

Динамический диапазон анализаторов спектра: особенности оценки и учета при измерениях

Часть 1

Н. Лемешко, д.т.н.¹, А. Агуреев²

УДК 535.131:621.317 | ВАК 2.2.4

Широко используемым средством оценки характеристик радиосигналов являются анализаторы спектра, один из ключевых параметров которых – динамический диапазон. В первой части статьи рассмотрено понятие динамического диапазона, выявлены факторы, оказывающие определяющее влияние на его значение, приведены формулы для расчета динамического диапазона, учитывающие собственный шум анализатора спектра, нелинейность его тракта, а также фазовый шум.

В настоящее время настройка и диагностика сложных радиотехнических систем невозможна без применения специального измерительного оборудования, предназначенного для анализа радиосигналов. Наибольшей специализацией в этом отношении обладают телекоммуникационные тестеры, предназначенные для оценки соответствия установленным требованиям сигналов, применяемых в системах радиосвязи конкретного стандарта (WiMax, 3G, 4G и др.). Однако такие приборы не отвечают требованиям по универсальности в случае, если необходимо анализировать большое количество сигналов разных стандартов. Исходя из этого, наиболее универсальными средствами анализа радиосигналов являются анализаторы спектра. На аппаратной базе этих приборов зачастую строятся средства углубленного анализа, которые принято называть анализаторами сигналов. Это решение вполне рационально, поскольку линейная часть современных анализаторов спектра (АС) отличается высоким качеством, существенно превосходящим аналогичное для приемных устройств радиосистем, а также широкополосностью, а вся обработка после переноса на последнюю промежуточную частоту выполняется на программном уровне [1]. Следует напомнить, что под линейной частью АС принято понимать тракты, в которых осуществляются фильтрация и переносы по частоте для подлежащего измерениям входного сигнала, и она заканчивается последним перед

аналого-цифровым преобразователем фильтром промежуточной частоты.

Одним из главных требований, предъявляемых к радиоизмерительному оборудованию, является достоверность результатов измерений, то есть их соответствие анализируемым физическим процессам. При этом грань между достоверностью и недостоверностью может быть как весьма резкой, как это свойственно, например, стрелочным приборам, так и незаметной, и в последнем случае требуется установить ее четкие критерии. Помимо базовых условий эксплуатации любых радиоизмерительных приборов, в том числе и анализаторов спектра, для сохранения достоверности результатов измерений необходимо, чтобы уровень входного сигнала лежал в некотором интервале, который принято называть динамическим диапазоном [2, 3].

Динамический диапазон (ДД, англ. Dynamic Range, DR) является одной из ключевых характеристик АС и характеризует их способность одновременно обрабатывать сигналы, существенно различающиеся по мощности. Случаи таких измерений встречаются:

- в радиолокации, где оцениваются характеристики излученного и отраженного сигналов;
- в системах радиосвязи с временным разделением восходящего и нисходящего каналов (4G, 5G);
- в системах спутниковой и закрытой радиосвязи;
- в технических средствах обнаружения и защиты от утечки информации по каналам, связанным с побочными электромагнитными излучениями и наводками.

Учитывая важность не столько понятия ДД, сколько получения правильных результатов измерений

¹ АО «Корпорация «Комета», начальник отдела, nlem83@mail.ru.

² ФГУП «НПП «Гамма», руководитель направления контрольно-измерительной техники, agureev.ay@nppgamma.ru.

в упомянутых приложениях АС, рассмотрим суть и особенности учета и экспериментального определения динамического диапазона. При этом следует помнить, что его значение обычно не указывается в эксплуатационной документации, поскольку существенно зависит от характера измерений и настроек АС.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН АС

В АС линейная часть работает по аналогии с обычными радиоприемниками, с переносом по частоте. Нижняя граница ДД определяется совокупностью собственного теплового шума и фазового шума гетеродинов. Верхняя граница может устанавливаться либо точкой компрессии 1 дБ, либо уровнем интермодуляционных продуктов, возникающих при перегрузке линейной части АС и проявляющихся на отображаемой спектрограмме. Собственно говоря, это и есть критерии для определения допустимых границ входного сигнала для АС при условии сохранения достоверности результатов измерений. Исходя из этого, очевидно, что при произвольных настройках ДД нельзя приравнять к диапазону отображения. Действительно, при уровнях сигнала, близких к максимально допустимому значению, используется дополнительное ослабление, которое повышает уровень отображаемого шума. В свою очередь, минимальный уровень шума будет достигнут, когда ослабление встроенного аттенюатора минимально и в идеале равно нулю, но этот режим ухудшает условия согласования АС по входу с подключаемым оборудованием. Для снижения уровня отображаемого шума в режиме минимального ослабления целесообразно использовать встроенный предварительный усилитель АС, который также способен ухудшать согласование и несколько увеличивать амплитудную погрешность.

Верхняя граница максимального ДД лежит ниже предельного отображаемого уровня сигналов и определяется точкой компрессии 1 дБ (рис. 1), однако при этом возникает семейство отображаемых спектральных составляющих весьма существенного уровня и не имеющих никакого отношения к структуре спектра измеряемого сигнала, в том числе и при работе с небольшой полосой обзора. В результате этого такие спектрограммы лишаются достоверности, что недопустимо. Ситуация еще более ухудшится, если АС реализует два или три переноса по частоте. Ввиду этого в современных АС предусматриваются ограничения опорного уровня, который при выбранном ослаблении входного аттенюатора должен оставаться существенно ниже точки компрессии 1 дБ.

Из изложенного следует важный вывод о том, что максимальный динамический диапазон может быть реализован лишь в очень узком круге измерений,



Рис. 1. Качественное соотношение диапазона отображения, максимального динамического диапазона и динамического диапазона, в котором уровень гармоник и продуктов интермодуляции незначителен

когда формирование интермодуляционных составляющих значительного уровня невозможно. В частности, это случаи измерения моногармонических сигналов и фазовых шумов на значительном удалении от несущей.

Интермодуляционные и гармонические составляющие являются нежелательными продуктами работы линейного тракта АС. Ввиду этого наиболее качественные результаты измерений будут соответствовать случаю, когда они являются пренебрежимо малыми, что соответствует невысокому уровню сигнала на смесителе. Но снижение последнего приводит к ухудшению отношения «сигнал – шум», что может не позволить провести некоторые виды измерений, например, на соответствие радиосигналов установленной спектральной маске. Ограничение ДД сверху, вызванное интермодуляционными или гармоническими составляющими, в общем случае достигается при разных уровнях входного сигнала, следовательно, оно будет характеризовать разные значения ДД. При этом критерий определения достижения входным сигналом предельного уровня состоит в равенстве указанных составляющих уровню шума, что соответствует максимуму ДД, свободного от продуктов интермодуляции. Таким образом, значение ДД меняется при изменении уровня сигнала на входе АС и должно иметь экстремум.

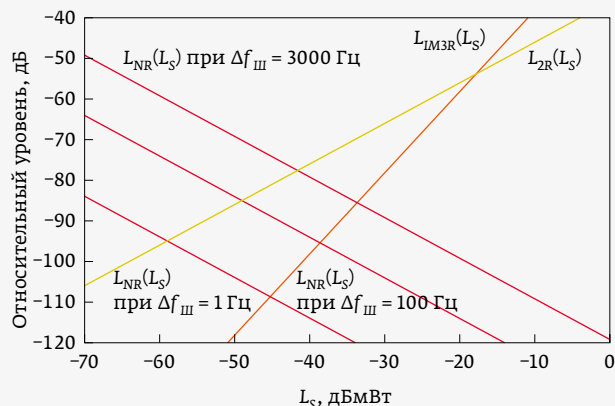


Рис. 2. Графики функций $L_{NR}(L_s)$, $L_{IM3R}(L_s)$, $L_{2R}(L_s)$ для выбранных шумовых полос

Исходя из этих качественных соображений, могут быть произведены расчеты ДД с учетом описанных ограничивающих факторов [4].

СОБСТВЕННЫЕ ШУМЫ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА И ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫЕ ПРОДУКТЫ

Будем считать, что на вход АС поступает сигнал с полосой, существенно большей полосы пропускания фильтра промежуточной частоты Δf . Внутренние шумы АС, как и для любого высокочувствительного приемного устройства, определяются первым усилителем в линейном тракте и характеризуются шум-фактором NF , который показывает приращение шума относительно уровня, обусловленного тепловыми процессами и для входного сопротивления тракта 50 Ом составляющего $L_T = -174$ дБмВт

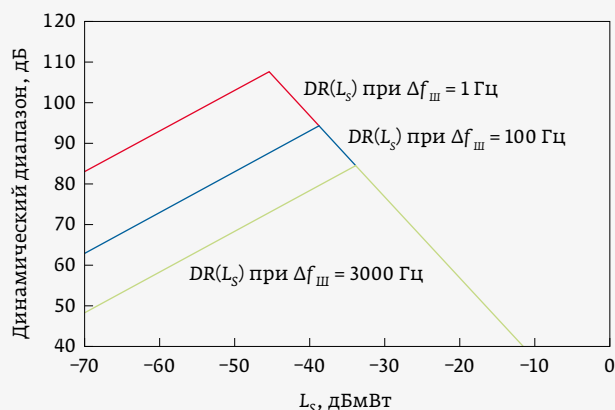


Рис. 3. Графики функций $DR(L_s)$ для выбранных шумовых полос

в полосе 1 Гц. Учитывая свойства теплового шума, его уровень L_{NR} относительно уровня сигнала на входе смесителя L_s составит

$$L_{NR} = L_N - L_s = L_T + 10 \lg(\Delta f_{ш}) + NF - L_s, \quad (1)$$

где $\Delta f_{ш}$ – шумовая полоса фильтра, Гц; L_N – абсолютный уровень шума. Шум-фактор измеряется в дБ, все абсолютные мощности – в дБмВт. Формула (1) не учитывает тип детектора и усреднение за счет использования видеофильтра. Как отмечается в [4], при использовании детектора выборки и усреднения узкополосным видеофильтром расчетное значение L_{NR} следует увеличить на $2,5$ дБ из-за недооценки уровня шума.

Для анализатора спектра уравнение для расчета относительного уровня интермодуляционных составляющих порядка n имеет вид $L_{IMnR} = -(n-1)(IPn_{in} - L_s)$, где IPn_{in} – входная мощность, дБмВт, соответствующая точке пересечения порядка n . При больших уровнях сигнала наибольшее влияние на результаты измерений оказывают продукты интермодуляции третьего порядка, откуда имеем

$$L_{IM3R} = -2(IP3_{in} - L_s). \quad (2)$$

Менее эффективный процесс формирования составляющих второго порядка приводит к формированию гармоник с относительным уровнем [4]

$$L_{2R} = -(SHI_{in} - L_s), \quad (3)$$

где SHI_{in} – мощность, соответствующая точке пересечения второго порядка, дБмВт, приведенная ко входу АС. Использование относительных уровней продуктов интермодуляции в расчетах позволяет уйти от учета ослабления, установленного на аттенуаторе АС. При этом в формулы (2) и (3) следует подставлять значения $IP3_{in}$ и SHI_{in} , соответствующие входу АС, то есть первому смесителю и нулевому ослаблению аттенуатора.

На рис. 2 представлены графики линейных функций $L_{NR}(L_s)$ для $\Delta f_{ш} = 1; 100; 3000$ Гц, а также зависимостей $L_{IM3R}(L_s)$ и $L_{2R}(L_s)$. Графики построены для $IP3_{in} = 9$ дБмВт и $SHI_{in} = 36$ дБмВт. Увеличение уровня сигнала на смесителе приводит к уменьшению относительного уровня шума линейного тракта АС и одновременно повышает интермодуляционные составляющие со скоростью 3 или 2 дБ/дБ. Ввиду этого за характеристику ДД можно принять минимальный модуль значений $L_{IM3R}(L_s)$ (или $L_{2R}(L_s)$) и $L_{NR}(L_s)$.

В зависимости от сути проводимых измерений интермодуляционные спектральные составляющие могут ограничивать ДД сверху. В таких случаях целесообразно выбирать оптимальный уровень сигнала на входе смесителя,



Акционерное общество «Научно-производственное предприятие
«Электронное специальное технологическое оборудование»
8 (499) 729-77-51 | info@nppesto.ru | nppesto.ru



ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ

ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



Группа Компаний «ЭСТО» – объединение ведущих российских научно-производственных предприятий по разработке, производству, модернизации, продаже и обслуживанию специального технологического оборудования.



Разработка и производство
технологического оборудования



Разработка и внедрение
современных технологий



Поставка зарубежного
оборудования и комплексных
технологий



Модернизация и сервисное
обслуживание технологического
оборудования



Плазмохимическое
травление



Вакуумное
напыление



Зарубежное
оборудование



Комплектующие

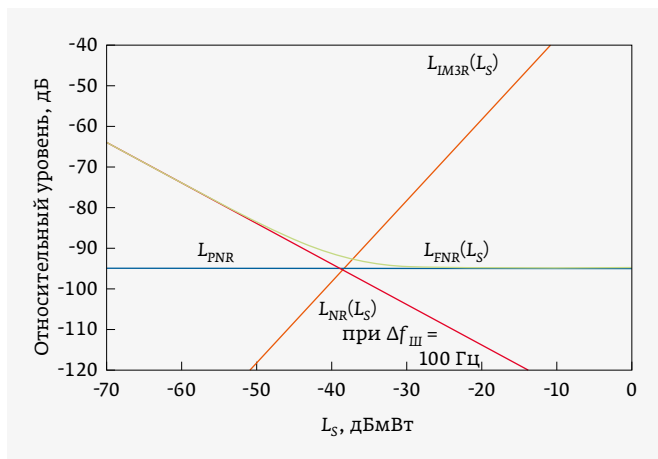


Рис. 4. Графики функций $L_{NR}(L_s)$, $L_{IM3R}(L_s)$, $L_{FNR}(L_s)$ для выбранных шумовых полос

соответствующий для выбранной полосы разрешения точке пересечения прямых $L_{NR}(L_s)$ и $L_{IM3R}(L_s)$ (или $L_{2R}(L_s)$), в которой уравниваются уровни шума и продуктов интермодуляции. В представленном на рис. 2 примере это достигается для полосы 100 Гц при $L_s = -38,5$ дБВт, когда относительный уровень собственных шумов равен -95 дБ. Соответственно, при этом уровень интермодуляционных составляющих и уровень шума линейного тракта равны $-135,5$ дБВт.

Учитывая, что интермодуляционные составляющие третьего порядка проявляются при более низких уровнях входного сигнала, далее будем ориентироваться на них. Важно подчеркнуть, что с учетом особенности работы АС под ДД следует понимать максимально возможное изменение уровня сигнала на смесителе относительно его текущего уровня до ограничения либо собственными шумами, либо продуктами нелинейности. Исходя из такого определения, на рис. 3 для тех же шумовых полос построены графики $DR(L_s)$, отражающие зависимость динамического диапазона от уровня сигнала на первом смесителе и имеющие по одной точке, соответствующей оптимальному значению L_s . Как видно из представленных графиков, увеличение полосы всегда приводит к снижению максимального доступного ДД. Однако во многих приложениях проводить измерения с малой полосой разрешения невозможно, и тогда, в особенности для широкополосных сигналов, максимум ДД может быть ограничен значением 20–35 дБ.

Представленные рассуждения позволяют выдвинуть требования к качеству линейного тракта АС, которые, очевидно, состоят в максимально возможной линейности и минимально возможных шумах ($\min(NF)$, $\max(IP3_{in})$, $\max(SHI_{in})$).

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ СИГНАЛА НА ВХОДЕ СМЕСИТЕЛЯ АС И МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ДД

Как было определено выше, оптимальный уровень сигнала $L_{s,onn}$ соответствует равенству интермодуляционных и шумовых компонент в спектре. Его можно получить попарным приравниванием (1) и (2), (1) и (3), что дает следующие уравнения:

$$-174 \text{ дБмВт} + 10 \lg(\Delta f_{III}) + NF - L_s = -2(IP3_{in} - L_s);$$

$$-174 \text{ дБмВт} + 10 \lg(\Delta f_{III}) + NF - L_s = -(SHI_{in} - L_s). \quad (4)$$

Их решение относительно L_s позволяет рассчитать оптимальные значения уровня сигнала на смесителе. Для составляющих третьего порядка он составит

$$L_{s,onn} = (2IP3_{in} - 174 \text{ дБмВт} + 10 \lg(\Delta f_{III}) + NF)/3, \quad (5)$$

для составляющих второго порядка

$$L_{s,onn} = (SHI_{in} - 174 \text{ дБмВт} + 10 \lg(\Delta f_{III}) + NF)/2. \quad (6)$$

При $L_s = L_{s,onn}$ максимальный динамический диапазон DR_{max} будет соответствовать разнице между значениями L_s и L_N либо $-L_{IM3R}$ (или $-L_{2R}$). Отсюда можно получить, что с учетом (5) для составляющих третьего порядка

$$\begin{aligned} DR_{max} &= L_{s,onn} - L_N = -L_{IM3R} = \\ &= 2(IP3_{in} + 174 \text{ дБмВт} - 10 \lg(\Delta f_{III}) - NF)/3, \end{aligned} \quad (7)$$

с учетом (6) для составляющих второго порядка

$$\begin{aligned} DR_{max} &= L_{s,onn} - L_N = -L_{2R} = \\ &= (SHI_{in} + 174 \text{ дБмВт} - 10 \lg(\Delta f_{III}) - NF)/2. \end{aligned} \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) следует, что для получения максимально возможного ДД в точке равенства собственного шума и продуктов интермодуляции следует использовать максимально линейный тракт с минимально возможным шумом. Для сравнения АС в этой части удобно использовать показатель качества $Q = IP3_{in} - NF$. Для высококачественных АС, имеющих $IP3_{in} \sim 15$ дБмВт, $NF \sim 15$ дБ, значение Q близко к 0 дБмВт.

В инженерной практике для быстрой оценки максимального динамического диапазона целесообразно использовать формулы, аналогичные (7) и (8), но включающие в себя отображаемый уровень шума L_N для выбранной полосы и значение $IP3_{in}$ или SHI_{in} как параметры, определяющие значение DR_{max} . Из (1), (7) и (8) следует, что такие формулы будут иметь вид

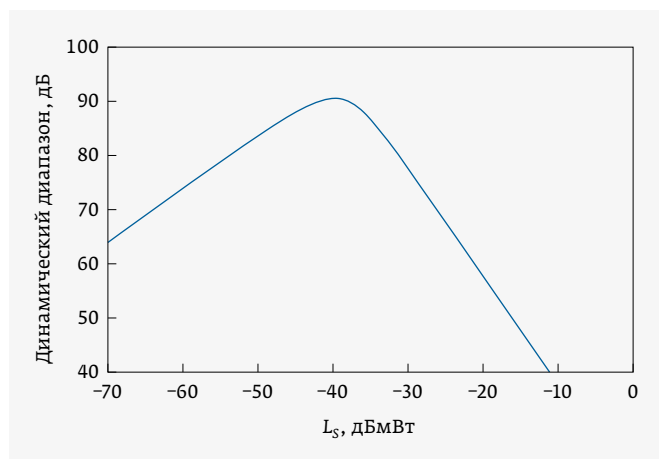


Рис. 5. Зависимость $DR(L_s)$, построенная для $\Delta f_{ш} = 100$ Гц

$$DR_{max} = 2(IP3_{in} - L_N)/3; DR_{max} = (SHI_{in} - L_N)/2. \quad (9)$$

Уравнения (9) являются основой для экспериментального определения DR_{max} для конкретного образца АС. Приведенные соотношения относятся к уровню сигнала на входе первого смесителя, то есть соответствующим нулевому ослаблению встроенного аттенюатора АС. Достижение максимального ДД осуществляется установкой его ослабления на значение, при котором достигается $L_s \approx L_{s,onn}$. Лучшие в этом отношении результаты дают АС, позволяющие менять ослабление с шагом 1 дБ. В противном случае в критичных приложениях следует использовать внешние ступенчатые аттенюаторы с приемлемым шагом.

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО ШУМА ГЕТЕРОДИНОВ АС НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН

Влияние фазового шума (ФШ) на результаты измерений в АС проявляется в его переносе на входные сигналы в процессе работы смесителей. ФШ АС ограничивает снизу ДД. Кроме того, требования по минимальным ФШ для АС являются определяющими в случаях, когда необходимо отобразить очень слабые составляющие спектра в окрестности других, имеющих большую мощность, поскольку ФШ АС может полностью скрыть первые за счет того, что при переносе на промежуточную частоту ФШ будут отображаться как шумовая модуляция в окрестности перенесенной составляющей с высоким уровнем.

Ввиду особенностей обработки и переноса сигналов по частоте уровень ФШ относительно входного сигнала L_{PNR} не будет зависеть от его уровня. Если измерения проводятся на частотах с большей отстройкой от несущей, чем продукты интермодуляции третьего порядка, то они не влияют на результаты измерений в части ограничения ДД

снизу. В то же время они, располагаясь наиболее близко к сигналам с большим уровнем, как и раньше, ограничивают его сверху.

Абсолютный уровень фазового шума $L_{PN}(f)$ определяется частотной расстройкой f между сигналом гетеродина и измеряемой частотой, а также шумовой полосой фильтра промежуточной частоты:

$$L_{PN}(f) = L_{PN1}(f) + 10 \lg(\Delta f_{ш}), \quad (10)$$

где $L_{PN1}(f)$ – уровень ФШ при шумовой полосе 1 Гц. Поскольку тепловые и фазовые шумы являются некоррелированными, то они складываются друг с другом линейно.

На рис. 4 показаны графики функций $L_{NR}(L_s)$ и $L_{FNR}(L_s)$, построенные для шумовой полосы $\Delta f_{ш} = 100$ Гц, причем зависимость $L_{FNR}(L_s)$ характеризует относительный уровень полного суммарного шума тракта АС. Также на рис. 4 показана зависимость $L_{IM3R}(L_s)$. Все графики построены для тех же характеристик АС, какие использовались выше, значение L_{PN1} принято равным -115 дБн. Как видно, наличие ФШ повышает совокупный шум, несколько смещая значение $L_{s,onn}$ в сторону меньших значений, а также снижая максимальный ДД. На рис. 5 представлена зависимость $DR(L_s)$, учитывающая тепловой и фазовый шумы АС, а также нелинейность тракта в части продуктов интермодуляции третьего порядка. Сопоставление зависимостей $DR(L_s)$ на рис. 3 и 5 показывает снижение максимального ДД с 94,1 дБ до 90,6 дБ и смещение $L_{s,onn}$ с $-38,6$ дБмВт на $-39,7$ дБмВт. Следовательно, при строгом поиске оптимума настроек АС в целях максимизации ДД учет фазового шума является обязательным.

Таким образом, при расчете значения ДД следует учитывать и ФШ в случае измерения слабых сигналов либо их фазовых шумов в окрестности составляющих существенного уровня. Наличие ФШ несколько снижает максимальный ДД, что может быть важным, например, при оценке точек пересечения нечетных порядков для АС и при измерениях фазовых шумов генераторов несущей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2006. 392 с.
2. Радиотехника. Энциклопедия // Под ред. Мазора Ю.Л., Мачусского Е.А., Правды В.И. М., 2016. 944 с.
3. Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С. и др. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория // Под ред. Ширмана Я.Д. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
4. Раушер К. Основы спектрального анализа. М.: R&S, Горячая линия – Телеком, 2006. 226 с.