

Продолжение. Начало в № 4`2012

Линейка отечественных анализаторов спектра «СК4-БЕЛАН 140/240/280/400» до 40 ГГц

Сергей БЕЛЬЧИКОВ, к. т. н.
Анатолий БЕЛЬЧИКОВ, д. т. н.
Андрей ДЗИСЯК, к. т. н.

Вторая часть статьи продолжает сравнительный анализ лучших анализаторов спектра до 40 ГГц. Основной упор сделан на рассмотрении динамических характеристик приборов.

Динамика

Когда речь заходит о понятии динамического диапазона в анализаторе спектра, становится ясно, что одного единственно верного определения динамического диапазона не существует. Достаточно часто имеет место ситуация, когда специалисты, сравнивающие динамические характеристики различных спектроанализаторов, в действительности имеют смутное представление о предмете сравнения. Наша точка зрения заключается в том, что термин «динамический диапазон» применительно к анализатору спектра является многокомпонентным, то есть включает в себя несколько подвидов «динамического диапазона» (ДД). Каждый из этих подвидов важен и зависит от разных аппаратных частей прибора. Перечислим важнейшие подвиды ДД:

1. Диапазон измерения уровня сигнала — от максимального до минимального.
2. Диапазон от точки компрессии 1 дБ до уровня шумов.
3. Максимальный односигнальный динамический диапазон.
4. Диапазон, свободный от случайных комбинационных составляющих (Spurious Free Dynamic Range, SFDR).
5. Диапазон, свободный от гармонических искажений.
6. Диапазон, свободный от интермодуляционных искажений 3-го порядка.

Сравнение по ДД типа (1) провести очень легко: все современные анализаторы спектра до 40 ГГц могут измерять максимальный сигнал в +30 дБм без внешних аттенюаторов, поэтому сравнение по диапазону измеряемых уровней сигнала сводится к сравнению среднего уровня собственных шумов.

Часто пользователи интересуются ДД типа (2). Наша точка зрения заключается в том, что для современного анализатора спектра определение ДД как диапазона от точки компрессии до уровня собственных шумов

лишено особого смысла. Поясним, что имеется в виду. ДД типа (2) зависит от параметров блока 1, а также от блока 3 (рис. 1). Динамический диапазон, связанный с точкой компрессии, является важным критерием качества аналогового тракта, который исторически являлся для спектроанализатора определяющим. Однако сегодня ситуация сильно изменилась: аналоговый тракт в современном анализаторе спектра заканчивается АЦП. При этом на нынешнем уровне компонентной базы характеристики аналогового тракта могут существенно превосходить параметры АЦП. У АЦП есть такой параметр, как «полная шкала», которая, как правило, соответствует межпиковому значению 2–3 В. Когда на вход АЦП поступает напряжение, превышающее уровень полной шкалы, возникает перегрузка и измерение сигнала становится невозможным. Рассмотрим ситуацию, когда мы подаем на вход спектроанализатора сигнал с уровнем, равным «опорному» в анализаторе спектра (верхняя граница логарифмической масштабной сетки). Аналоговый тракт преобразования частоты при подаче на вход прибора сигнала, равного «опорному уровню», обязан находиться в линейном режиме. А с точки зрения блока 3 (рис. 1), «опорный уровень» в анализаторе спектра означает определенное напряжение, которое приходит на вход АЦП, и это напряжение остается неизменным, если опорный уровень переключается с заданным шагом (например 10 дБ). Постоянная величина напряжения контролируется в блоке УПЧ за счет регулировки коэффициента усиления в широких пределах в сочетании с переключением входного СВЧ-аттенюатора. Наличие постоянного известного значения напряжения на входе АЦП хорошо тем, что позволяет максимально использовать доступный динамический диапазон АЦП для измерения, а также получить параметры SFDR в соответствии со спецификацией на АЦП. Однако это одновременно означает, что если мы, желая

определить точку компрессии аналогового тракта, начнем подавать сигнал выше опорного уровня, то с большой вероятностью достигнем полной шкалы АЦП быстрее, чем сам тракт начнет компрессировать.

Для прибора «СК4-БЕЛАН 400» точка компрессии аналогового тракта составляет более +13 дБм. С учетом входного аттенюатора на переключатель каналов (первый узел, который может компрессировать) не может приходиться больше 0 дБм в случае, когда сигнал равен опорному уровню. Таким образом, запас до точки компрессии аналогового тракта при перегрузке (превышении опорного уровня) составляет минимум 13 дБ, а запас до полной шкалы АЦП составляет типично 6 дБ. Точка компрессии аналогового тракта может иметь смысл для современного прибора в случае, когда на вход анализатора подаются два сигнала — исследуемый и мешающая помеха большого уровня. В этом случае ДД по точке компрессии должен нормироваться в двухтональном режиме. Однако сравнение по ДД типа (2) в двухтональном режиме провести затруднительно, поскольку соответствующие данные можно найти только у Agilent.

Максимальный односигнальный динамический диапазон (ДД вида (3)) — это параметр, который много говорит о классе прибора, потому что зависит сразу от всех трех основных блоков спектроанализатора (рис. 1). Во-первых, аналоговый тракт преобразования частоты (блок 1) должен поддерживать высокую сквозную динамику при всех положениях СВЧ-аттенюатора. У хорошего анализатора спектра сквозная динамика тракта преобразования в РЧ-канале должна быть на уровне 145–148 дБн/Гц (в СВЧ-канале она дополнительно зависит от используемых широкополосных усилителей). Данная динамика должна поддерживаться блоком АЦП (блок 3), который, в идеале, при минимальном фильтре в 1 Гц должен обеспечивать те же 145–148 дБ. Это реально для 16-битных

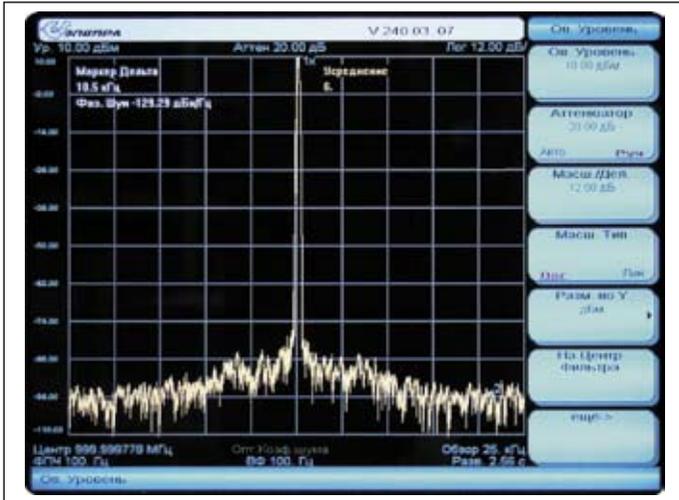


Рис. 9. Фазовые шумы «СК4-БЕЛАН 400» на частоте 1 ГГц
Примечание. В качестве испытательного использовался генератор Anritsu MG3694C/3X. Его собственные шумы ниже ожидаемых шумов анализатора спектра на 10 дБ (–140 дБн/Гц на отстройке 10 кГц).

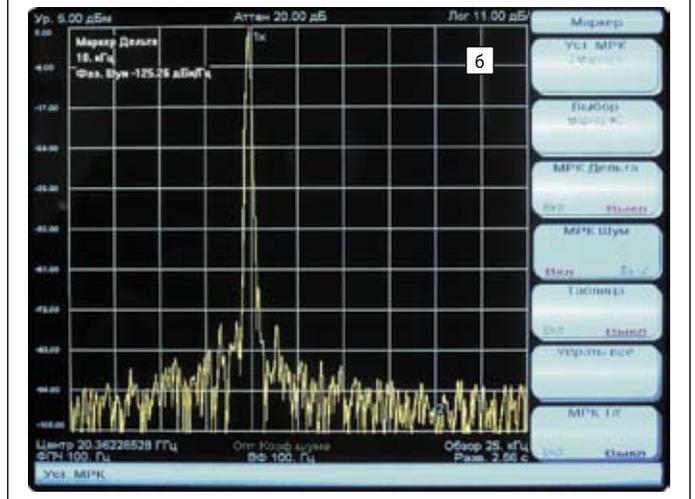
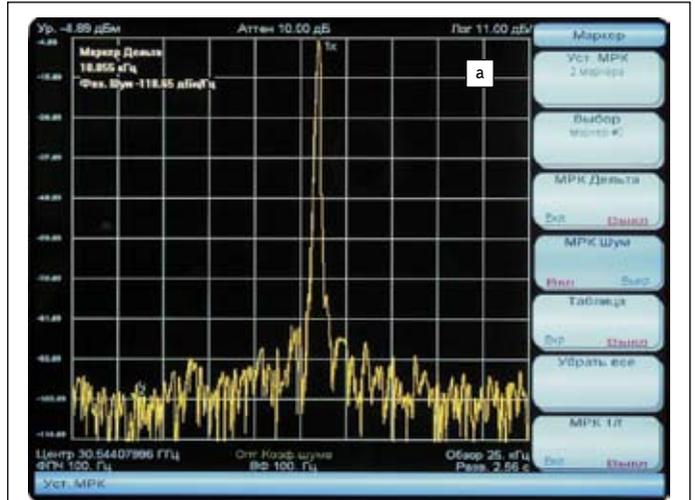


Рис. 11. Фазовые шумы «СК4-БЕЛАН 400» на частоте: а) 20,36 ГГц; б) 30,54 ГГц
Примечание. В качестве испытательного использовался сверхмалощумящий генератор «САПФИР-1018» производства ЗАО ПФ «ЭЛВИРА». Выход генератора был подключен к малощумящему усилителю 10 ГГц на кремниевом биполярном транзисторе, который, войдя в насыщение, обеспечил вторую и третью гармоники с уровнем, позволяющим произвести измерение фазового шума анализатора спектра.

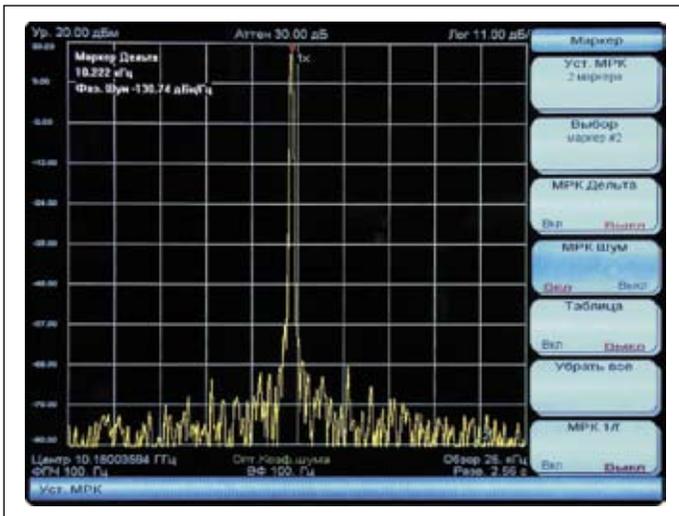


Рис. 10. Фазовые шумы «СК4-БЕЛАН 400» на частоте 10,18 ГГц
Примечание. В качестве испытательного использовался сверхмалощумящий генератор «САПФИР-1018» производства ЗАО ПФ «ЭЛВИРА». Его собственные шумы ниже ожидаемых шумов анализатора спектра более чем на два порядка (–150 дБн/Гц на отстройке 10 кГц).

может выдержать только Agilent PXA. На рис. 9–11 показаны минимальные фазовые шумы «СК4-БЕЛАН 400» на частотах 1, 10, 20 и 30 ГГц.

Сравнительные характеристики по фазовому шуму вблизи несущей разных анализаторов спектра до 40 ГГц сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Сравнение фазовых шумов лучших спектроанализаторов до 40 ГГц вблизи несущей (отстройка 10 кГц)

Название прибора	Частота 1 ГГц, дБн/Гц	Частота 10 ГГц, дБн/Гц	Частота 20 ГГц, дБн/Гц	Частота 40 ГГц, дБн/Гц
PSA E4447A	–118	–112	–106	–100
PXA N9030A-543	–132	–125	–117	–112
8564EC	–114	–108	–104	–100
R&S FSU43	–133	–112	–105	–100
R&S FSQ40	–133	–112	–105	–100
R&S FSV40	–110	–104	–95	–92
Anritsu MS2830A-045	–110	–100	–94	–88
«СК4-БЕЛАН 400»	–128*	–127	–118	–114

Примечание. * Фазовые шумы прибора на данной частоте ограничены вторым гетеродином на фиксированную частоту 4 ГГц, шуми которого суммируются с шумами основного синтезатора. В дальнейшем планируется реализовать дополнительное снижение фазовых шумов второго гетеродина.

АЦП с математической обработкой, но практически невыполнимо для 14-битных. И наконец, данная динамика должна поддерживаться со стороны синтеза (блок 2) в виде низких вносимых фазовых шумов гетеродинов. Причем, поскольку максимальная односигнальная динамика реализуется при минимальных полосах пропускания, с гетеродиной стороны нас будет интересовать полоса отстроек ±100 кГц от несущей. Более широкие полосы неэффективны для анализа с минимальной полосой пропускания из-за большого времени развертки (следовательно, малоинтересны с точки зрения максимального односигнального ДД). Из блоков, определяющих максимальный односигнальный ДД, наибольшие ограничения относятся к блоку 2, а именно — к фазовым шумам синтезированного гетеродина. Реализовать высокую сквозную динамику тракта преобразования и высокую динамику БЦО проще, чем достичь фазовых шумов вблизи несущей на сопоставимо низком уровне (–130 дБн/Гц и ниже).

С точки зрения фазовых шумов гетеродинов, «СК4-БЕЛАН 400» является прибором самого высокого уровня, а конкуренцию с ним

Следует отметить, что топовые модели Rohde&Schwarz (FSU, FSQ) в РЧ-диапазоне для дополнительного снижения фазовых шумов понижают частоту гетеродина путем деления частоты основного синтезатора и используют дополнительный преобразователь частоты (что в некоторых режимах может означать появление зеркального канала, который программно скрыт от пользователя). Это позволяет снизить фазовые шумы в диапазоне до 1 ГГц, но в СВЧ-диапазоне параметры фазового шума основного синтезатора FSU/FSQ оказываются значительно хуже, чем у Agilent PXA и «СК4-БЕЛАН 400» и хуже, чем можно было бы ожидать, глядя на спецификацию Rohde&Schwarz на частоте 1 ГГц. Только появившаяся на момент публикации модель FSW (которую мы не включили в сравнение из-за отсутствия частотного диапазона 40 ГГц), в отличие от FSU/FSQ, имеет СВЧ-гетеродин с параметрами фазового шума на уровне PXA и «СК4-БЕЛАН 400» (–128 дБн/Гц на частоте 10 ГГц отстройка 10 кГц), а в РЧ-диапазоне их превосходит за счет использования дополнительного преобразователя и деления частоты основного синтезатора, достигая фазового шума в –137 дБн/Гц. В ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» проведен опыт по аналогичному делению частоты основного синтезированного гетеродина с использованием отдельного РЧ-преобразователя. Полученный результат составляет менее –145 дБн/Гц для входной частоты 1 ГГц (отстройка 10 кГц). К сожалению, используемый на момент публикации в «СК4-БЕЛАН 400» 14-битный АЦП не позволяет отображать на экране односигнальную динамику такого уровня. После внедрения 16-битного АЦП, поддерживающего динамику выше –140 дБ/Гц (вторая половина 2012 г.), в перечень опций для «СК4-БЕЛАН 400» будет добавлена опция дополнительного снижения фазовых шумов для РЧ-диапазона (от 9 кГц до 3 ГГц).

Параллельно в ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» ведутся опытно-конструкторские работы по созданию уникального малошумящего синтезатора СВЧ-диапазона «Г7-САПСИНТ 200» (10 МГц–20 ГГц), использующего в качестве опоры сверхмалошумящий генератор на частоте 10 ГГц на лейкоапфировом резонаторе с комбинированной системой стабилизации. На рис. 12 показан измеренный фазовый шум прототипа этого синтезатора (Agilent E5052A) на частоте 10 ГГц. Очевидно, что он примерно на два порядка превосходит уровень современных high-end синтезаторов частот ведущих зарубежных производителей. Однако на момент публикации уверенности в целесообразности использования такого синтезатора в качестве гетеродина СВЧ-анализатора спектра у авторов данной статьи нет. Сдерживающим фактором являются, с одной стороны, результирующие стоимостные характеристики при-



Рис. 12. Фазовые шумы прототипа синтезатора «Г7-САПСИНТ 200» на частоте 10 ГГц
Примечание. Измерение проводилось на приборе Agilent E5052A путем измерения сигнала ПЧ, полученного на двойном балансном смесителе за счет смещения сигнала 10 ГГц, взятого с выхода «Г7-САПСИНТ 200», с сигналом сверхмалошумящего генератора «САПФИР-1018» (частота 10,18 ГГц).

бора, а с другой — ограничения в сквозной динамике аналогового тракта преобразования в основном канале 3–40 ГГц. Используемые в этом канале широкополосные усилители (рис. 1), выполненные на арсениде галлия, на сегодняшний день не поддерживают фазовых шумов ниже, чем –140 дБн/Гц вблизи от несущей. Усилители же с более низкой фликкерной границей, например на кремниевых биполярных транзисторах, не поддерживают требуемую полосу частот.

Динамический диапазон типа (4) или SFDR зависит от блока 2 и блока 3 (рис. 1). В первую очередь он определяется схемой синтеза первого гетеродина, а конкретно — тем, присутствует ли в системе стабилизации первого гетеродина умножение DDS (или, другими словами, спецификой аппаратно-программной реализации синтезатора малого шага). Однако не следует забывать и о том, что окончательный АЦП также может вносить случайные комбинационные составляющие. Для пользователя случайные дискретные отклики на экране анализатора спектра, порожденные гетеродином и АЦП, не будут отличаться друг от друга. Типичное значение случайных комбинационных составляющих у всех анализаторов спектра высокого уровня составляет –80–85 дБн. Может иметь место ситуация, когда на специфических частотах один анализатор будет лучше другого, а на других наоборот, хуже. Качественное сравнение SFDR на уровнях –90 дБн и ниже произвести крайне сложно не только из-за временных затрат, но также и из-за несовершенства вспомогательной измерительной аппаратуры (например измерительных генераторов). Личный субъективный опыт авторов говорит о том, что анализаторы спектра Agilent несколько выделяются на общем фоне в лучшую сторону с точки зрения минимальных случайных откликов.

Динамический диапазон вида (5) — это тот критерий, по которому можно провести разграничение между анализатором спектра и измерительным приемником. Он характеризует устойчивость аналогового тракта спектроанализатора к гармоническим искажениям, когда на вход прибора подается идеальный синусоидальный сигнал. Любой преобразователь частоты рождает гармоники, это фундаментальное свойство входящих в его состав нелинейных элементов — диодов или диодных сборок. Чем большее напряжение требуется для открывания диодов (чем мощнее используется сигнал гетеродина), тем меньшего уровня гармоники будут рождаться в смесителе. Очевидно, что снизить гармонические искажения можно за счет уموощнения гетеродинного сигнала. Однако полностью исключить генерацию гармоник можно только за счет преселектора. Преселектор представляет собой систему фильтрации основного колебания сигнала на входе прибора до преобразователей частоты. Преселектором является, например, ЖИГ-фильтр. Поэтому в СВЧ-диапазоне, где у любого анализатора спектра высокого уровня штатно стоит ЖИГ-фильтр (рис. 1), анализатор спектра можно считать измерительным приемником (аппаратно они не отличаются). Формальное различие между измерительным приемником и спектроанализатором проводится по критерию наличия РЧ-преселектора в РЧ-канале (рис. 1). Поскольку в РЧ-диапазоне осуществляется многооктавное частотное перекрытие, селекцию основного колебания невозможно выполнить одним фильтром. В реальности фильтрация осуществляется несколькими фильтрами (числом, как правило, от 7 до 16), часть из которых может быть фиксированными, а часть следящими, между которыми осуществляется коммутация синхронно с ходом развертки. Таким образом, РЧ-преселектор — это технически сложный узел, состоящий из большого количества фильтров и переключателей. Как правило, в преселектор также интегрируется МШУ для компенсации вносимых потерь. Основная задача преселектора состоит в том, чтобы обеспечить фильтрацию гармоник и, с этой точки зрения, он качественно улучшает параметры прибора. Также он может оказать пользу в случаях, когда проводятся измерения малых сигналов в присутствии помех большого уровня. Но только при условии, что помеха не попадает в полосу пропускания преселектора вместе с исследуемым сигналом. Если это происходит (например при измерении интермодуляции), то преселектор вызывает только деградацию точностных характеристик, поскольку входящий в его состав МШУ снижает динамику прибора. Отсюда следует, что РЧ-преселектор должен

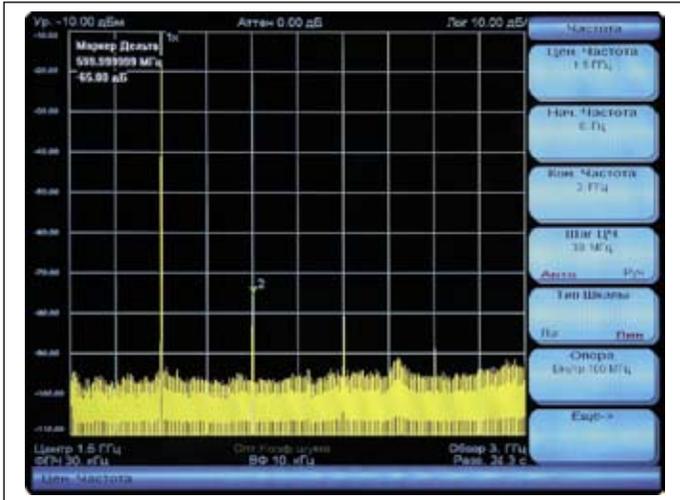


Рис. 13. Измерение гармонических искажений при помощи анализатора спектра «СК4-БЕЛАН 400»

быть отключаемым, что и выполняется в современных измерительных приемниках (Rohde & Schwarz ESU, Agilent N9038A). Сравнивая лучшие анализаторы спектра до 40 ГГц по ДД типа (5), можно сказать, что все они будут иметь приблизительно одинаковый уровень гармонических искажений в СВЧ-диапазоне (диапазон двукратного частотного преобразования (рис. 1)) за счет наличия ЖИГ-фильтра. В РЧ-диапазоне (диапазон трехкратного преобразования) по гармоническим искажениям анализаторы спектра будут проигрывать измерительным приемникам, а величина гармонических искажений будет зависеть от мощности сигнала гетеродина, от того, насколько высокоуровневые диоды используются в преобразователях частоты, а также от общей сбалансированности тракта. Гармонические искажения анализатора спектра (измерительного приемника) удобно нормировать в виде точки пересечения второго порядка (Second Harmonic Intercept Point, SHI) в дБм. Точка пересечения второго порядка — это умозрительная величина, обозначающая уровень сигнала, который нужно подать на вход измерителя, при котором гармонические искажения сравниваются с полезным сигналом. Формула для расчета SHI:

$$SHI = P_{\text{ВХОД}} - P_{\text{ГАРМ}} \quad (1)$$

Типичный результат измерения гармонических искажений на «СК4-БЕЛАН 400» в диапазоне трехкратного преобразования показан на рис. 13.

Данные по SHI (ДД типа (5)) для разных анализаторов спектра до 40 ГГц сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Сравнение лучших спектроанализаторов до 40 ГГц по носимым гармоническим искажениям

Название прибора	Частота 1 ГГц, SHI, дБм	Частота 10 ГГц, SHI, дБм	Частота 20 ГГц, SHI, дБм
PSA E4474A	+51	+86	+90
PXA N9030A-543	+45	+90	Нет данных
8564EC	+40	+90	+80
R&S FSU43	+55	+80	+80
R&S FSQ40	+55	+80	+80
R&S FSV40	+45	+90	+90
Anritsu MS2830A-045	+35	+80	+80
«СК4-БЕЛАН 400»	+50	+90	+90

Динамический диапазон по интермодуляции 3-го порядка является одним из ключевых системных параметров анализатора спектра. Он интересен тем, что определяется всеми тремя основными архитектурными элементами прибора и является своеобразным критерием их класса: он зависит и от линейности аналогового тракта преобразования частоты (блок 1 на рис. 1), и от двухсигнальной динамики блока цифровой обработки сигнала (блок 3 на рис. 1), а также от односигнальной динамики блока синтеза (блок 2 на рис. 1). Когда мы говорили о ДД типа (5), то описывали механизм генерации гармонических искажений в нелинейных элементах тракта. Теперь рассмотрим ситуацию, когда на вход прибора приходят сразу два гармонических сигнала F_1 и F_2 , близко расположенные друг от друга по оси частот. Нелинейные элементы тракта будут рождать гармоники на частотах $2F_1, 3F_1, \dots, nF_1$ и $2F_2, 3F_2, \dots, mF_2$. Эти гармоники будут порождать комбинационные отклики вида $nF_1 \pm mF_2$, где m и n — это целые числа (рис. 14). Порядок искажений определяется суммой n и m . Так, $2F_1 - F_2$ и $2F_2 - F_1$ — это интермодуляционные искажения третьего порядка, $3F_1 - 2F_2$ и $3F_2 - 2F_1$ — пятого, $4F_1 - 3F_2$ и $4F_2 - 3F_1$ — седьмого. Если в борьбе с гармоническими искажениями кардинально помогает фильтрация, то интермодуляционные искажения неудобны тем, что располагаются на оси частот близко к измеряемым сигналам и не могут быть отфильтрованы. В случае анализа современных широкополосных модулированных сигналов ситуация усугубляется тем, что полоса интермодуляционного отклика оказывается шире полосы изначального сигнала в $(n+m)$ раз. Таким образом, широкополосные искажения 3-го, 5-го и 7-го порядка могут накладываться друг на друга, вызывая общее поднятие шума вокруг исследуемых сигналов и деградацию динамики измерения. Обычно в анализаторах спектра нормируют только искажения 3-го порядка, поскольку они имеют самую высокую амплитуду, и если они подавлены до приемлемо низкого уровня, то искажения старших порядков не имеют большого значения.

Спецификация динамического диапазона по интермодуляции 3-го порядка — это та область, где в технической и, особенно, рекламной литературе по спектроанализаторам может присутствовать не вполне корректное, а иногда и намеренно искаженное пре-

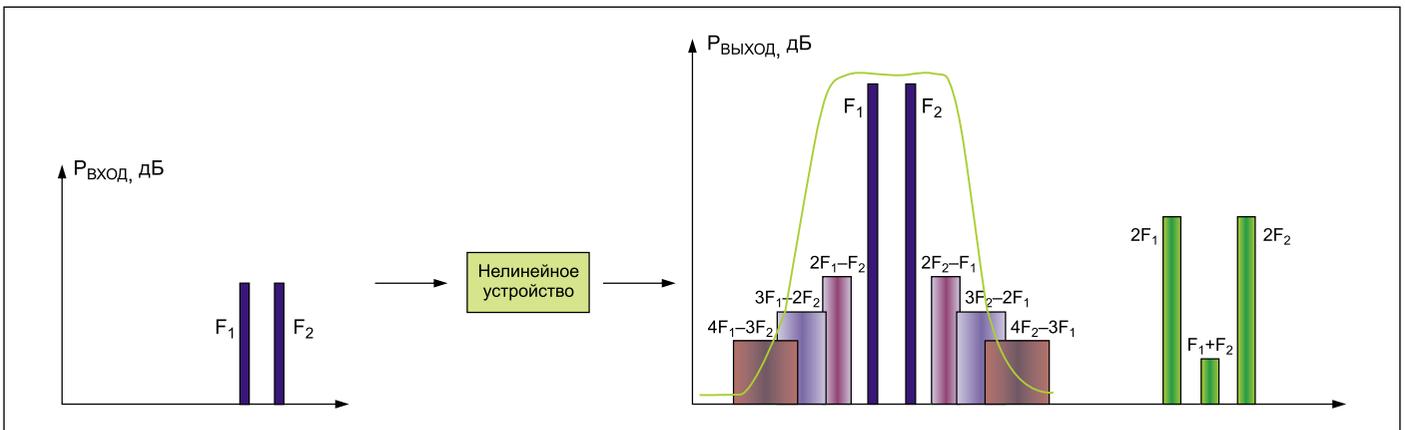


Рис. 14. Схематичное представление генерации продуктов интермодуляции в нелинейном устройстве

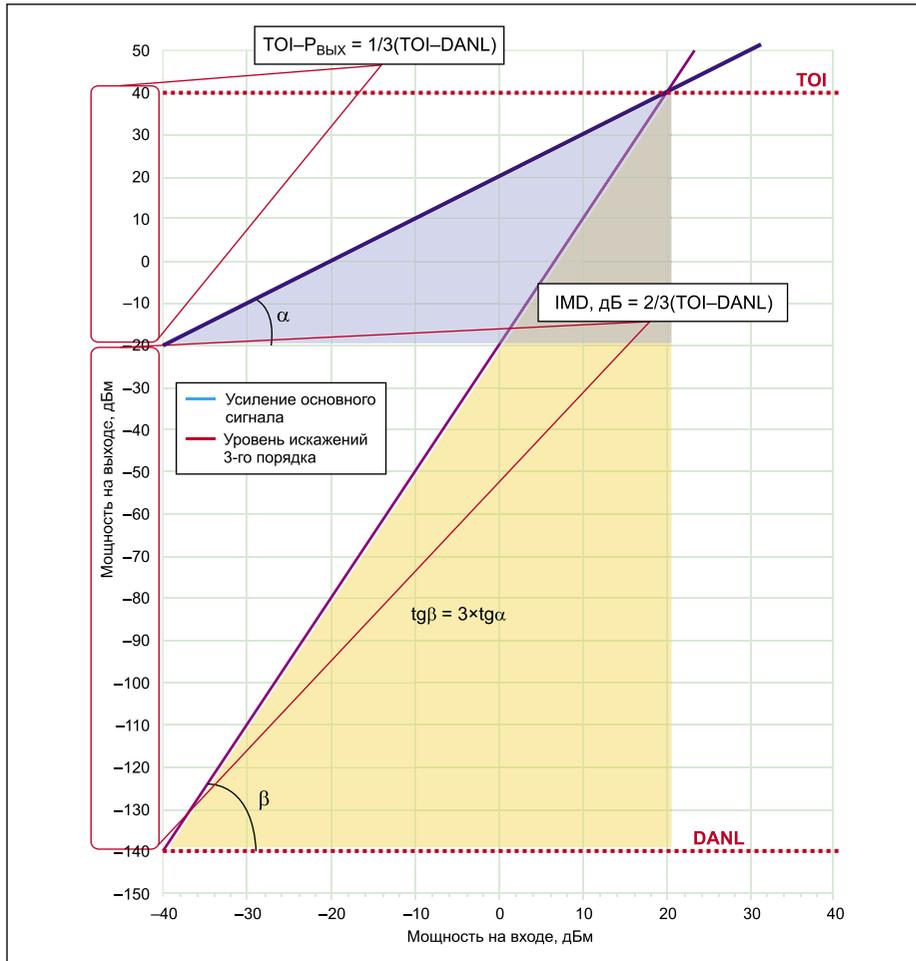


Рис. 15. Графическое представление максимального диапазона по интермодуляции 3-го порядка и TOI для усилителя

поднесение информации. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Интермодуляционные искажения, а также максимальную интермодуляционную динамику системы можно определить, пользуясь понятием точки

пересечения 3-го порядка. Точка пересечения по интермодуляции третьего порядка (Third Order Intercept Point, TOI) — это умозрительная величина, характеризующая уровень двухтонального сигнала, который

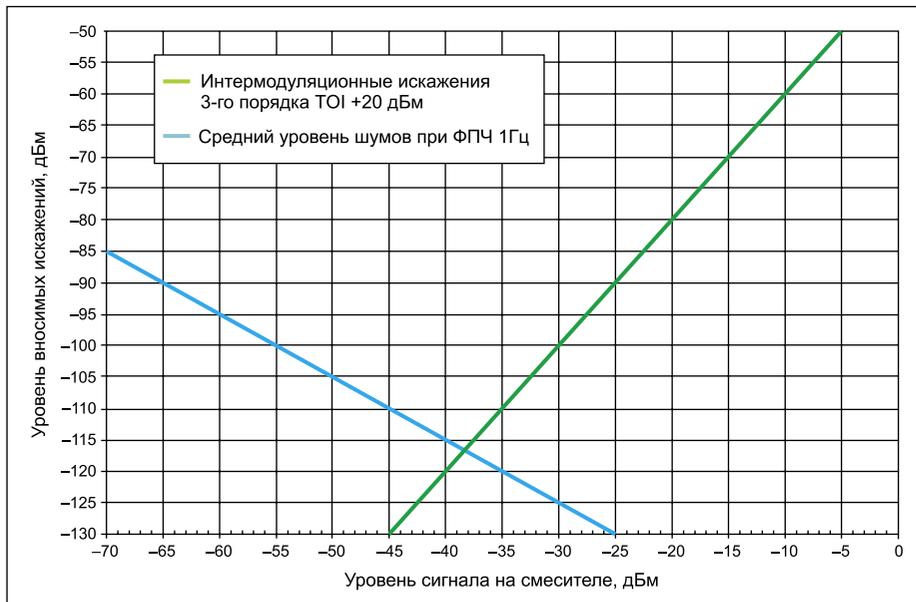


Рис. 16. Графическое представление максимального диапазона по интермодуляции 3-го порядка для анализатора спектра

порождает интермодуляционные отклики равной с ним амплитуды. Для отдельного узла тракта точка пересечения может нормироваться по входу (Input Intercept Point, ИРЗ) или по выходу (Output Intercept Point, ОИРЗ). Указанные термины связаны через коэффициент передачи устройства: так, для усилителя $OIP3 = IP3 + \text{коэффициент усиления}$, для смесителя $OIP3 = IP3 - \text{потери преобразования}$. Для анализатора спектра точка пересечения приводится всегда ко входу и чаще всего называется просто TOI. Взаимосвязь между точкой пересечения, максимальной динамикой по интермодуляции и уровнем интермодуляционных откликов легче всего представить графически (рис. 15).

Из рис. 15 очевидно, что:

$$ДД_{3\text{-го ПОРЯДКА}} = 2/3(TOI - DANL), \quad (2)$$

$$TOI = P_{\text{ВЫХ}} - (IMD_{\text{дБ}}/2). \quad (3)$$

Формулой (2) можно уверенно пользоваться для расчета интермодуляционной динамики при прохождении сигнала через аналоговый тракт. И чаще всего именно эта формула кладется в основу спецификации максимальной динамики по интермодуляции 3-го порядка для анализатора спектра. Например: при TOI в +20 дБм и DANL в -155 дБм/Гц мы получаем, что максимальный ДД по интермодуляции 3-го порядка составляет 116 дБ; эта цифра заносится в спецификацию и может впоследствии служить предметом сравнения. Часто используется более удобное графическое представление (рис. 16), где максимальный ДД 3-го порядка — это точка пересечения графиков DANL и IMD.

Возникает вопрос: может ли пользователь наблюдать эту цифру на экране спектроанализатора? С точки зрения авторов данной публикации, в подавляющем большинстве случаев нет. Для иллюстрации данного ответа рассмотрим спектроанализатор с точки зрения максимальной интермодуляционной динамики (рис. 17) в предельно упрощенном виде, как связку смеситель–усилитель–АЦП.

Допустим, мы хотим реализовать максимальную динамику по интермодуляции на уровне 116 дБ. Какими характеристиками по ИРЗ/ОИРЗ могут похвастать лучшие современные смесители? Для современных широкополосных смесителей предельными являются значения в +35–38 дБм ИРЗ (+27–30 дБм ОИРЗ при типичном коэффициенте передачи -8 дБ). При каком максимальном уровне на выходе смесителя можно обеспечить динамику в 116 дБ? Нас интересует именно максимальный сигнал, чтобы исключить ограничения со стороны шумового пола. Максимальный сигнал, при котором сохраняется динамика 116 дБ, для смесителя с ИРЗ +38 дБм (ОИРЗ +30 дБм) составляет -28 дБм по формуле (3). Далее этот сигнал надо масштабировать в диапазон оптимальных напряжений АЦП (до межпикового значения

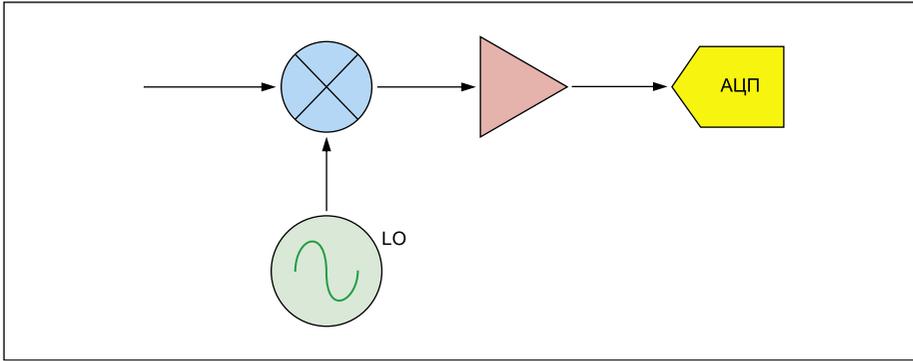


Рис. 17. Предельно упрощенное представление анализатора спектра с точки зрения генерации продуктов интермодуляции

уже в -126 дБн/Гц. При использовании фильтров 1 и 10 Гц любой прибор будет отображать множественные побочные комбинационные составляющие (spurious), присутствующие в его гетеродинном синтезаторе малого шага, которые могут быть выше интермодуляционных откликов, смешиваться с ними и маскировать их. Напомним, что спецификаций побочных комбинационных составляющих ниже -90 дБн у современных анализаторов спектра нет.

Принимая во внимание все факторы, упомянутые выше, мы хотели бы сформулировать ряд критериев достоверности спецификаций максимального ДД 3-го порядка для анализатора спектра. Первое: если у анализатора спектра фазовый шум в полосе отстроек 10–100 кГц хуже, чем заявленная максимальная динамика 3-го порядка, такую спецификацию можно рассматривать как подозрительную. Второе: мы рекомендуем от спецификации фазового шума отнять 10 дБ (чтобы привести односигнальную динамику в полосу 10 Гц) и сравнить полученное значение со спецификацией максимального ДД 3-го порядка. Если односигнальная динамика в полосе 10 Гц хуже спецификации по ДД 3-го порядка, то есть основания проверять подобную спецификацию ДД экспериментально. Третье: имеет смысл проверить разрядность блока цифровой обработки. Если БЦО имеет разрядность 14 бит, то заявленный максимальный ДД 3-го порядка >95 дБ требует экспериментальной проверки, а в случае 16-битного АЦП имеет смысл проверять спецификацию >105 дБ. Субъективное мнение авторов данной статьи заключается в том, что на сегодняшнем уровне схемотехнической и компонентной базы крайне затруднительно реализовать максимальный ДД 3-го порядка более 105 дБ, который можно наблюдать на экране спектроанализатора.

Чтобы не казаться голословными, мы провели ряд практических экспериментов с имевшимися в нашем распоряжении спектроанализаторами. Мы проверили максимальный ДД 3-го порядка в полосе 100 кГц у приборов Agilent E4447A, Agilent 8564EC и «СК4-БЕЛАН 400» на частоте 1 ГГц, где он специфицируется. E4447A, согласно спецификации, имеет

примерно 3 В). Очевидно, что для этого потребуется усиление не менее 30 дБ, то есть два или три каскада усиления. Это означает, что для поддержания динамики в 116 дБ потребуются прогрессивное умощнение по ОИРЗ каждого следующего усилителя до итогового значения выше $+65$ дБм на 50-Ом нагрузке. На сегодняшний день усилители с такими параметрами на рынке отсутствуют (пороговым уровнем является пока $+60$ дБм). Но даже если предположить, что мы смогли донести динамику 116 дБ до АЦП, нас ожидает разочарование: современные 16-битные скоростные АЦП не поддерживают двухсигнальную динамику выше 105 дБ. При этом для АЦП не прослеживается характерная для аналоговых устройств зависимость, когда при снижении уровня двухтонального сигнала на 10 дБ интермодуляционные отклики уменьшаются на 20 дБ. Снижение уровня двухтонального сигнала относительно полной шкалы АЦП в некоторых случаях вызывает вместо снижения, наоборот, рост паразитных откликов. И, как правило, есть некий оптимальный уровень напряжения на входе АЦП, при котором обеспечивается минимальный и постоянный уровень интермодуляционных искажений для идеального двухтонального сигнала. Обратим внимание, что указанные нами ограничения будут иметь место при самых высокоуровневых смесителях, которые, на самом деле, отнюдь не всегда используются в анализаторах спектра. При смесителях с меньшей устойчивостью к IMD, потребуется больше каскадов усиления, что означает больше возможностей растерять максимальный ДД 3-го порядка на усилителях.

Далее, не следует забывать об ограничениях со стороны синтеза. Вполне понятно, что односигнальная динамика или фазовый шум синтезатора в случае желаемого ДД в 116 дБ не должны превышать -116 дБн/Гц вблизи несущей. На самом деле, если анализатор спектра при измерении двухтонального сигнала принимает каждый тон в разные моменты времени (в режиме последовательной развертки или в разных кадрах БПФ), то динамика ухудшается на 3 дБ относительно фазовых шумов гетеродина. Поэтому для ДД

3-го порядка в 116 дБ требуется фазовый шум в -119 дБн/Гц. Другими словами, максимальный ДД по интермодуляции никогда не может быть выше, чем спецификация фазового шума на соответствующей отстройке плюс 3 дБ. Отсюда следует, что фазовый шум, например, в -103 дБн/Гц и максимальный ДД в 110 дБ (что прописывается в некоторых рекламно-технических материалах зарубежных производителей) — взаимоисключающие явления. Кроме того, нужно держать в уме возможность совпадения по абсолютному уровню фазовых шумов и теплового шума. Приведем пример: максимальный ДД 3-го порядка реализуется в приборе при входном уровне в -38 дБм, шумовой пол, ограниченный коэффициентом шума тракта, составляет -155 дБм/Гц, а фазовый шум -120 дБн/Гц. Какой максимальный ДД 3-го порядка может быть реализован? В данном примере мы получим приращение шума вблизи несущей в 3 дБ за счет сложения фазовых шумов и еще в 3 дБ за счет сложения фазового шума с тепловым полом. Таким образом, максимальный ДД будет ограничен на уровне 114 дБ. Также нужно понимать, при какой полосе пропускания реализуется измерение максимального ДД 3-го порядка. В нашем примере с динамикой 116 дБ анализатор с фазовым шумом -116 – -120 дБн/Гц должен будет использовать самую медленную полосу 1 Гц. Чтобы использовать более быстрый фильтр в 10 Гц, анализатор спектра должен иметь фазовый шум

Specifications	PXA	MXA	EXA	CXA	PSA	8564EC	ESA	N9320B	HSA
	N9020A	N9020A	N9010A	N9000A	E444xA	8564EC	E44xxB	N9320B	N9342C
Performance	★★★★	★★★★	★★★	★★	★★★★	★★★★	★★★	*	*
Frequency range	3 Hz - 26.5 GHz	20 Hz - 26.5 GHz	9 kHz - 26.5 GHz	9 kHz - 7.5 GHz	3 Hz - 50 GHz	30 Hz - 50 GHz	100 Hz - 26.5 GHz	9 kHz - 3 GHz	100 kHz - 7 GHz
Warm-up time	30 min	5 min	5 min	30 min	30 min				
Phase noise at 1 GHz (10 kHz offset)	-129 dBc/Hz	-103 dBc/Hz	-99 dBc/Hz	-99 dBc/Hz	-116 dBc/Hz	-113 dBc/Hz	-98 dBc/Hz	-88 dBc/Hz	-89 dBc/Hz ² (30 kHz offset)
Phase noise at 1 GHz (1 MHz offset)	-145 dBc/Hz	-135 dBc/Hz	-132 dBc/Hz	-120 dBc/Hz	-145 dBc/Hz	NA	-127 dBc/Hz	-112 dBc/Hz ²	-119 dBc/Hz ²
Maximum third order dynamic range, 1 GHz	115 dB	116 dB	108 dB	107 dB	113 dB	108 dB	108 dB	93 dB	95 dB
Displayed average noise at 1 GHz	-165 dBm ²	-163 dBm ²	-161 dBm ²	-161 dBm ²	-168 dBm ²	-151 dBm	-153 dBm ^{1.1}	-145 dBm ²	-149 dBm ²
Displayed average noise at 4 GHz	-164 dBm ²	-162 dBm ²	-160 dBm ²	-155 dBm ²	-165 dBm ²	-147 dBm	-148 dBm ²	NA	-148 dBm ²

Рис. 18. Спецификация по максимальному ДД 3-го порядка для анализаторов спектра Agilent

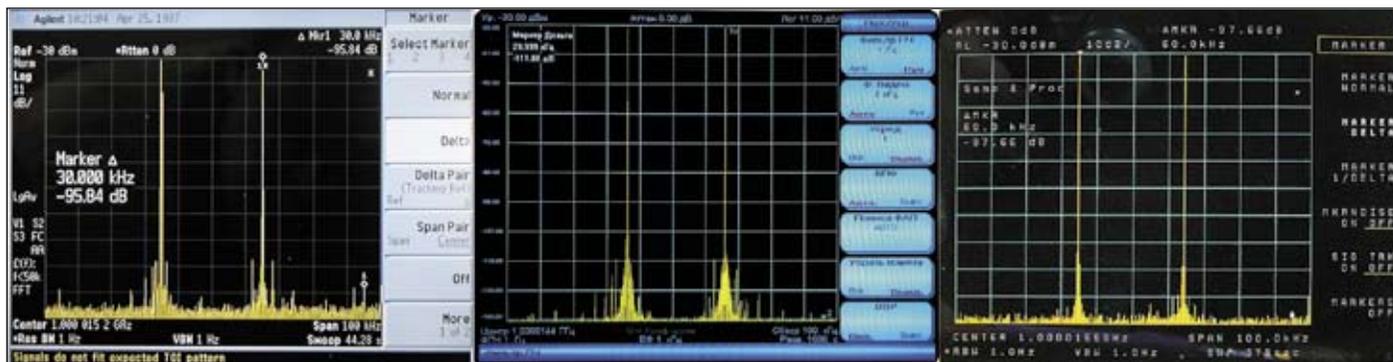


Рис. 19. Измерение максимального ДД 3-го порядка у анализаторов спектра Agilent E4447A, «СК4-БЕЛАН 400», Agilent 8564EC

Примечание. У анализаторов E4447A и «СК4-БЕЛАН 400» вертикальный масштаб составляет 11 дБ на деление, у 8564EC максимальный вертикальный масштаб составляет 100 дБ на экран. В качестве испытательных генераторов использовались два синтезатора частоты Rohde&Schwarz SME06. В качестве сумматора использовался делитель мощности PBR-0006 производства Marki Microwave с развязкой между каналами 40 дБ.

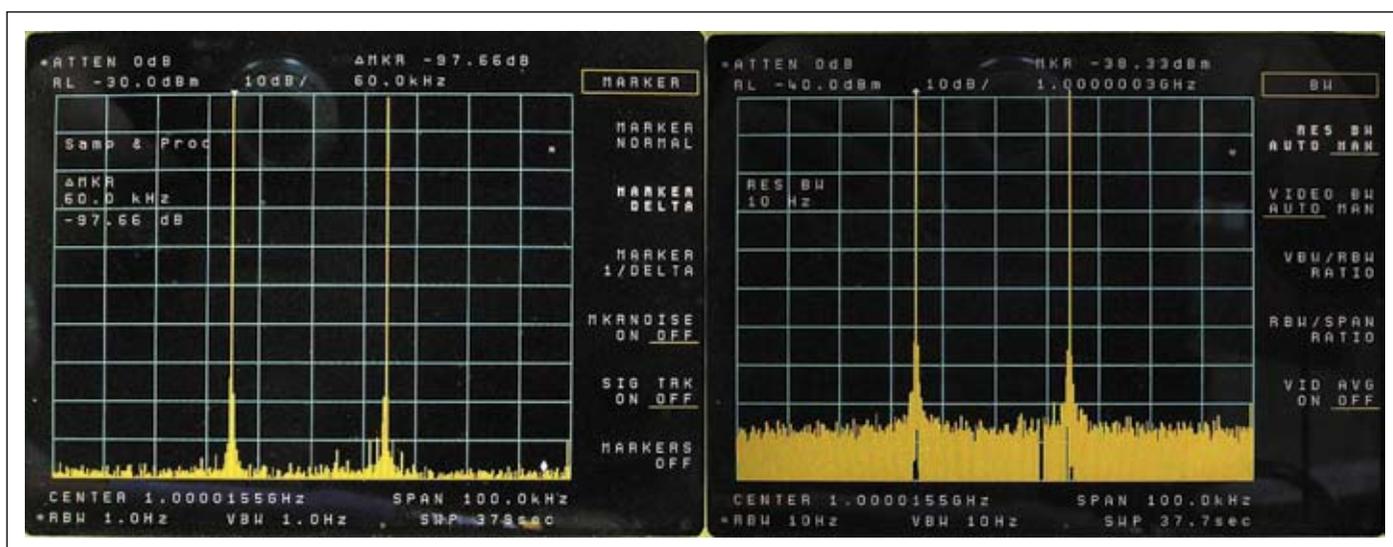


Рис. 20. Проверка максимального ДД 3-го порядка у анализатора Agilent 8564EC в режиме перегрузки

Примечание. На вход прибора подан двухтонный сигнал с уровнем каждого тона -30 дБм. Измерения проведены при опорном уровне анализатора -30 дБм (фото слева) и -40 дБм (фото справа). Видно, что на спектрограмме справа уровень двухтонного сигнала ошибочно занижен.

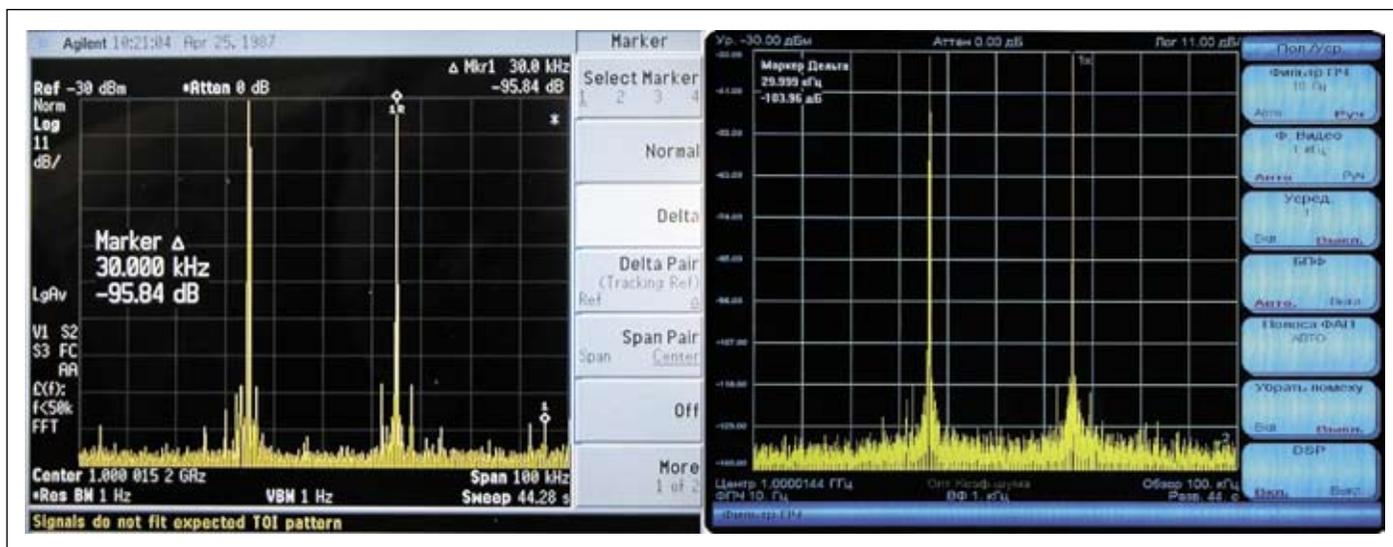


Рис. 21. Измерение максимального ДД 3-го порядка у анализаторов спектра Agilent E4447A (в полосе ПЧ 1 Гц) и «СК4-БЕЛАН 400» (в полосе ПЧ 10 Гц)

Примечание. Лучший фазовый шум «СК4-БЕЛАН 400» позволяет достичь такой же динамики, как и у PSA, при более широкой полосе пропускания и устранить проигрыш в скорости при фильтре ПЧ 1 Гц.

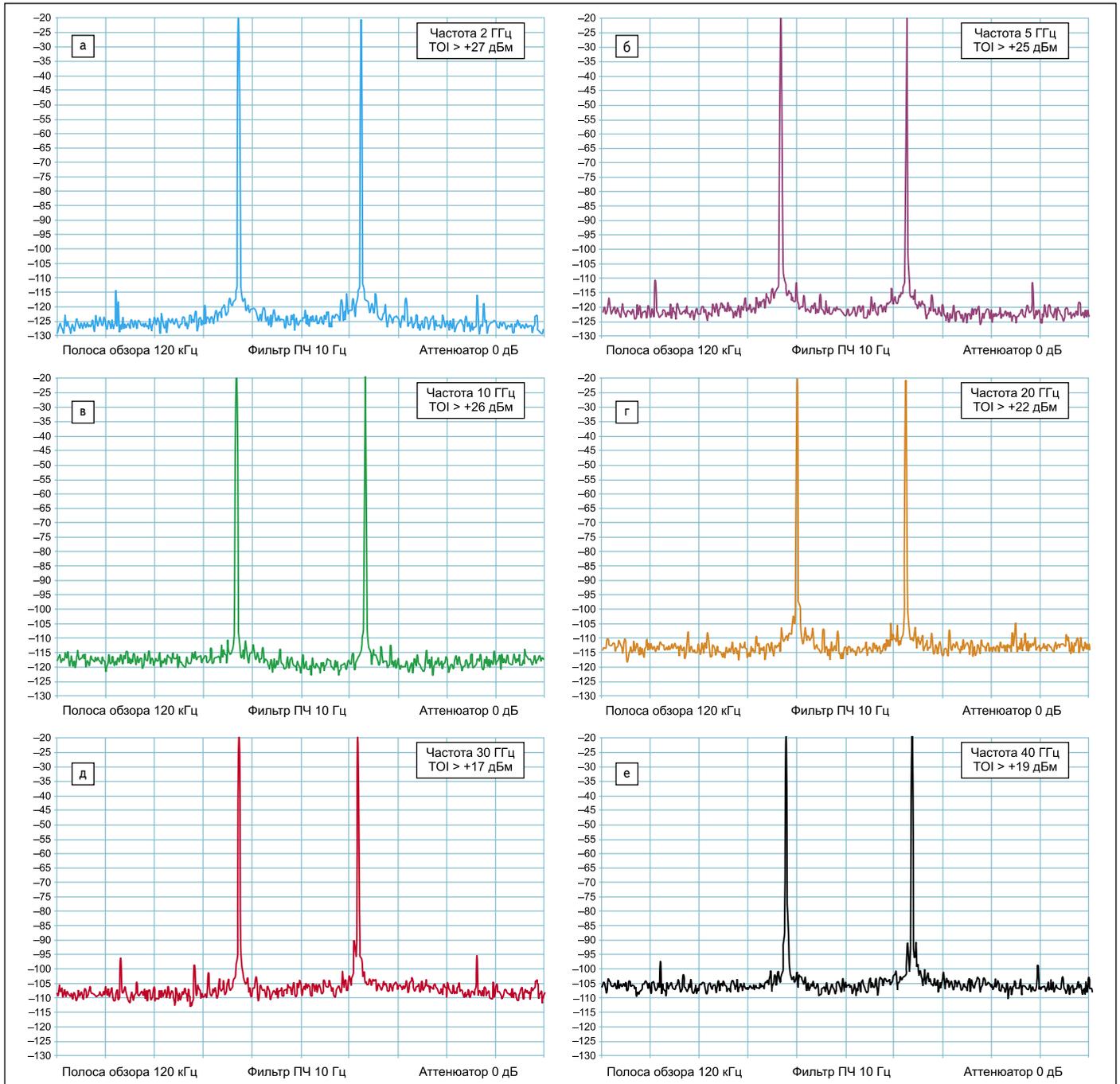


Рис. 22. Результаты измерения TOI у «СК4-БЕЛАН 400» на частотах: а) 2 ГГц; б) 5 ГГц; в) 10 ГГц; г) 20 ГГц; д) 30 ГГц; е) 40 ГГц
Примечание. На вход прибора подавался двухтональный сигнал с уровнем каждого тона –20 дБм.

максимальный ДД 113 дБ, 8564ЕС — 108 дБ (рис. 18), «СК4-БЕЛАН 400» — 100 дБ.

Результат измерения приведен на рис. 19. Очевидно, что он существенно отличается от спецификации. Применительно к прибору 8564ЕС спецификацию ДД в 108 дБ можно поставить под сомнение даже исходя из самых элементарных соображений: прибор не позволяет вывести на экран более 100 дБ, поскольку его максимальный вертикальный масштаб ограничен значением 10 дБ на деление. Можно предположить, что прибор соответствует спецификации в режиме перегрузки, когда ему на вход подается сигнал с амплитудой

больше опорного уровня. Мы провели такой эксперимент, перегрузив анализатор и подняв шумы выше нижней границы логарифмической решетки (рис. 20). Из приведенных спектрограмм следует, что перегрузку прибор не выдерживает (показания уровня в режиме перегрузки ошибочно занижены на 8 дБ). Следовательно, есть все основания признать спецификацию ДД несостоятельной.

На рис. 21 дополнительно показана важность фазовых шумов (односигнальной динамики) анализатора спектра при измерениях максимального ДД 3-го порядка. За счет того, что фазовый шум «СК4-БЕЛАН 400» на 10 дБ

превосходит фазовый шум Agilent E4447A, в отечественном приборе динамика по интермодуляции, аналогичная динамике PSA, реализуется при более широкой полосе пропускания — фильтре ПЧ 10 Гц. Это позволяет устранить проигрыш в скорости, который «СК4-БЕЛАН 400» демонстрирует по отношению к Agilent E4447A при фильтре 1 Гц.

Мы не имели возможности провести практические измерения со всеми анализаторами, параметры которых рассматриваются в данной публикации, поэтому мы не можем утверждать, что все спецификации максимального ДД 3-го порядка не соответствуют

действительности. Однако проведенные эксперименты дают основания критически к ним относиться. Как обычно производится оценка максимальной двухсигнальной динамики спектроанализатора? Измерения с сигналами малого уровня требуют больших временных затрат, часто на уровнях ниже –100 дБ требуется ряд дополнительных исследований, чтобы выяснить природу обнаруженного отклика-паразита: является ли он интермодуляционным, либо же побочной комбинационной составляющей синтеза, либо побочной составляющей АЦП. С точки зрения производства подобные измерения невыгодны. Гораздо проще произвести тестирование на большом двухтональном сигнале (от 0 до –10 дБм), уверенно определить TOI, а затем рассчитать максимальную динамику по формуле (2). Однако расчет максимальной динамики по формуле (2) справедлив только для аналоговых трактов, он не учитывает нелинейных свойств АЦП. Таким образом, можно уверенно утверждать, что если параметр TOI базируется на экспериментальных данных, то параметр максимального ДД 3-го порядка в некоторых случаях — только на теоретических расчетах. Поэтому при сравнении спектроанализаторов по интермодуляционной динамике следует особое внимание обращать на TOI, а термином «максимальный ДД 3-го порядка» следует оперировать с известной долей осторожности. Ценность TOI в том, что данный параметр показывает, при каком максимальном сигнале прибор может выйти на максимальную двухсигнальную динамику, которую поддерживает его АЦП.

«СК4-БЕЛАН 400» с точки зрения аналогового тракта является прибором очень высокого уровня по параметру TOI. В его аналоговом тракте в РЧ- и СВЧ-диапазонах используются высокоуровневые преобразователи с ПРЗ значительно выше +30 дБм, что позволяет обеспечить результирующую точку пересечения 3-го порядка, приведенную ко входу прибора, около +20 дБм или выше во всей полосе частот. Неслучайно в «СК4-БЕЛАН 400» в блоке 2 (рис. 1) для закачки смесителей используются буферные усилители с очень высокой точкой компрессии, работающие в режиме на-

Таблица 6. Параметры лучших анализаторов спектра по интермодуляционной динамике 3-го порядка

Название прибора	Частота 1 ГГц, TOI, дБм	Частота 10 ГГц, TOI, дБм	Частота 20 ГГц, TOI, дБм	Частота 40 ГГц, TOI, дБм	Максимальная динамика* (частота 1 ГГц)
PSA E4447A	+20	+15	+16	+12,5**	113 (96)
PXA N9030A-543	+22	+23	+17**	+13**	115 (нет данных)
8564EC	+11	+7,5	+12,5**	+12,5**	108 (96)
R&S FSU43	+25	+15	+15	+12**	118 (нет данных)
R&S FSQ40	+25	+15	+15	+12**	118 (нет данных)
R&S FSV40	+16	+18	+18	+18	112 (нет данных)
Anritsu MS2830A-045	+15	+13	+13	+13**	112 (нет данных)
СК4-БЕЛАН 400	+25	+25	+22	+19	115 (105)

Примечания.

* Теоретическая максимальная динамика по формуле (2), в скобках — экспериментальная максимальная динамика.

** Значение специфицируется номинально.

сыщения. На рис. 22 показаны данные измерений TOI на частотах 2, 5, 10, 20, 30 и 40 ГГц. Характерно, что в диапазоне двукратного преобразования, где для повышения чувствительности используется широкополосный усилитель, расположенный после него тройной балансный смеситель, обладающий достаточным запасом устойчивости к интермодуляции, обеспечивает отсутствие деградации двухсигнальной динамики.

Оценивая лучшие анализаторы спектра по максимальному ДД 3-го порядка, мы можем сделать следующие субъективные выводы. Предполагаем, что максимальный ДД на частоте 1 ГГц сможет обеспечить прибор Agilent PXA N9030A-543. У него отсутствуют ограничения заявленной динамики со стороны фазовых шумов гетеродинов, он имеет более современный (более высокоразрядный), по сравнению с «СК4-БЕЛАН 400», блок цифровой обработки и, предположительно, наиболее низкий уровень комбинационных составляющих в синтезаторе. Тем не менее, следует отметить, что даже его заявленный ДД в 115 дБ требует тщательной экспериментальной проверки. Примечательно, что на частотах выше 20 ГГц TOI у PXA заметно снижается, а на частоте 40 ГГц нормируется только номинально. Экспериментальные данные, полученные на «СК4-БЕЛАН 400» (рис. 22) во всем диапазоне частот, позволяют говорить о том, что в области миллиметровых длин волн, отечественный прибор будет пре-

восходить PXA по интермодуляционной динамике. У приборов R&S FSU43/FSQ40 очень хорошие данные по TOI и низкий фазовый шум на частотах до 1 ГГц, что позволяет теоретически вывести значение максимального ДД 3-го порядка в 118 дБ. Однако используемый в этих приборах 14-битный АЦП позволяет говорить о том, что указанная динамика также требует верификации опытным путем. На частотах 3–10 ГГц приборы Agilent PSA, «СК4-БЕЛАН 400» R&S FSU/FSQ будут демонстрировать примерно одинаковые результаты по максимальному ДД 3-го порядка (вероятно, несколько хуже, чем PXA). С ростом частоты «СК4-БЕЛАН 400» будет вырываться вперед благодаря значительному преимуществу в уровне фазовых шумов и стабильно высокому значению TOI. Приборы Agilent 8564EC, R&S FSV и Anritsu MS2830A-045 оказываются слабее конкурентов с точки зрения максимального ДД 3-го порядка. Сравнительные данные по интермодуляционной динамике лучших анализаторов спектра обобщены в таблице 6.

Заканчивая рассмотрение ДД типа (6), мы хотели бы обратить внимание пользователей на некоторые некорректные методы расчета максимального ДД 3-го порядка, которые, к сожалению, встречаются в технической литературе. Выше мы говорили о несовершенстве формулы (2) применительно к такому сложному аналогово-цифровому прибору, как анализатор спектра. Однако иногда инженеры по продажам заходят еще дальше и рассчитывают максимальный ДД 3-го порядка по формуле (2), оперируя параметром TOI, взятом в штатном режиме, и величиной DANL, взятой в режиме включенного МШУ. Также в некоторых спецификациях встречается определение максимального ДД 3-го порядка как разности между TOI и DANL (значения >150 дБ, сбивающие с толку пользователя). Следует подчеркнуть, что подобное определение, в отличие от формулы (2), которая имеет физический смысл и справедлива для аналоговых трактов, к реальности никакого отношения не имеет и является исключительно плодом воображения специалистов по маркетингу. ■

Окончание следует