

МАССОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ СПЕКТРА В ИСПЫТАНИИ ГЕНЕРАТОРОВ СИГНАЛОВ

THE USE OF COMMON DIGITAL SPECTRUM ANALYZERS IN THE TEST OF SIGNAL GENERATORS

Дьяконов В.П. (V. Dyakonov), д.т.н., проф., Смоленский государственный университет

В наше время генераторы синусоидальных и импульсных сигналов широко применяются в самых различных электронных, связанных, радиолокационных, телевизионных и иных устройствах. Используются, как простейшие и давно известные RC- и LC-генераторы с невысокой стабильностью частоты, так и сложные цифровые генераторы на основе прямого цифрового синтеза формы сигналов с высочайшей стабильностью частоты, задаваемой опорными кварцевыми генераторами [1].

Исследование сигналов от генераторов во временной области с помощью осциллографов широко практикуется, но явно недостаточно для всестороннего тестирования генераторов. Так, даже оценка малых нелинейных искажений (примерно до 5%) формы сигнала по осциллограмме практически невозможна. Осциллографы, кроме того, не позволяют обнаруживать и измерять слабые сигналы микровольтового и нановольтового уровня, оценивать ширину и чистоту спектра сигналов, измерять параметры модулированных сигналов.

Куда более продуктивным является анализ сигналов в частотной области, где он выполняется с помощью анализаторов спектра [2-5]. Еще недавно они были редкими и дорогими приборами, мало знакомыми инженерам радиотехнического профиля, студентам и даже научным работникам. Но в наше время ситуация изменилась кардинальным образом — во многих радиотехнических лабораториях анализаторы спектра используются даже чаще, чем электронные осциллографы и при равной с ними полосе исследуемых частот стоят заметно дешевле последних. Это было достигнуто за счет унификации конструкции, интерфейса пользователя и элементной базы анализаторов спектра, работающих в диапазоне частот от звуковых до 3-6 ГГц. Именно этот диапазон частот широко применяется в современной радиовещательной, связанной и телекоммуникационной аппаратуре систем сотовой связи, кабельного и спутникового телевидения и в аппаратуре оборонного назначения.

В данной статье на примере применения одного из самых массовых и относительно дешевых цифровых анализаторов спектра АКТАКОМ АКС-

1301 / 1601 с полосой исследуемых частот от 9 кГц до 3/6 ГГц [4, 5] рассмотрено применение цифровых анализаторов спектра для всестороннего тестирования и контроля генераторов сигналов. Эти анализаторы почти вдвое дешевле анализаторов подобного класса DSA 1020/1030 преуспевающей китайской компании RIGOL. При этом они имеют в несколько раз более высокую стабильность частоты опорного генератора. В них возможно применение трекинг-генератора с частотами от 100 кГц до 3 ГГц, охватывающими все радиовещательные и связанные диапазоны — от длинных, средних и коротких волн до СВЧ.

Близкими характеристиками обладают анализаторы спектра Next NS-30A, R&S FS300/315, анализаторы спектра фирмы LG (серия SA-9**). Подобные анализаторы, как правило, более дорогие, выпускают и другие фирмы, например, Agilent Technologies (серия E4***A). Описанные методы и примеры измерений вполне пригодны и для них.

ОСНОВНЫЕ УСТАНОВКИ АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

Анализатор спектра имеет три основные группы параметров, которые задаются при спектральном анализе кнопками:

FREQUENCY — частотные параметры.

SPAN — полоса частот обзора (нулевая, полная или заданная).

AMPLITUDE — амплитудные параметры (опорный уровень, ослабление аттенюатора, единицы измерения уровня, например: В, Вт, дБм и другие).

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 Start Freq и конечной Stop Freq частот, при этом центральная частота автоматически принимается равной их полусумме.

Задаем центральной частоты и полосы Center Freq и полосы обзора SPAN, при этом начальная и конечная частоты устанавливаются автоматически как Center Freq \pm SPAN/2.

Меню амплитудных параметров содержит следующие установки:

Ref Level — установка опорного уровня (от -90 до +20 дБм).

Attenuation — установка ослабления аттенюатора на входе анализатора (от 0 до 50 дБ с шагом 10 дБ).

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, dBμV, V, W).

Pre Amp — автоматическое (Auto) или ручное (Man) включение встроенного предварительного усилителя, его включение (On) или выключение (Off).

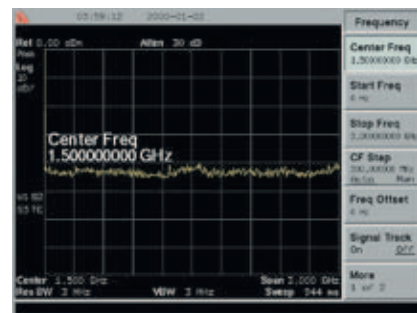


Рис. 1. Экран анализатора спектра по умолчанию

Установка опорного уровня и других амплитудных параметров может быть автоматической (Auto) или ручной (Man). При ручной установке используются цифровые клавиши или поворотная ручка. Если сигнал превышает опорный уровень, то он обрезается сверху и на экране появляется сообщение о перегрузке IF Overload. Этот случай можно устранить смещением опорного уровня или увеличением ослабления аттенюатора. Уровень составляющих спектра (высоты пиков) измеряется в различных единицах, которые задаются в позиции Y Axis Units меню установок уровня. Важное значение имеет и выбор типа детектора в меню I/O DETECT.

Учтите, что уровень сигнала (высоты пиков спектральных линий) и амплитуда синусоидальных сигналов это разные понятия. Уровень сигнала определяется как уровень данной синусоидальной составляющей. Возьмем к примеру синусоиду с амплитудой 0,5 В и двойной амплитудой 1 В. Уровень ее спектрального пика будет равен $0,5/\sqrt{2}=0,5/1,41=0,353$ В или 353 мВ.

Уровень сигнала анализатора обыч-

но задается в децибелах мощности, выделяемой на входном сопротивлении анализатора в 50 Ом:

$$\text{дБм} = 10 \cdot \log(P/P_1), (1)$$

где P_1 это 1 Вт для дБВт, 1 мВт для дБмВт и т. д. Иногда используются и децибелы напряжения:

$$\text{дБн} = 20 \cdot \log(U/U_1), (2)$$

где U_1 = единица измерения напряжения, например, 1 В, 1 мВ, 1 мкВ и т.д. Уровень можно также измерять прямо в ватах и вольтах, но и в этом случае для экрана используется логарифмический масштаб по оси Y. Он увеличивает динамический диапазон по уровню сигнала. А вот масштаб по частоте горизонтальной оси — линейный.

На вид спектра большое влияние оказывают фильтры последней промежуточной частоты и видеочастот (на выходе детектора). Они характеризуются полосами разрешения Res BW (RBW) и VideoBW (VBW). Их установки осуществляются из меню, выводимого кнопкой BW/Avg. Фильтр промежуточной частоты задает ширину пиков спектров, а видеочастот (как и усреднение Average по n спектрам) уменьшает уровень шума анализатора спектра. Но при уменьшении до предельных значений Res BW (до 300 Гц) и VBW (до 10 Гц) заметно возрастает (порой до сотен секунд) время построения спектра Sweep.

НАЧАЛО РАБОТЫ С АНАЛИЗАТОРОМ СПЕКТРА

По умолчанию при первом включении анализатора устанавливается Center Freq = 1,5 ГГц и SPAN = 3 ГГц. Таким образом, реализуется полный просмотр спектра частот в диапазоне частот от 0 до 3 ГГц. Если на вход анализатора ничего не подано, то на экране будет видна лишь шумовая дорожка, расположенная горизонтально, и почти вертикальная полоса в начале спектра (вблизи нулевой частоты). Она вызывает некоторое подозрение, поскольку означает резкий рост уровня составляющих спектра на частотах около граничной частоты 9 кГц и даже выше.

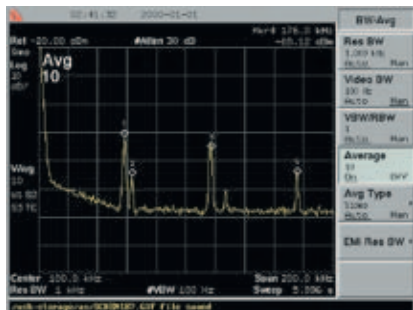


Рис. 2. Экран анализатора в области частот от 0 до 200 кГц

Чтобы выяснить, что за спектр строит анализатор в этой области при отсутствии сигнала (на вход желательно включить 50-омную заглушку), зададим Center Freq = 100 кГц и SPAN = 200 кГц, т.е. просмотрим начальную об-

ласть частот от 0 до 200 кГц (рис. 2). Невозможно заметить, что анализатор спектра, примененный для работы, дает паразитный сигнал на частоте около 58 кГц и его вторую и третью гармоники — на эти частоты установлены 1, 3 и 4. Есть и паразитный сигнал, помеченный маркером 2.

Кнопка Display открывает меню управления дисплеем. На рис. 3 дано сравнение трех спектров сигнала с частотой 1 МГц и полосами RBW = VBW = 3, 10 и 30 кГц. Отчетливо видно, что ширина пика растет с ростом RBW. Для построения трех спектров линиями разного цвета используется меню Trace, вызываемое кнопкой Trace группы кнопок Control.

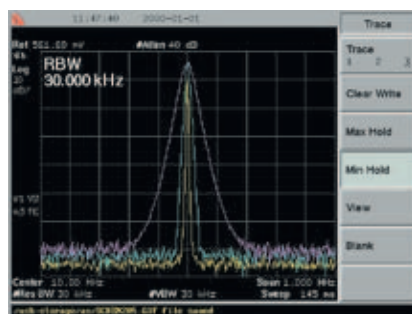


Рис. 3. Три спектра сигнала при разных полосах RBW и VBW

Там же можно найти команду вывода графиков спектров в полноэкранном режиме просмотра. Вид экрана рис. 4 для этого режима показан на рис. 4. К сожалению, данные о параметрах, указанные вокруг окна экрана, относятся только к последней установке параметров.

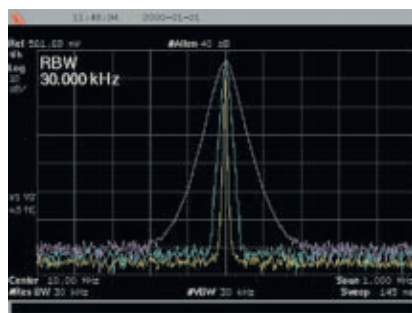


Рис. 4. Пример вывода спектров в полноэкранном режиме просмотра

Полноценные маркерные измерения у анализатора спектра сосредоточены в позиции меню Marker, которая выводится нажатием кнопки MARKER в одноименной группе из трех кнопок. Одновременно с меню появляется сам маркер в виде белого ромбика с номером на пике спектральной линии. Маркер можно перемещать по кривой спектра вращением поворотной ручки. Значение уровня и частоты сигнала в месте расположения маркера выводятся на экран дисплея. Всего можно вывести 4 маркера или 4 пары дельта-маркеров. Дельта-маркером называют два маркера — обычно один опорный IR и один

перемещаемый относительно его. Маркеры снабжены номерами (см. рис. 2).

Меню Marker имеет следующие позиции:

Select Marker — выбор и включение до четырех маркеров.

Normal — установка обычного маркера (с перемещением поворотной ручки и захватом максимума ближайшего пика).

Delta — установка дельта-маркера.

Delta Pair — вывод пары дельта-маркеров с независимым управлением.

Span Pair — задание Span маркеров с независимым управлением.

Off — отключение изображения маркера.

Marker Trace — привязка маркера к кривой спектра.

Readout — вывод вида измерений (Frequency — частота, Period — период, Time — время).

Marker Table — вывод таблицы с параметрами маркеров.

Marker All Off — отключение изображения всех маркеров.

Маркеры обеспечивают гораздо более высокую точность измерений, чем масштабная сетка или курсор. Особенно это касается измерений положения и высоты пиков спектра. Дело в том, что маркер автоматически устанавливается на цифровой отсчет с максимальным или минимальным уровнем и запускает измерение частоты и уровня отсчета цифровыми методами. Например, положение пика измеряется входящим в прибор цифровым частотомером и при удачном выборе условий измерения погрешность может уменьшаться до значений порядка 10^{-6} - 10^{-5} . Конкретные значения погрешности маркерных измерений указаны в техническом описании к прибору и при ответственных измерениях их надо внимательно изучить и учитывать.

ИСПЫТАНИЕ LC-ГЕНЕРАТОРОВ С НЕВЫСОКОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ЧАСТОТЫ

LC-генераторы являются простыми и дешевыми источниками почти синусоидальных сигналов с невысокой стабильностью частоты. Изучим сигнал, который генерирует дешевый генератор GRG-450B фирмы Good Will. Прибор построен на основе LC-генератора и имеет 6 диапазонов, перекрывающих область частот от 100 кГц до 150 МГц. На шестом диапазоне возможно использование «калиброванной» третьей гармоники от 150 до 450 МГц.

Начнем изучение генератора с самой низкой его частоты — 100 кГц. На рис. 3 показан спектр сигнала генератора на этой частоте. При ResBW = 1 кГц и VBW = 100 Гц линия спектра исследуемого сигнала на частоте 100 кГц четко прорисовывается. Зеленая горизонтальная линия дисплея (горизонтальный маркер) позволяет оценить уровень сигнала (-65,47 дБВт), а при необходимости и уровень шума. В конце ли-

нии спектра заметна левая половина пика второй гармоники сигнала. Помеченные маркерами 1, 2, 3 и 4 пики полностью совпадают с показанными на рис. 2 и являются паразитными. Они выявляют несовершенство анализатора спектра в области низких частот.

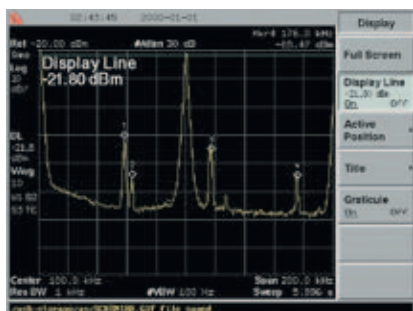


Рис. 5. Спектр первой гармоники синусоидального сигнала с частотой 100 кГц

Отклонения формы сигнала (даже малые) принято оценивать по уровню высших гармоник сигнала. Чтобы выявить амплитуды первых четырех гармоник зададим Freq = 200 кГц и SPAN = 400 кГц. Спектр сигнала для этого случая показан на рис. 6. При этом измеренные уровни задано в вольтах. Отчетливо видны помеченные маркерами три гармоники на частотах 100, 200 и 300 кГц. Все остальные пики на рис. 6 относятся к паразитным сигналам, представленным на рис. 2.

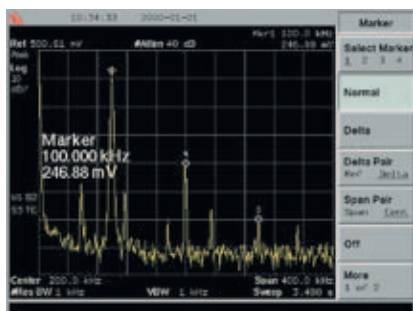


Рис. 6. Выявление первых трех гармоник сигнала с частотой 100 кГц

Искажения сигнала часто оцениваются коэффициентом нелинейных искажений (гармоник):

$$k_2 = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} \cdot 100\% / U_1. \quad (3)$$

Здесь U_1, U_2, \dots, U_n — уровень спектрального пика, первой, второй и т.д. гармоник. Номер гармоник n всегда целое число.

Установив частоту генератора на 1 МГц и нажав кнопку Autoset можно легко обнаружить спектральный пик на этой частоте, точнее на частоте генератора 1,015 МГц (маркер 1). Отличие частот выявляет погрешность установки частоты генератора. Установив маркер 2 на частоту 1,1 МГц можно найти уровень шума сигнала при заданной отстройке от установленной частоты (5 кГц в нашем примере). Уровень шума генератора является важным показателем его качества и стабильности ча-

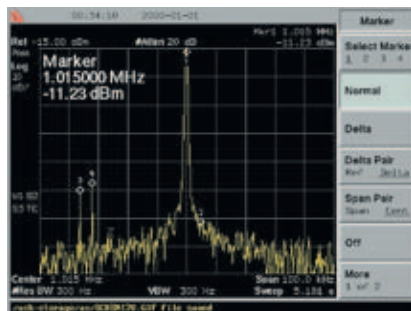


Рис. 7. Спектр LC-генератора на частоте около 1 МГц

сты. Этот уровень заметно выше уровня шумовой дорожки анализатора и говорит о том, что уже на этой частоте высоким качество тестируемого генератора назвать нельзя.

Стоит обратить внимание на наличие помеченных маркерами 3 и 4 явно паразитных пиков, которые нельзя отнести к гармоникам исследуемого сигнала. Эти пики демонстрируют существование так называемых негармонических искажений. Гармонические искажения в виде дополнительных второй и третьей гармоник хорошо видны в составе спектра рис. 8 и помечены курсором 4 и 2 (номер курсора, в общем случае, не совпадает с номером гармоники и задается пользователем).

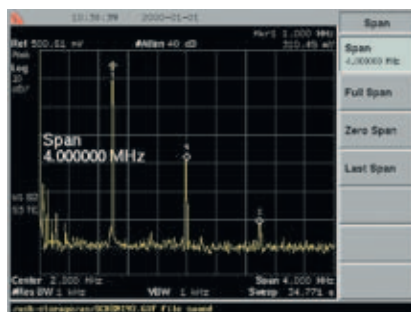


Рис. 8. Спектр из трех гармоник сигнала с частотой около 1 МГц

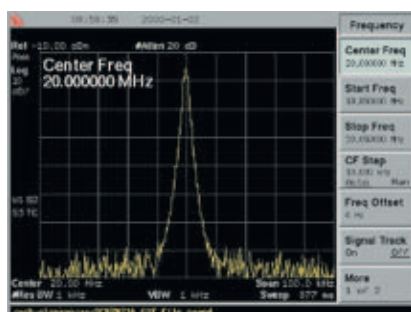


Рис. 9. Спектр сигнала LC-генератора на частоте около 20 МГц

На более высоких частотах можно обнаружить все большее влияние шумов и паразитной модуляции сигнала LC-генератора. Для примера на рис. 9 показан спектр сигнала с частотой около 20 МГц при ResBW=1 кГц и VBW=1 кГц. Пока нестабильность спектрального пика заметна слабо.

Однако на высшей частоте 150 МГц данного генератора нестабильность и

шуму спектра достигают уже совершенно недопустимых величин (рис. 10). Такой вид спектра наблюдается при достаточно малых ResBW=VBW=10 кГц. При этих полосах в 100 кГц пик выделяется, но его форма далека от идеальной (рис. 11).

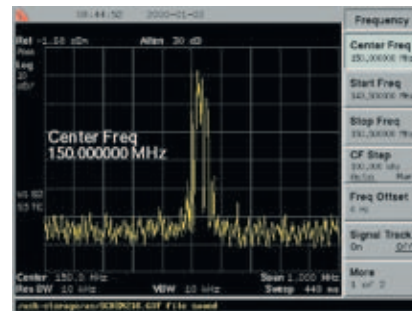


Рис. 10. Спектр сигнала LC-генератора на частоте около 150 МГц при высоком частотном разрешении (10 кГц)

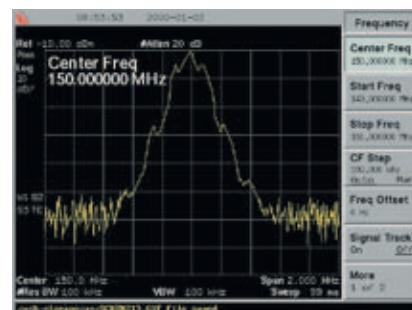


Рис. 11. Спектр сигнала LC-генератора на частоте около 150 МГц при умеренном частотном разрешении (100 кГц)

Генератор GRG-450B может применяться до частот 450 МГц, с использованием третьей гармоники последнего диапазона (50-150 МГц). Несколько обоснована эта рекомендация показывает спектр сигнала в области частоты 450 МГц, показанный на рис. 12 для ResBW=VBW=10 кГц. Вместо четкого пика видны хаотично изменяющиеся пики, занимающие полосу частот около 200 кГц.

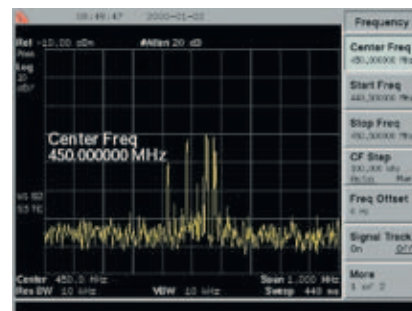


Рис. 12. Спектр сигнала LC-генератора на частоте около 450 МГц при высоком частотном разрешении (10 кГц)

Понижение частотного разрешения на порядок выявляет пик (рис. 13), но назвать его четким язык не поворачивается. Подобные искажения спектра можно объяснить низкой стабильностью частоты и присутствием паразитных амплитудной и частотной модуля-

ций сигнала. Подобный сигнал к измерительным относить нельзя и его можно применять лишь для очень грубой оценки устройств с невысокой избирательностью.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ СИНТЕЗОМ

Теперь изучим возможности анализа спектра для высокостабильного цифрового генератора произвольных функций серии Tektronix AFG3000. Как генератор синусоидального сигнала прибор позволяет получать частоты от единиц МГц до 240 МГц (у старшей модели) со стабильностью, присущей кварцевому генератору. Нестабильность частоты этого генератора порядка $1 \cdot 10^{-6}$, что примерно на 3 порядка ниже, чем генератора GRG-450B. Ограничимся областью изучаемых частот от 10 кГц и выше.

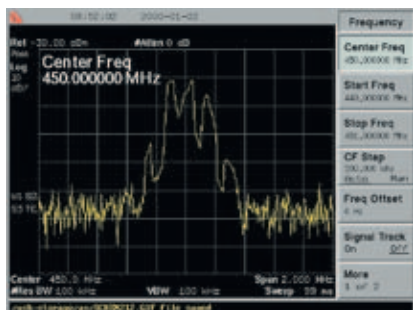


Рис. 13. Спектр сигнала LC-генератора на частоте около 450 МГц при умеренном частотном разрешении (100 кГц)

Сигнал с частотой 10 кГц и двойной амплитудой 1 В анализатор уверенно обнаруживает при использовании автоустановки. После коррекции полос RBW и VBW спектр сигнала выглядит очень даже естественно. Но, контроль маркером амплитуды первой гармоники, показывает, что она в десятки раз меньше ожидаемой (рис. 14). По расчету синусоида с такой амплитудой должна иметь уровень спектрального пика 353,5 мВ, а маркер замеряет значение всего 5,52 мВ. Это означает наличие резкого спада АЧХ. О наличии спада говорит и наклон шумовой дорожки.

Теперь перейдем к проверке спектра генератора на частоте 100 кГц — рис. 15. Амплитуда основной гармоники

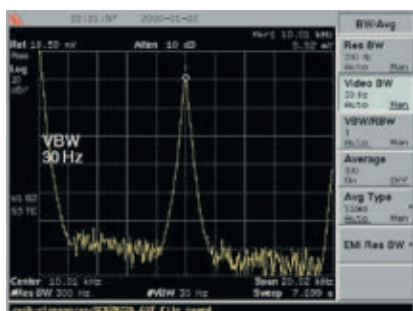


Рис. 14. Спектр сигнала генератора AFG3101 на частоте 10 кГц

ки (маркер 1) составляет теперь 230,67 мВ, что меньше расчетного значения в 353,5 мВ. Хотя спектральный пик на частоте 100 кГц выглядит очень четко, в спектре присутствуют паразитные пики, например, отмеченные маркерами 2 и 3. Они отмечались и ранее.

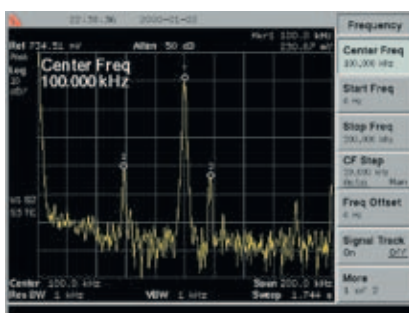


Рис. 15. Спектр сигнала генератора AFG3101 на частоте 100 кГц

На частотах в доли МГц и выше спектр высокостабильного генератора выглядит безупречно — пики стабильны и четко выделяются над шумовой дорожкой (см. примеры на рис. 3 и 4 для частоты сигнала 1 МГц). Из рис. 16 отчетливо видно, что сигнал содержит лишь две гармоники — первую (маркер 1) и вторую (маркер 2). Уровень второй гармоники мал — он примерно на -38 дБ меньше уровня первой гармоники. Более высокие по номеру гармоники практически отсутствуют. Все это указывает на чистоту синусоидального сигнала данного генератора.

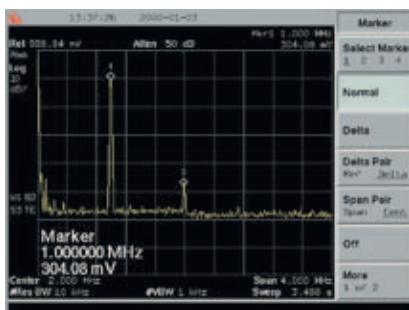


Рис. 16. Спектр синусоидального сигнала генератора AFG3101 с частотой 1 МГц в полосе частот от 0 до 4 МГц

Еще более чистым выглядит сигнал на частоте 100 МГц. У генератора AFG3101 анализатор спектра практически не обнаруживает высшие гармоники. Спектр представлен единственным стабильным и четко выделяющимся пиком. Это говорит о высоком качестве сигнала от генератора AFG3101. Подобный спектр, вплоть до частот в 3 ГГц, имеет цифровой генератор синусоидальных сигналов R&S SM300 — на рис. 17 показан его спектр на частоте 1,5 ГГц.

Проверка модуляции у генераторов Генераторы обычно используют различные типы модуляции сигналов, что позволяет использовать их для передачи информации в радиосвязи. Даже простейшая амплитудная модуляция

(AM) может вызвать проблемы при исследовании спектров сигналов генераторов. Теоретически спектр синусоидального сигнала с модуляцией другим, более низкочастотным сигналом, имеет три спектральные линии — линию несущей частоты f_0 и две линии боковых частот $f_0 - f_m$ и $f_0 + f_m$, расположенные по обе стороны от линии несущей. Например, в радиовещании на коротких волнах частота f_0 лежит в пределах от 1,5 до 30 МГц, а f_m куда ниже — от десятков Гц до десятка кГц. Таким образом, обычно $f_0 \gg f_m$ и при $RBW > f_m$ спектральные линии могут сливаться из-за конечной ширины пиков.

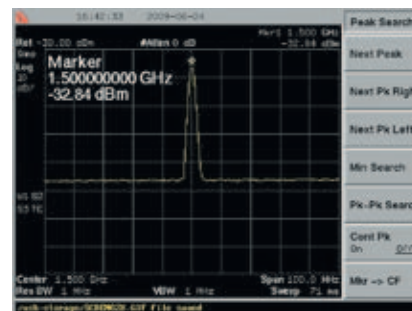


Рис. 17. Спектр синусоидального сигнала генератора с частотой 1,5 ГГц

У простых LC-генераторов амплитудная модуляция обычно сопровождается паразитной частотной модуляцией, как от модулирующего сигнала, так и шумов. При типовой нестабильности частоты порядка 10^{-3} это ведет к размазыванию спектра по частоте, уже начиная с частот в единицы-десятки МГц. Более или менее устойчивый спектр удается наблюдать только на частотах AM-сигналов порядка единиц МГц. Пример такого спектра на частоте 1 МГц генератора GRG-450B показан на рис. 18.

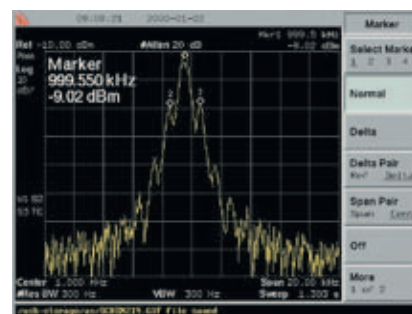


Рис. 18. Спектр AM-сигнала генератора GRG-450B с частотой несущей 1 МГц и частотой модуляции 1 кГц

Вид спектра не очень воодушевляет. Несмотря на применение наименее возможного у данных анализаторов значения $RBW=300$ Гц пики боковых частот хотя и видны, но по основанию сливаются с пиком несущей частоты. Хорошо видно и присутствие второй и третьей гармоник в модулирующем сигнале — они порождают еще две пары пиков, ниже пиков от первой гармоники модулирующей частоты. Налицо и

сильное влияние шума. Несимметричность расположения пиков является признаком паразитной частотной модуляции. Тут стоит отметить, что генератор GRG-450B не претендует на роль генератора стандартных АМ-сигналов — в нем нет даже средств контроля за глубиной модуляции.

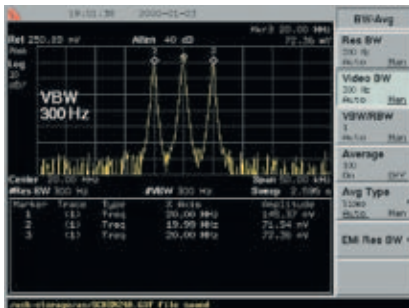


Рис 19. Спектр АМ-сигнала с несущей частотой 20 МГц и 100%-ой модуляцией синусоидальным сигналом с частотой 5 кГц

Четкие спектры АМ сигналов легко строятся только дорогими анализаторами спектра с малыми $RBW < 300$ Гц. Более дешевые анализаторы, описанные в данной статье, способны строить спектры АМ сигналов с частотами модуляции от 0,4 кГц и выше. Для построения спектров использовался, наряду с цифровым генератором AFG3101 (с частотами до 100 МГц), цифровой генератор синусоидальных сигналов R&S SM300 с частотами сигналов до 3 ГГц и с любыми видами модуляции.

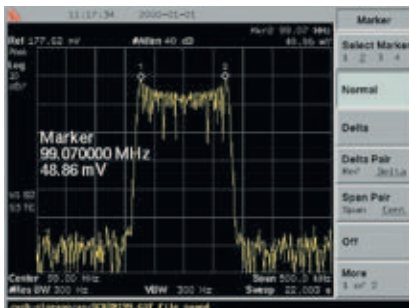


Рис 20. Спектр сигнала с ЧМ, несущей 99 МГц, полосой обзора 500 кГц и девиацией 75 кГц, частота модуляции 1 кГц

На рис. 19 представлен спектр АМ-сигнала с несущей частотой 20 МГц и 100%-ой модуляцией синусоидальным сигналом с частотой 5 кГц. Это соответствует реальному работам радиопередатчиков в КВ-диапазоне волн. На спектре отчетливо видны все три компонента спектра — несущая (маркер 1), левая (маркер 2) и правая (маркер 3) боковые частоты. Амплитуды их легко вычисляются, и параметры маркеров сведены в таблицу под спектром.

Для АМ-сигнала коэффициент модуляции вычисляется по формуле:

$$m = (U_2 + U_3) \cdot 100\% / U_1 \quad (3)$$

Для приведенных на рис. 19 данных (уровней маркеров) $m = 99,2\%$, т.е. практически 100%.

Интересно отметить, что при дан-

ном методе измерения имеют четкие пики составляющих спектра и не требуется. При частоте модуляции 400 Гц и глубине модуляции 50% пики боковых частот еле-еле выделяются. Однако расчет по (3) дает значение глубины модуляции $m = 50,27\%$. Этот случай, пожалуй, является предельным для минимального значения $RBW = 300$ Гц.

Частотная (ЧМ) и фазовая (ФМ) модуляции имеют существенно более широкий спектр. ЧМ широко применяется в радиовещании при несущих частотах порядка сотни МГц и девиации частоты до ± 75 кГц. Ее спектр легко просматривается анализатором при $RBW = VBW = 300$ Гц (рис. 20). Спектр здесь довольно четко ограничен своей огибающей.

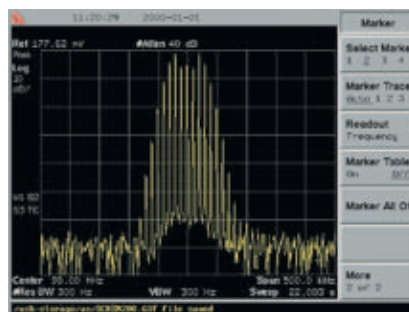


Рис 21. Спектр сигнала с ФМ, несущей 99 МГц, полосой обзора 500 кГц и девиацией 75 кГц, частота модуляции 1 кГц

Спектр фазовой модуляции похож на спектр ЧМ. Такой спектр показан на рис. 21 при частоте модуляции 10 кГц и девиации по фазе 180°. Здесь линии пиков спектра не сливаются, как на рис. 20. Спектр хорошо локализован и дает четкое представление о составляющих сигнала.

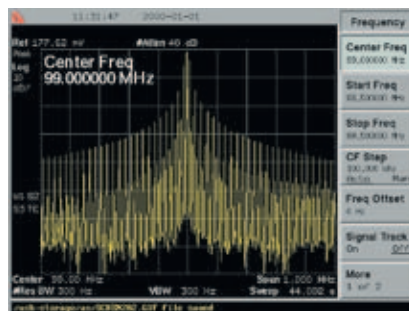


Рис 22. Спектр сигнала с частотной манипуляцией и частотой несущей 99 МГц

Широкий спектр имеют сигналы с частотной манипуляцией (переключением частоты) — рис. 22. Подобный спектр обусловлен скачкообразным изменением частоты. Довольно сложный характер спектра свидетельствует о сложном характере этого вида модуляции. Без анализатора спектра его изучение проблематично.

Анализатор спектра описанного класса имеет специальное микропрограммное обеспечение для проведения расширенных измерений, в том числе контроля АМ и ЧМ сигналов с исполь-

зованием маски — рис. 23. Маска очерчивает области спектральных составляющих, допустимые для применения и оценивает параметры сигналов в них. Так на рис. 23 за пределы маски вышел лишь пик несущей частоты сигнала при модуляции его треугольным сигналом, имеющим только нечетные гармоники. Их спектр и образует боковые полосы этого сигнала.



Рис 23. Контроль АМ-сигнала генератора с применением маски

Приведенные примеры показывают, что даже такие недорогие анализаторы спектра, как описанные, позволяют достаточно полно и точно оценивать свойства и параметры модулированных сигналов. Анализаторы можно использовать для достаточно оперативного (но не в реальном масштабе времени) контроля радиопередающих устройств различного назначения.

ТЕСТИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СПЕКТРАМИ

Импульсные сигналы имеют спектр с большим числом высших гармоник. Теоретическое описание спектров таких сигналов можно найти в учебниках по радиотехнике и в [1 - 4, 8]. Подавать такие сигналы на вход анализатора спектра надо с большой осторожностью. Так, сигналы с большой скважностью могут иметь недопустимо большую амплитуду. Недопустимо наличие постоянной составляющей у импульсных (и иных) сигналов. Сигналы в виде треугольных симметричных импульсов и меандра со скважностью 2 не имеют постоянной составляющей и их можно спокойно подавать на вход анализатора прямо, ограничив амплитуду по мощности на допустимой величине (не более 20 дБмВт). Они имеют только нечетные гармоники.

Часто применяемые несимметричные прямоугольные импульсы имеют постоянную составляющую, которую надо исключить. Например, прямоугольные импульсы с коэффициентом заполнения 0,1 и двойной амплитудой 1 В надо просто задать с верхним уровнем 0,9 и нижним -0,1. Для импульсов с уровнями 0 и 1 В можно также использовать сдвиг уровня генератора $OffSet = -0,1$ В. Установки анализатора, показанные на рис. 24, обеспечивают построение спектра таких импульсов. Он очень напоминает клас-

сический спектр этих импульсов, часто приводимый в учебниках. Но есть отличия: вид огибающей спектра характерен для логарифмического масштаба по вертикали, а спад огибающей амплитуды гармоник происходит не до нуля, а до конечного, но малого, уровня. Внизу хорошо видна шумовая дорожка. В спектре есть как четные, так и нечетные гармоники.

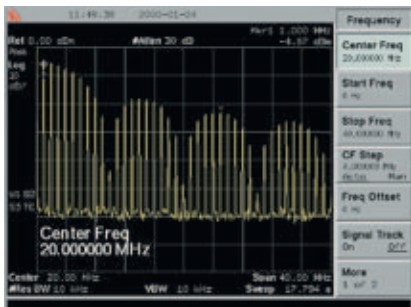


Рис. 24. Спектр прямоугольного импульса с коэффициентом заполнения 0,1

Этот сигнал обладает широким и практически неограниченным (при идеальных перепадах) спектром. Теоретически огибающая спектра периодически обращается в нуль на частотах $1/t_{\text{и}}$, где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса. Поэтому по точкам падения уровня спектральных пиков можно оценивать длительность импульсов. Частота повторения импульсов характеризует густоту спектральных пиков.

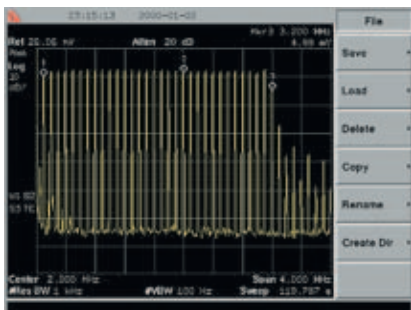


Рис. 25. Спектр сигнала $\sin(t/\tau_{\text{и}})/(t/\tau_{\text{и}})$ при частоте повторения 1 МГц

Важной задачей радиотехники является создание и применение сигналов с ограниченным спектром. Лишь анализатор спектра способен полноценно исследовать сигналы с подобным спектром. Интересными спектральными свойствами обладает сигнал вида $\sin(t/\tau_{\text{и}})/(t/\tau_{\text{и}})$. Теоретически он имеет спектр, у которого амплитуда гармоник постоянна до частоты $f_1 = 1/\tau_{\text{и}}$, где $\tau_{\text{и}}$ — постоянная времени изменения амплитуды, а затем она становится нулевой. Гармоники имеют частоты, кратные частоте повторения импульсов (1 МГц в нашем примере).

Реальный спектр такого сигнала, полученный от генератора произвольных функций AFG3101 фирмы Tektronix, показан на рис. 25. Обрыв амплитуды гармоник, хотя происходит и не идеально, но достаточно резко.

Спектральный пик первой гармоники отмечен маркером. По спектру легко определить временной параметр и, который по осциллограмме сигнала определить трудно.

Этот сигнал очень полезен и для оценки низкочастотной части спектра анализатора. Пример такого применения дан на рис. 26. Он еще раз подтверждает, что в области частот ниже 100 кГц АЧХ анализатора спектра имеет глубокий спад и с ним можно не считаться только начиная с частот 100 кГц и выше. Можно заметить паразитные сигналы по обе стороны от шестого пика.

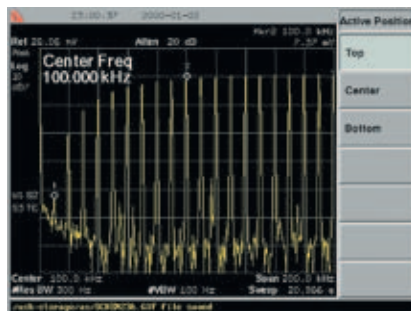


Рис. 26. Контроль низкочастотной области анализатора спектра с помощью сигнала $\sin(t/\tau_{\text{и}})/(t/\tau_{\text{и}})$ при частоте повторения 10 кГц

Нижняя граничная частота анализатора в 9 кГц носит скорее рекламный, чем практический полезный параметр. Хотя, если не считаться с большим спадом АЧХ некоторые спектры можно наблюдать и в этой области (рис. 14, например).

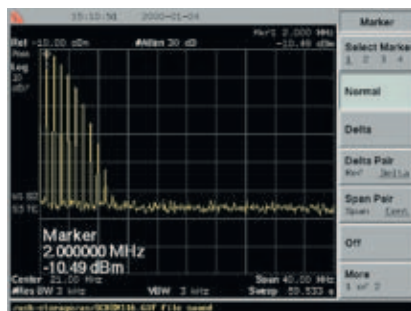


Рис. 27. Спектр импульсов Гаусса

Еще один интересный сигнал — импульсы Гаусса. Спектр такого сигнала (рис. 27) показывает, что после довольно резкого спада амплитуд гармоник их уровень становится пренебрежительно малым. Модуляция таким сигналом ВЧ-сигналов позволяет эффективно решить проблему уменьшения паразитных частот за пределами полосы частот модулированного сигнала. Это важно для многоканальных систем связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные примеры тестирования генераторов, приведенные выше, показывают, что даже массовые цифровые анализаторы спектра, например АКТАКОМ АКС-1301/1601, позволяют

всесторонне исследовать свойства сигналов и генераторов сигналов в частотной, а иногда и во временной областях. И это возможно не только в области СВЧ, но и на довольно низких частотах — вплоть до 100 кГц, а иногда и ниже. К недостаткам дешевых анализаторов можно отнести невозможность снятия быстро изменяющихся спектров в реальном масштабе времени, сильный спад АЧХ уже на частотах ниже 100 кГц и появление в низкочастотной области значительных негармонических искажений и паразитных внутренних сигналов. Для массовых анализаторов спектра радиочастот эти недостатки не выглядят как недопустимые.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК-Пресс. — 2009.
2. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. М.: Горячая линия. Телеком. — 2006.
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. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-Пресс. — 2009.
5. Афонский А. А. Новые анализаторы спектра АКТАКОМ. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2008, № 2.
6. Дьяконов В. П. Развитие серии генераторов произвольных функций AFG3000 компании Tektronix и их применение // Компоненты и технологии, 2009, № 11.
7. Анализаторы спектра реального времени. Tektronix, www.tektronix.com/rsa.
8. Дьяконов В. П. Современные методы Фурье- и вейвлет-анализа и синтеза сигналов. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2009, № 2.

Nowadays the generators of sinusoidal and pulse signals are widely used in various electronic, communication, radar, broadcasting and other devices. This article describes the use of digital spectrum analyzer for comprehensive testing and control of signal generators. As an example one of the most popular and relatively cheap digital spectrum analyzers АКТАКОМ АКС-1301/1601 with the band frequencies from 9 kHz to 3/6 GHz is given.