалению, такая благополучная ситуация имеет место далеко не всегда, и в этом можно легко убедиться. Если уменьшить коэффициент деления входного аттенюатора и опорный уровень, то можно наблюдать случаи превышения обоими входными сигналами опорного уровня. Это сопровождается сообщением *If overload* и ведет к выдаче всего «букета» интермодуляционных искажений (рис. 8).

Дальнейшее уменьшение коэффициента деления аттенюатора до значения 10 дБ приводит к явно недопустимым, очень большим интермодуляционным искажениям. Экран анализатора спектра будет буквально забит множеством спектральных составляющих, которых нет и в помине во входном сигнале.

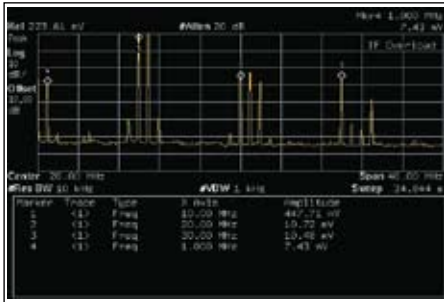


Рис. 8. Возникновение интермодуляционных искажений при Atten = 20 дБ

Заметим, что, несмотря на такие сильные искажения, уровень входных сигналов остается намного ниже максимально возможного значения, то есть является вполне допустимым, хотя и превосходящим для обоих сигналов опорный уровень.

Выделение слабого сигнала на фоне большого

Интересно отметить случай, когда два сигнала близки по частотам, но сильно отличаются по уровню, что часто происходит на практике, когда надо выделить слабый сигнал на уровне сильного. Это показано на рис. 9, где центральный пик (помечен маркером 1) отражает сигнал с частотой 10 МГц, достигший опорного уровня, а правый пик — сигнал с частотой 10,005 МГц (маркер 2). Выбор предельно малой полосы RBW = 300 Гц и VBW = 10 Гц (для анализатора АКС-1301) позволил четко выделить из шума и измерить сигнал малого уровня. Измерение уровня слабого сигнала (он помечен маркером 2) в данном случае возможно, даже если сильный сигнал превысил опорный уровень. Интересно, что в спектре присутствует и паразитный малый сигнал (маркер 3) с частотой 9,995 МГц, отсутствующий у поданных на вход анализатора сигналов. Он говорит о возникновении паразитной амплитудной модуляции сигнала с центральным пиком с частотой, равной разности частот входных сигналов.

При большой разнице в амплитудах сигналов большой сигнал начинает подавлять

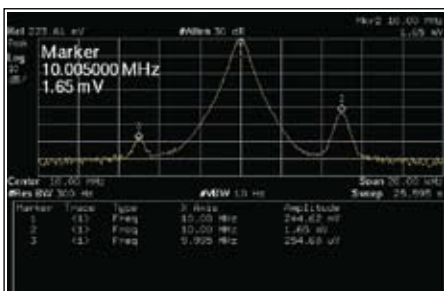


Рис. 9. Пример выделения сигнала (маркер 2) малого уровня, по частоте близкого к сигналу большого уровня (маркер 1)

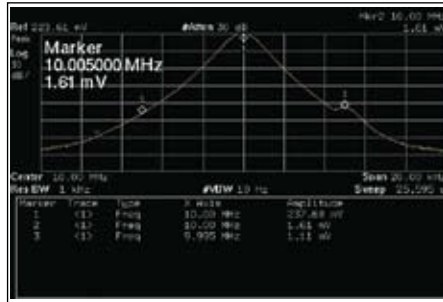


Рис. 10. Пример заметного подавления слабого сигнала сильным сигналом при увеличении RBW до 1 кГц

слабый. Вначале это ведет к занижению измеренного уровня пика слабого сигнала. Особенно это заметно, если слабый сигнал попадает в полосу частот фильтра (рис. 10). Обратите внимание на то, что левый пик при этом исчез. Правый пик выражен не резко, но показания маркера упали незначительно.

Интермодуляционные искажения при двух сильных сигналах с сильно отличающейся частотой

Теперь рассмотрим случай, когда на вход анализатора спектра подаются сигналы с одинаковой амплитудой, но сильно различающейся частотой — от опорного генератора 10 МГц и от генератора AFG 3101 1 МГц. Случай малых искажений представлен на рис. 11. Нетрудно заметить, что интермодуляционные искажения в этом случае свелись к модуляции сигнала с высокой частотой (10 МГц — маркер 1) синусоидальным сигналом с низкой частотой (1 МГц — маркер 4). При этом по обе стороны пика высокочастотного сигнала появляются боковые пики с частотами 9 и 11 МГц. Видны также вторая и третья высшие гармоники высокочастотного сигнала: они помечены маркерами 2 и 3. Пока они не модулированы. Заметим, что эффект модуляции отчетливо виден, хотя оба входных сигнала имеют уровень, который заметно меньше опорного уровня.

Проследим за искажениями в этом случае при уменьшении степени ослабления аттенюатора. При Atten = 40 дБ искажения существенно возрастают. Начинает появляться

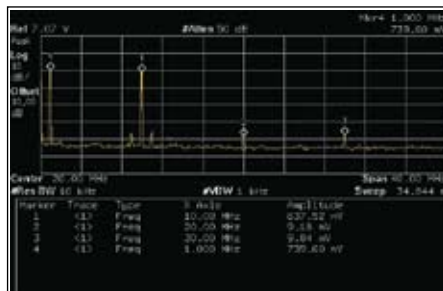


Рис. 11. Спектр при воздействии на вход анализатора двух сигналов с частотами 1 и 10 МГц при Atten = 50 дБ: слабая модуляция высокочастотного сигнала низкочастотным

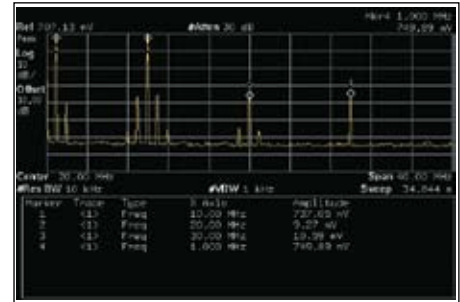


Рис. 12. Спектр при воздействии на вход двух сигналов с частотами 1 и 10 МГц при Atten = 30 дБ: заметный рост искажений, несмотря на то, что уровень сигналов явно меньше опорного уровня

вторая гармоника низкочастотного (разностного) сигнала. Но эта гармоника на высокочастотный сигнал не влияет. При Atten = 30 дБ проявляется новый эффект: высокочастотный сигнал модулирует уже и вторая гармоника низкочастотного сигнала (рис. 12). Появляется и эффект модуляции второй гармоники высокочастотного сигнала. Обратите внимание, что уровень исходных сигналов остается меньше опорного уровня.

При Atten = 20 дБ происходит дальнейший рост интермодуляционных искажений (рис. 13). Модуляции подвергается не только первая, но и вторая и третья гармоники высокочастотного сигнала. В этом случае рост искажений нетрудно предвидеть, поскольку уровень исходных сигналов уже превышает опорный уровень.

Мерой искажений в этом случае может быть коэффициент паразитной модуляции высокочастотного сигнала низкочастотным сигналом. Эта модуляция является паразитной, поскольку вызвана самим анализатором спектра, а не источниками входных сигналов. Коэффициент нелинейности определяется как:

$$m = 100\% (U_1 + U_2) / U_0, \quad (7)$$

где U_1 и U_2 — уровни левого и правого пиков спектра амплитудно-модулированного сигнала; U_0 — амплитуда несущей. Значения m могут лежать в пределах от 0 до 100% и более («более» означает перемодуляцию).

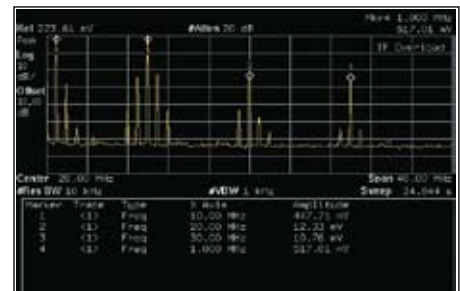


Рис. 13. Спектр при воздействии на вход двух сигналов с частотами 1 и 10 МГц при Atten = 20 дБ: резкий рост интермодуляционных искажений, несмотря на то, что уровень сигналов явно меньше опорного уровня

Интермодуляционные искажения при многочастотном и импульсном сигнале

На практике нередко анализируются многочастотные и импульсные сигналы вида:

$$u_{ex}(t) = U_m \sin(2\pi f_1 t) + \sum_{k=1}^n U_{mk} \sin(2\pi k f_u t). \quad (8)$$

При спектральном анализе импульсные сигналы представляются своим спектром — второе слагаемое в (8). При этом надо учитывать, что спектр импульсных сигналов может содержать множество (теоретически до бесконечности) гармоник с частотой первой гармоники f_u . И хотя их уровень может быть малым, сам импульс с большой скважностью может иметь большую амплитуду. Надо внимательно следить за ней, не допуская превышения максимально возможного напряжения на усилителе.

Пример выбора правильных установок анализатора представлен на рис. 14. Он соответствует подаче на вход анализатора двух сигналов — синусоидального с частотой 10 МГц и импульсного типа $\sin(t/\tau)/(t/\tau)$. Последний (он получен от генератора произвольных функций Tektronix AFG 3101) создает набор из десятков гармоник с практически равной амплитудой, видимый в левой части спектра. Поскольку уровень их примерно на 30 дБ ниже уровня синусоидального сигнала (он представлен одним большим пиком), то никаких признаков появления интермодуляционных искажений нет. Оба спектра (импульсного и синусоидального со второй его гармоникой) четко различаются и друг на друга не влияют.

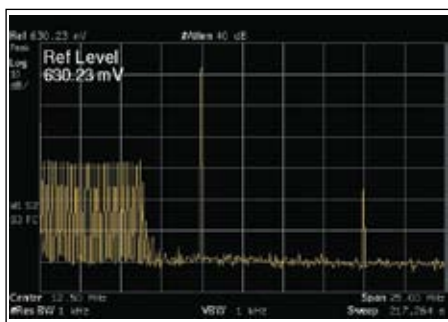


Рис. 14. Пример отображения спектра синусоидального и импульсного сигналов без интермодуляционных искажений

Импульс Гаусса имеет ограниченный спектр гармоник, но с существенно отличающимся и быстро спадающим уровнем гармоник. Такой импульс способен вызвать заметные интермодуляционные искажения (рис. 15). Обратите внимание, что сам импульс тут представлен 10 четко видимыми гармониками, тогда как боковые полосы модулированного сигнала содержат только 6 составляющих. То есть можно сказать, что интермодуляционные искажения вызывают составляющие спектра импульсов с достаточно большой амплитудой.

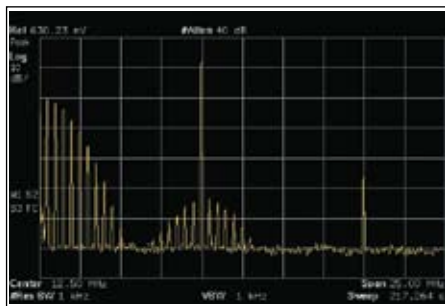


Рис. 15. Пример отображения спектра синусоидального сигнала и импульса Гаусса с явным возникновением интермодуляционных искажений

Еще один пример, представленный на рис. 16, иллюстрирует перекрытие спектров импульсного сигнала с функцией Лоренца и модулированного им синусоидального сигнала. Интересно, что во всех этих примерах отчетливо фиксируется вторая гармоника синусоидального сигнала, но ее паразитная модуляция практически незаметна, и ее пик не содержит боковых компонентов.

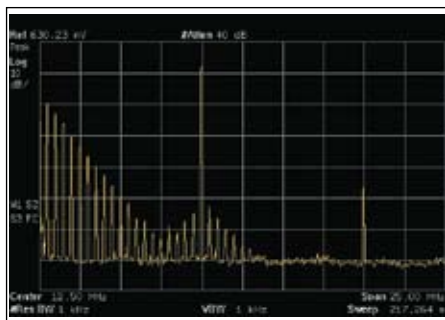


Рис. 16. Пример перекрытия спектров импульсного сигнала Лоренца и модулированного им синусоидального сигнала

Спектральный анализ в СВЧ-области

Приведенные выше примеры относились к высокочастотным сигналам, при исследовании которых частотные свойства самого анализатора спектра особого значения не имеют. Но даже дешевые анализаторы спектра способны анализировать спектры СВЧ-сигналов, частота которых доходит до 3 ГГц. Приведем примеры анализа таких сигналов.

На рис. 17 показан спектр выходного сигнала генератора наносекундных импульсов Г5-85 с установкой частоты повторения импульсов примерно на 1 ГГц и минимально возможной длительностью импульсов около 0,5 нс. Амплитуда импульсов установлена равной 0,5 В. Неожиданно малый уровень второй гармоники, выявленный анализатором спектра АКС-1301, свидетельствует о том, что предельная форма сигнала на выходе генератора в этом случае близка к синусоидальной. Это подтвердил и просмотр сигнала стробоскопическим осциллографом с полосой частот



Рис. 17. Спектр импульсов генератора Г5-85 с частотой повторения 1 ГГц

до 18 ГГц. Реальное время нарастания и спада импульса составляло 0,3 нс.

При просмотре спектра СВЧ-сигналов анализатор спектра позволяет установить максимальные полосы RBW = VBW = 3 МГц, дающие и максимальный уровень шума (рис. 18). Нег оснований называть этот шум чрезмерным: пик сигнала на его фоне хорошо выделяется, и динамический диапазон превышает 30 дБм.

Для понижения уровня шума без снижения полос фильтра на таких частотах эффективно применение усреднения по Average = n спектрам. Это хорошо видно на рис. 19, где

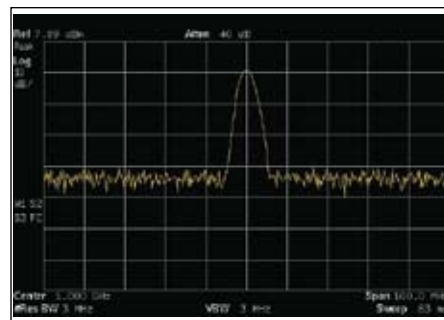


Рис. 18. Просмотр первой гармоники сигнала с частотой 1 ГГц при максимальных значениях RBW = VBW = 3 МГц

показан спектр первой гармоники сигнала. Шум теперь практически отсутствует (параметр n = 100).

На рис. 20 приведен спектр сигнала с выхода генератора Г5-85 при частоте повторения

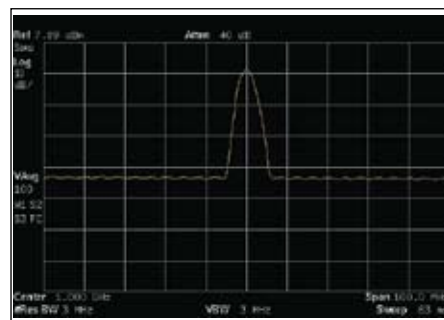


Рис. 19. Просмотр первой гармоники сигнала с частотой 1 ГГц при максимальных значениях RBW = VBW = 3 МГц при использовании усреднения по n = 100 спектрам

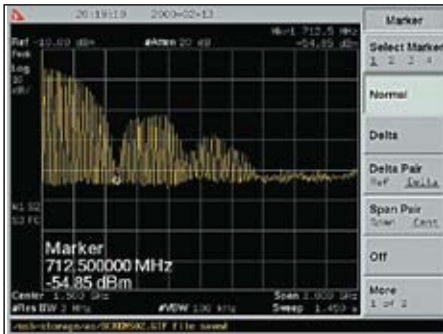


Рис. 20. Спектр сигнала с выхода генератора Г5-85 при частоте повторения около 30 МГц

около 30 МГц. Нетрудно заметить, что спектр охватывает область частот до ≈ 2 ГГц и имеет вид, вполне типичный для спектра импульса с почти прямоугольной формой. В частности, отчетливо видны периодические спады уровня гармоник почти до нуля. Первый такой спад происходит на частоте, равной $1/t_{\text{и}}$, где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса. Учитывая, что по данным рис. 19 эта частота равна 0,712 ГГц, можно вычислить $t_{\text{и}} = 1,38$ нс в этом случае.

Эти примеры показывают, что для тестирования анализаторов спектра с диапазоном частот до десятков и сотен гигагерц нужны генераторы пикосекундных импульсов. В настоящее время серийное производство таких уникальных генераторов находится лишь в самом начале своего развития.

Модуляционный метод получения спектров низкочастотных сигналов

В практике применения анализаторов спектра нередко требуется получать спектры низкочастотных сигналов. Это нужно при тестировании аудиоаппаратуры и источников питания. Некоторые современные цифровые анализаторы спектра способны анализировать низкочастотные сигналы звукового диапазона частот. Однако такие приборы, имеющие нижнюю граничную частоту спектра 20 Гц и менее, достаточно редки и имеют высокую стоимость.

У массовых цифровых анализаторов спектра [2] граница в 9 кГц является скорее рекламной, чем реально достижимой. Это связано с наличием паразитных частот в диапазоне до 100 кГц (рис. 21) (в формате инверсного GIF). На рис. 21 видно, что, помимо нерабочего участка спектра на частотах ниже 9 кГц и шумовой дорожки, в спектре обнаружено по крайней мере 4 паразитных сигнала. Уровень их пиков мал, что видно по данным таблицы параметров пиков.

Оценить спад чувствительности анализатора спектра на низких частотах можно, просматривая спектр импульсов сигнала $\sin(t/\tau)/(t/\tau)$ — рис. 22, полученный от генератора произвольных функций Tektronix AFG 3101 при частоте повторения импульсов 10 кГц. Такой спектр теоретически имеет гармоники с равным уров-

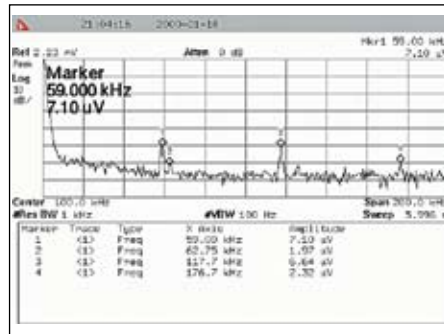


Рис. 21. Спектр при отсутствии сигнала на входе анализатора АКС-1301 в диапазоне частот обзора от 0 до 100 кГц

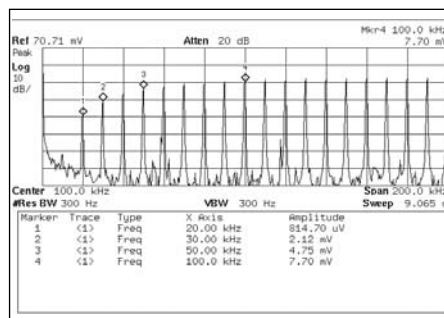


Рис. 22. Спектр сигнала $\sin(t/\tau)/(t/\tau)$ с частотой повторения 10 кГц

нем до частоты $1/\tau$. На рис. 22 хорошо видно, что амплитуда пиков гармоник падает по мере уменьшения их частоты, только начиная примерно со 100 кГц. Пик на частоте 10 кГц на 40 дБм меньше пика на частоте 100 кГц (среднего). Ясно, что реальной низкочастотной границей этих анализаторов является частота около 100 кГц, а не 9 кГц.

Предлагаемый ниже метод построения спектров в низкочастотном диапазоне (практически до 100–200 кГц) основан на построении спектра амплитудно-модулированного (АМ) синусоидального сигнала:

$$s(t) = A(t) \times \sin(2\pi ft). \quad (9)$$

В (9) модулирующий сигнал $A(t)$ играет роль исследуемого низкочастотного сигнала любой формы, а высокочастотный сигнал с частотой f — это несущая частота АМ-сигнала генератора (в нашем случае — AFG 3101), подаваемого на вход анализатора спектра радиочастотных сигналов. Таким образом, речь идет о полезном применении эффекта модуляции ВЧ-сигнала измерительного генератора исследуемым НЧ-сигналом.

Как хорошо известно, спектр АМ-сигнала состоит из спектральной линии (или реально пика) на частоте f несущей и двух боковых полос, представляющих спектр модулирующего сигнала $A(t)$ и его зеркальное отражение. Выделив правую боковую полосу, мы фактически получаем спектр низкочастотного сигнала $A(t)$ со сдвигом на частоту несущей. При

синусоидальной модуляции синусоидального сигнала уровень боковых пиков (в вольтах) составляет $m/2$ от уровня пика несущей, где m — глубина модуляции (от 0 до 1).

До сих пор этот метод не находил широкого применения из-за трудностей обеспечения линейной и точной модуляции, жестких требований к частотной стабильности анализатора спектра и широкой полосы частот фильтров анализатора RBW. В аналоговых анализаторах спектра старых поколений это приводило к невозможности реализации метода в диапазоне частот до 100 кГц. Однако в новейших цифровых анализаторах спектра и генераторах все эти недостатки успешно преодолены. Например, генераторы серии AFG фирмы Tektronix способны генерировать синусоидальные сигналы с частотами до 100–240 МГц, с глубиной АМ до 100% и нестабильностью частоты несущей порядка 1×10^{-6} . Подобную нестабильность частоты имеют и цифровые анализаторы спектра АКС-1301 и др.

Для реализации этого метода надо выбрать частоту несущей $f_{\text{в}}$ в 10–50 раз выше максимальной частоты сигнала $A(t)$, который подается на вход внешней модуляции генератора. Выход генератора подается на вход анализатора спектра. У анализатора спектра начальная частота Start задается равной f , а конечная End = Start+Span, где Span — полоса обзора. Таким образом, на экране анализатора строится спектр только правой боковой полосы частот АМ-сигнала генератора. Для предотвращения роста нелинейных искажений глубину модуляции следует выбирать от 50 до 80%.

На рис. 23 показан спектр синусоидального сигнала с частотой 10 кГц, который модулирует несущую с частотой 1 МГц. Просматривается область частот от 1 до 1,05 МГц, то есть полоса обзора составляет 50 кГц. Спектральный пик исследуемого сигнала с частотой 10 кГц (маркер 1) четко выделяется, никаких паразитных частот не видно, и есть лишь очень малый пик второй гармоники сигнала (маркер 2). Его уровень меньше 60 мкВ, и это говорит о высокой чистоте сигнала последнего. Динамический диапазон при этой реализации модуляционного метода составляет не менее 60 дБ.

Теперь рассмотрим спектр более сложного низкочастотного сигнала, например ме-

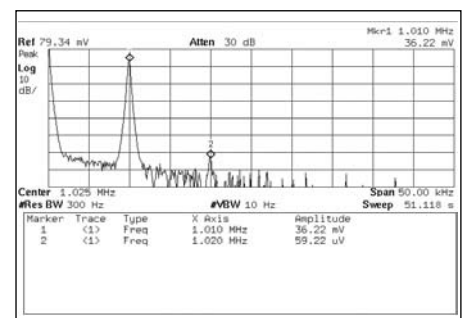


Рис. 23. Построение спектра синусоидального сигнала с частотой 10 кГц модуляционным методом

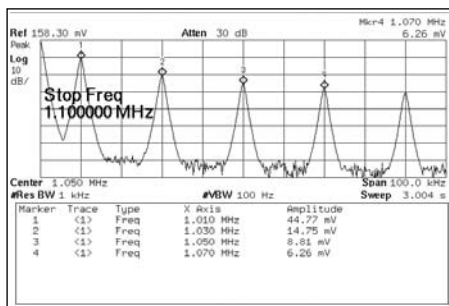


Рис. 24. Спектр низкочастотного меандра

андра (рис. 24). Сразу видно, что в спектре отчетливо присутствуют только нечетные гармоники. На пики их спектра установлены маркеры, позволяющие оценить уровень 1-й, 3-й, 5-й и 7-й гармоник. Уровень четных гармоник неотличим от шумов. Такой результат вполне соответствует теоретическому представлению о спектре меандра, у которого амплитуда нечетных гармоник пропорциональна $1/n$, где n — номер гармоники.

Спектр низкочастотного треугольного сигнала показан на рис. 25. С первого взгляда он напоминает спектр меандра: видны только нечетные гармоники, уровень которых уменьшается по мере роста номера. Но полученные с помощью маркеров данные об их амплитуде показывают, что уровень гармоник в этом случае значительно меньше такового для меандра.

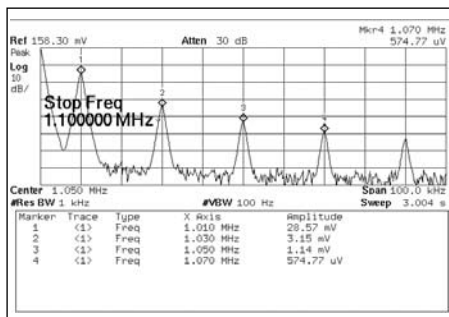


Рис. 25. Спектр низкочастотного треугольного сигнала

Рассмотрим еще один пример — на построение спектра низкочастотного пилообразного (линейно-нарастающего с быстрым спадом) сигнала. В его спектре (рис. 26)

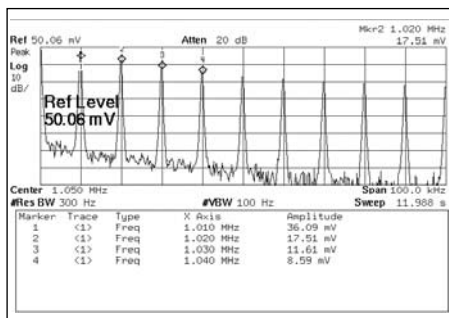


Рис. 26. Спектр низкочастотного пилообразного сигнала

присутствуют все гармоники — как четные, так и нечетные. Их уровень падает пропорционально $1/n$. Первые 4 гармоники выделены маркерами.

Приведенные примеры наглядно показывают, что совместное применение цифрового генератора произвольных функций и массового и сравнительно дешевого унифицированного цифрового анализатора спектра радиочастот позволяет анализировать спектры низкочастотных сигналов любой (в том числе типовой) формы. При этом исключается влияние спада чувствительности анализатора на низких (менее 100 кГц) частотах и отсутствуют паразитные частотные составляющие.

Разрешающая способность при использовании массовых анализаторов составляет 100–300 Гц, но у более дорогих моделей может достигать 1–10 Гц. Это позволяет решать задачи анализа спектра сигналов с частотами ниже 100 кГц без влияния искажений сигнала в этом диапазоне и наличия в нем паразитных сигналов. В частности, описанный метод позволяет оценивать и измерять параметры ВЧ-генераторов с амплитудной модуляцией стандартными низкочастотными сигналами и оценивать величину их коэффициента нелинейных искажений. Не стоит забывать, что спектральный анализ на низких частотах сейчас обеспечивает большинство современных цифровых осциллографов.

Выбор анализаторов спектра по частотным и амплитудным параметрам

Из приведенных примеров ясно, что работа даже с дешевыми массовыми анализаторами спектра, такими как АКТАКОМ АКС-1301/1306, позволяет получить важные данные о спектрах самых различных сигналов и выявить как их свойства, так и свойства самих анализаторов, обусловленные влиянием их нелинейности и неудачных установок параметров. Для проведения серьезных исследований и тестирования ответственных компонентов важен все же выбор оптимально подходящих для этого типов анализаторов спектра. Ныне их выпускается очень много, и это может существенно затруднить такой выбор.

Наиболее совершенные анализаторы спектра реального времени с существенно расширенными характеристиками выпускает фирма Tektronix. Они подробно описаны в статье [1] и потому далее не рассматриваются, хотя многие описанные выше положения и основы применения анализаторов спектра в полной мере относятся и к ним. В области производства обычных цифровых анализаторов спектра, безусловно, лидирует корпорация Agilent Technologies [10]. Именно клоны ее приборов выпускают корейские и китайские фирмы по вполне умеренным ценам [2]. В числе безусловных лидеров находится и германская компания Rohde&Schwarz [11].

При выборе анализаторов спектра в первую очередь учитывается их цена и частотный диапазон. Современная унифицированная элементная база умеренно дешевых анализаторов спектра позволяет строить приборы с частотным диапазоном от 9 кГц (иногда и ниже) до 3–6 ГГц. Такие анализаторы часто оснащаются трекинг-генераторами и другими опциями, например аккумуляторными батареями для автономного питания. Анализаторы на более высокие частоты обычно содержат дополнительные СВЧ-смесители и гетеродины и относятся к иной, существенно более дорогой группе приборов.

В остальном разнообразие анализаторов спектра базируется на разных полосах фильтров RBW и VBW, разном минимальном уровне шумов и динамическом диапазоне, а также разных параметрах уровня. Разумеется, подробный анализ возможностей анализаторов требует их детального изучения по фирменным материалам, например проспектам продукции [10, 11] и описаниям приборов.

Анализаторы спектра фирмы Agilent Technologies

Остановимся, для примера, на анализаторах спектра фирмы Agilent Technologies [10]. В последнее время фирма в отношении этих приборов часто использует общий термин — анализаторы сигналов.

Значительная часть анализаторов спектра этой компании имеет диапазон частот от 9 кГц до 3–6 ГГц и относится к приборам на основе унифицированной элементной базы (рис. 27). Приборы имеют и типовой интерфейс, отличающийся несущественными особенностями, например расположением поворотной ручки и групп кнопок. Такие отличия нельзя относить к принципиальным. Гораздо важнее большое время наработки на отказ у этих анализаторов и существенно расширенный диапазон полос фильтров RBW и VBW. Приборы нередко обладают наилучшими для своего класса показателями по чувствительности, уровню шума и линейности передаточной характеристики. В общем, это фирменные изделия!



Рис. 27. Анализатор спектра ESA-L фирмы Agilent Technologies, построенный на унифицированной элементной базе



Рис. 28. Внешний вид анализатора спектра серии N1996A



Рис. 29. Внешний вид настольных анализаторов N9000A серии CXА

ESA-L — довольно старый прибор, предусматривающий запись спектров и копий экрана на обычный гибкий диск. Порт USB у него отсутствует. Тем не менее прибор выпускается и по сей день в трех модификациях. Основные параметры анализаторов спектра ESA-L фирмы Agilent:

- Диапазон частот: 9 кГц — 1,5/3/26,5 ГГц (модели E4111/4103/4108).
- Погрешность: суммарная амплитудная $\pm 1,1$ дБ; по полосе обзора $\pm 1\%$; по частоте ± 2001 Гц (на частоте 1 ГГц).
- Минимальная длительность развертки: 4 мс.
- Скорость измерений: ≥ 28 измерений/с.
- Полоса пропускания: от 100 Гц до 5 МГц.

Другая серия — ESA-E — имеет существенно меньшую погрешность измерения уровня спектральных компонент и существенно меньшие минимальные значения полосы RBW. Ее характеристики следующие:

- Диапазон частот: от 9 кГц до 3/6,7/13,2/26,5 ГГц.
- Динамический диапазон: 108 дБ.
- Фазовый шум на 1 ГГц при отстройке на 10 кГц: -104 дБс/Гц.
- Погрешность: суммарная амплитудная $\pm 0,4$ дБ; по полосе обзора $\pm 0,5\%$; по частоте ± 101 Гц (на частоте 1 ГГц).
- Минимальная длительность развертки: 1 мс.
- Скорость измерений: ≥ 45 измерений/с.
- Полоса пропускания: от 1 Гц до 5 МГц.

Эти приборы имеют хотя и настольное оформление (рис. 27), но могут применяться в качестве высококачественных портативных приборов с автономным питанием. Время работы от батареи у них около 1,9 часа (две аккумуляторные батареи поставляются как опция). Корпус с резиновыми уплотнителями и передняя панель сделаны так, что с прибором можно работать в дождь и при высокой влажности. В виде опции анализаторы оснащаются трекинг-генератором и приборным портом GPIB.

Анализатор спектра серии N1996A — это типичный прибор среднего класса с малой погрешностью измерения уровня и наилучшим в этом классе приборов динамическим диапазоном и высоким уровнем точки пересечения

третьего порядка (TOI) $+18$ дБм. Внешний вид прибора представлен на рис. 28. Наличие портов USB позволяет использовать модули флэш-памяти и современные принтеры.

Параметры прибора:

- Диапазон частот: от 100 кГц до 3 или 6 ГГц (N1996A-503 и N1996A-506).
- Следящий генератор: от 10 МГц до 3 или 6 ГГц (опция).
- Предусилитель с полосой до 3 или 6 ГГц (опция).
- Средний уровень собственного шума (DANL): -156 дБм/Гц.
- Наилучший в данном классе приборов динамический диапазон с уровнем точки пересечения третьего порядка (TOI) $+18$ дБм.
- Суммарная амплитудная погрешность: $\pm 0,5$ дБ.
- Масса (со встроенным следящим генератором, предусилителем и КСВн-мостом): 7,5 кг.
- Время работы от батареи: 2 часа (2 аккумуляторные батареи опционально).
- Самая высокая в данном классе приборов яркость и разрешающая способность экрана индикатора (диагональ 21 см, XGA, 1024×768).
- Полоса анализа: 24 МГц (опция).
- Электронно-управляемый входной аттенуатор с шагом установки 1 дБ.
- Полосы пропускания от 10 Гц до 200 кГц с шагом установки 1%; фиксированные полосы пропускания 250, 300 кГц, 1, 3 и 5 МГц.
- Интерфейсы USB и LAN.

Типичные настольные анализаторы спектра N9000A серии CXА (рис. 29) относятся к эконом-классу. В России их часто называют «бюджетными», но вряд ли такое название справедливо для этих все же довольно дорогих приборов. Анализаторы спектра N9000A — это типичные серийные приборы на основе унифицированной элементной базы. Архаичный накопитель на гибком диске у них уже отсутствует и заменен USB-накопителем на основе флэш-памяти. Порты USB выведены на переднюю панель прибора. Есть и порт головных телефонов для прослушивания радиостанций. Особо следует отметить возможность поставки опций в виде мощных систем компьютерной

математики MATLAB, существенно расширяющих возможности приборов.

Параметры анализатора N9000A CXА:

- Диапазон частот: от 9 кГц до 3 или 7,5 ГГц.
- Абсолютная погрешность измерения амплитуды: $\pm 0,5$ дБ.
- Уровень точки пересечения третьего порядка (TOI): $+13$ дБм.
- Средний уровень собственного шума (DANL): -157 дБм.
- Полоса анализа: 10 МГц (в стандартной комплектации).
- Полосы ПЧ: от 1 до 3 МГц (с шагом 10%), 4, 5, 6 и 8 МГц.
- Предусилитель (опция): до 3 или 7,5 ГГц (чувствительность -157 дБм).
- Измерение мощности в канале, OBW, ACP, CCDF, SEM в базовой комплектации.
- Базовые EMI-измерения, соответствие CISPR 16-1-1 (опция EMC).
- Открытая платформа на базе WIN XP.
- Приложения для измерения: коэффициента шума, фазовых шумов, аналоговых демодуляций, векторных модуляций, MATLAB (базовый и стандартный для обработки сигналов).
- USB 2.0, 100Base-T LAN, GPIB в стандартной конфигурации.

Особо стоит отметить малый уровень шума этих приборов (-157 дБм). Подобными параметрами (но с несколько большим уровнем шума) характеризуются анализаторы спектра N9320A:

- Диапазон частот: 9 кГц — 3 ГГц.
- Предусилитель (опция N9320A-PA3).
- Средний уровень собственного шума (DANL): 144 дБм (с включенным предусилителем).
- Уровень точки пересечения третьего порядка (TOI): $+13$ дБм.
- Полоса пропускания: от 10 Гц до 1 МГц.
- Скорость свипирования: 9,2 мс.
- Яркий 6,5" TFT цветной дисплей.
- Интерфейс на 11 языках, в том числе русском.
- USB-интерфейс.
- Автоматическая настройка и набор автоматических измерений.
- ПО для PC дублирует все элементы управления передней панели прибора, что ускоряет и упрощает анализ.

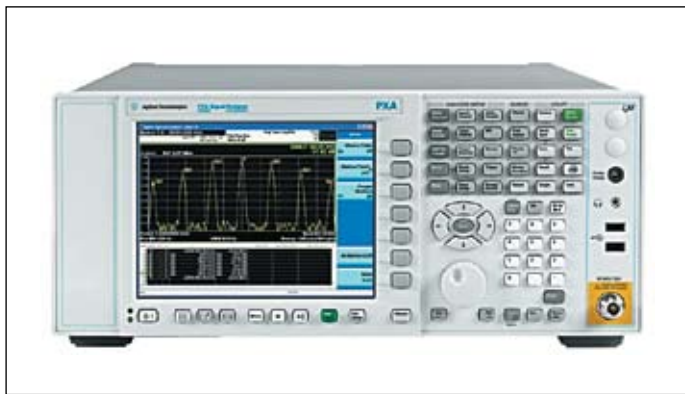


Рис. 30. Внешний вид высокочастотных анализаторов спектра N9030A PXA



Рис. 31. Анализаторы серии E7400A

Серия анализаторов спектра N9030A PXA — это высокочастотные приборы с рекордными показателями по погрешности измерения амплитуды, малому значению среднего уровня собственного шума и высоте точки пересечения третьего порядка. Приборы опционально обеспечивают полосу анализа до 140 МГц. Внешний вид приборов показан на рис. 30.

Параметры анализаторов спектра N9030A серии PXA:

- Диапазон частот: от 3 Гц до 3,6; 8,4; 13,6 или 26,5 ГГц.
- Абсолютная погрешность измерения амплитуды: $\pm 0,19$ дБ.
- Уровень точки пересечения третьего порядка (TOI): +20 дБм.
- Средний уровень собственного шума (DANL): -172 дБм.
- Полоса анализа: 10 МГц (в стандартной комплектации), 25, 40 или 140 МГц (опционально).
- Полосы ПЧ: от 1 до 3 МГц (с шагом 10%), 4, 5, 6 и 8 МГц.
- Предварительный усилитель (опция) во всей полосе частот.
- Измерение мощности в канале, OBW, ACP, CCDF, SEM в базовой комплектации.
- Базовые EMI-измерения, соответствие CISPR 16-1-1 (опция EMC).
- Открытая платформа на базе WIN XP.
- Приложения для измерения: коэффициента шума, фазовых шумов, аналоговых демодуляций, векторных модуляций, MATLAB.
- LXI класса C, SCPI и IVI-COM (совместимость кодов с PSA и 8560).
- USB 2.0, 100Base-T LAN, GPIB в стандартной конфигурации.

Анализаторы серии E7400A (рис. 31) служат для квалификационных измерений на соответствие нормативным требованиям к излучаемым ЭМП (напряженность электромагнитного поля) в диапазоне до 26,5 ГГц. Квазипиковые детекторы и полосы пропускания, удовлетворяющие нормативным требованиям по измерению ЭМП, в сочетании с необходимым для ЭМП набором видов измерений, облегчают оценку уровня ЭМП на стадии разработки продукции. С приборами используются специальные пробники ближнего поля 11940A/11941A.

Agilent Technologies выпускает и портативный (ручной) анализатор спектра N9340B. Он имеет достаточно высокие характеристики для приборов такого класса:

- Оптимизирован для работы в полевых условиях.
- Отличное соотношение цена/производительность.
- Диапазон частот: 100 кГц — 3 ГГц.
- Средний уровень собственного шума (DANL): -124/-144 дБм (без/с предусилителем).
- Уровень фазовых шумов: -87 дБн при отстройке 30 МГц.
- Уровень точки пересечения третьего порядка (TOI): +10 дБм.
- Опции: трекинг-генератор, предусилитель, спектрограмма, адаптер питания от автомобильного прикуривателя и жесткий чехол для переноски.
- Большой яркий LCD-дисплей 7,2" (18,3 см).
- 4 часа непрерывной работы от аккумулятора.
- Графический интерфейс на 11 языках, в том числе русском.
- USB-интерфейс.
- Вес 3,5 кг.

Разумеется, и другие фирмы выпускают анализаторы спектра широкого применения. Нельзя не отметить обширный выбор таких приборов у германской компании Rohde&Schwarz [11]. Фирма производит как простые анализаторы на унифицированной элементной базе, например популярные небольшие FS310/315 с диапазоном частот от 9 кГц до 3 ГГц (FS315 имеет встроенный трекинг-генератор), так и высококлассные настольные модели и миниатюрные (ручные) приборы. Некоторые приборы этой фирмы имеют верхние частоты свыше 100 ГГц и максимальный уровень входного сигнала до +35 дБм. Последнее позволяет напрямую подключать к анализаторам спектра сотовые телефоны и исследовать сигналы их передатчиков.

Заключение

Эта статья завершает серию обзорных статей автора по массовым современным

анализаторам спектра, которые широко внедряются в практику радиотехнических и электронных измерений и в системы тестирования электронных компонентов. Анализаторы спектра в последние годы интенсивно развиваются и становятся основой нового поколения многофункциональных приборов — векторных анализаторов спектра, анализаторов сигналов и цепей. Разумеется, это новое поколение приборов заслуживает дальнейшего самого серьезного рассмотрения. ■

Литература

1. Дьяконов В. П. Современные цифровые анализаторы спектра // Компоненты и технологии. 2010. № 4.
2. Дьяконов В. П. Ликбез по массовым цифровым анализаторам спектра радиочастот // Компоненты и технологии. 2010. № 5, 6.
3. Измерения в электронике: Справочник / В. А. Кузнецов, В. А. Долгов, В. Н. Коневских и др. Под редакцией В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
5. Дьяконов В. П. Современные методы Фурье- и вейвлет-анализа и синтеза сигналов // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2009. № 2.
6. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-Пресс, 2009.
7. Афонский А. А. Новые анализаторы спектра АКТАКОМ // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2008. № 2.
8. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК-Пресс, 2009.
9. Дьяконов В. П. Развитие серии генераторов произвольных функций AFG3000 компании Tektronix и их применение // Компоненты и технологии. 2009. № 11.
10. Контрольно-измерительное оборудование. Каталог-2009 // Agilent Technologies. 70 лет открытий и инноваций.
11. Анализаторы спектра Rohde&Schwarz — www.rohde-schwarz.ru