

Динамический диапазон анализаторов спектра: особенности оценки и учета при измерениях

Часть 2

Н. Лемешко, д.т.н.¹, А. Агуреев², Т. Плешкова³

УДК 535.131:621.317 | ВАК 2.2.4

В первой части статьи, опубликованной в восьмом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2024 год, рассмотрено понятие динамического диапазона применительно к анализаторам спектра, 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. Во второй части статьи проанализированы методы экспериментального определения динамического диапазона анализаторов спектра и выявлены их существенные особенности, а также приведены результаты таких измерений для анализаторов спектра серии СК4-МАХ6 в диапазоне частот от 10 кГц до 26,5 ГГц.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА

Динамический диапазон (ДД) анализаторов спектра является одной из их ключевых характеристик и определяет их способность одновременно измерять сигналы с существенно различающимися уровнями мощности. Необходимость учета ДД анализаторов спектра (АС) встречается при диагностике и сервисном обслуживании аппаратуры радиолокационных станций, сетей цифровой радиосвязи, средств обнаружения и защиты от утечки информации по каналам, связанным с побочными электромагнитными излучениями и наводками.

Согласно [1], для АС максимальный динамический диапазон DR_{max} может быть найден по формулам

$$DR_{max} = 2(IP3_{in} - L_N)/3; DR_{max} = (SHI_{in} - L_N)/2, \quad (1)$$

где $IP3_{in}$ и SHI_{in} – мощности, соответствующие точкам пересечения третьего и второго порядков, дБмВт, приведенные ко входу АС; L_N – мощность собственных шумов

линейного тракта АС, дБмВт, определяющая минимальный уровень сигналов, доступных для измерения. Поскольку при увеличении входной мощности точка пересечения третьего порядка достигается существенно раньше, то в дальнейшем будем использовать и оценивать только параметр $IP3_{in}$, учитывая возможность обобщения ряда результатов и на второе уравнение в (1).

Значение L_N прямо пропорционально шумовой полосе фильтра промежуточной частоты $\Delta f_{ш}$:

$$L_N = L_T + 10 \lg(\Delta f_{ш}) + NF, \quad (2)$$

где NF – шум-фактор, дБ, показывающий приращение шума относительно уровня L_T , обусловленного тепловыми процессами и для входного сопротивления тракта 50 Ом в полосе 1 Гц составляющего $L_T = -174$ дБмВт при температуре 290 К. Как следует из формулы (2), наибольшая чувствительность АС будет достигаться при небольших значениях полосы разрешения, которые обычно и используются для измерения узкополосных сигналов малой мощности. Для применяемых в АС гауссовых фильтров промежуточной частоты $\Delta f_{ш} = 1,05\Delta f_3$, где Δf_3 – полоса разрешения анализатора спектра по уровню -3 дБ [2, 3, 4].

При фиксированной шумовой полосе значение L_N определяется следующими факторами:

1. Качеством линейного тракта. Применение высококачественных малошумящих усилителей

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

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

³ ФГУП «НПП «Гамма», инженер производственного центра, pleshkova.tr@nppgamma.ru.

с пониженным коэффициентом шума позволяет повысить максимально достижимую чувствительность приборов за счет более низкого значения **NF**. Современные высококачественные АС имеют **NF** ~ 15 дБ.

2. Ослаблением, установленным на встроенном аттенюаторе. В типовом случае перед первым смесителем установлен перестраиваемый аттенюатор, нулевое ослабление на котором соответствует наибольшей чувствительности прибора. С учетом правил суммирования широкополосного (в том числе теплового) шума [5] снижение коэффициента передачи линейного тракта на **G** дБ ведет к такому же увеличению шума. Ввиду этого при измерении уровня шума обычно устанавливают нулевое ослабление, однако следует помнить, что такой режим соответствует худшим условиям согласования АС с подключенным к его входу трактом.
3. Топологией линейного тракта. Многие модели АС имеют опцию встроенного предварительного усилителя (ПУ), а некоторые, например, предназначены для измерения кондуктивных помех, – опцию преселектора (ПС). Он позволяет снизить полную мощность на входе первого смесителя АС и повысить его избирательность по соседним каналам. Подключение и отключение ПУ и ПС осуществляется физическим изменением последовательности подключенных блоков, причем активация ПУ всегда снижает **NF**, а использование ПС – увеличивает его значение. Кроме того, на значение **NF** оказывает непосредственное влияние количество переносов по частоте, которое изменяется прибором автоматически в зависимости от текущей частоты сканирования. Современные АС могут использовать одну, две или три промежуточные частоты (ПЧ). Изменение топологии линейного тракта при изменении количества переносов на ПЧ весьма часто проявляется в скачкообразном изменении отображаемого уровня шума в районе граничных частот. Изменение топологии линейного тракта АС существенно влияет и на значение **IP3_{in}**, которое подлежит обязательному экспериментальному определению в окрестностях таких частот.
4. Помехами, наведенными из питающей электросети и внешними полями, которые могут существенно увеличивать уровень отображаемого шума. Современные АС обычно удовлетворяют требованиям стандартов по помехоустойчивости, например, [6, 7], но тем не менее измерения собственного шума для линейного тракта АС лучше проводить при благоприятной электромагнитной обстановке.
5. Типом детектора и шириной полосы видеофильтра, определяющей усреднение показаний АС.

Поскольку тепловой шум является некоррелированным случайным процессом, то для фиксированных частоты и ширины шумовой полосы его значение претерпевает колебания от реализации к реализации. Энергетику шумового процесса принято оценивать по среднеквадратичному значению выборок. Как отмечается в [1], детектор средних значений, обычно применяемый при шумовых измерениях, для нормально распределенных случайных величин дает результат на 1,05 дБ ниже. Широко применяемое при измерениях слабых сигналов усреднение по нескольким кривым дает относительно последнего результат ниже на 1,45 дБ. Такое усреднение позволяет добиться намного большей повторяемости результатов измерения любых шумов. Этот пример показывает необходимость учета типа детектора и настроек усреднения для перехода от отображаемого уровня шума L_{NIND} к L_N :

$$L_{NIND} = L_N - P, \quad (3)$$

где **P** – поправка, в случае типовых измерений равная 2,5 дБ. Пренебрежение данной поправкой приведет к необоснованному занижению оценки **NF** и завышению **DR_{max}** на **2P/3** дБ, то есть на 1,67 дБ в случае типовых измерений.

6. Опорным уровнем. Как правило, диапазон отображения АС составляет 100 дБ. Если установить опорный уровень слишком большим, то уровень L_{NIND} будет определяться ограниченным диапазоном отображения.

Перечисленные факторы можно ранжировать как относящиеся к условиям измерений и к настройкам при их выполнении. При оценке L_{NIND} следует установить согласованную нагрузку на вход АС, задать опорный уровень –70...–40 дБм, установить нулевое ослабление на встроенном аттенюаторе, выбрать полосу разрешения, обычно принимаемую равной минимальной для данного типа АС, использовать детектор средних значений и усреднение по многим разверткам. Полосу обзора следует задавать достаточной для охвата требуемого диапазона частот. В дальнейшем измерения сводятся к считыванию уровня шума L_{NIND} для ряда выбранных частот, и схема таких экспериментов тривиальна.

На основе известных режимов измерений по формулам (2) и (3) могут быть оценены значения L_N и **NF**, причем первое необходимо для определения максимально возможного ДД, а второе характеризует качество линейного тракта АС наряду с **IP3_{in}** и **SHI_{in}**. Также, как и L_N , эти характеристики проявляют зависимость от частоты, определяемую в первую очередь топологией линейного тракта АС, а также собственными частотными свойствами первого смесителя.

Верхняя граница ДД ограничивается нелинейностью тракта АС, которая приводит к формированию интермодуляционных компонент второго, третьего и других порядков. Формирование интермодуляционных составляющих принято оценивать в двухсигнальном режиме, когда на вход АС подаются два синусоидальных сигнала с одинаковым уровнем L_s и близкими частотами f_1 и f_2 . При этом интермодуляционные составляющие третьего порядка будут иметь частоты $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$ и одинаковую амплитуду L_{IM3} , причем разница $\alpha_{IM3} = L_s - L_{IM3}$ также оказывается постоянной для них. Для интермодуляционных составляющих порядка n справедливо уравнение $IPn_{in} = (\alpha_{IMn}/(n-1)) + L_s$, откуда для составляющих третьего порядка получим

$$IP3_{in} = \frac{\alpha_{IM3}}{2} + L_s = \frac{L_s - L_{IM3}}{2} + L_s = \frac{3}{2}L_s - \frac{1}{2}L_{IM3}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что увеличение L_s на 1 дБ приводит к возрастанию продуктов интермодуляции третьего порядка на 3 дБ. Экспериментальное определение $IP3_{in}$ осуществляется непосредственно по спектрограмме в соответствии с (4). Процесс измерений пояснен на рис. 1. При их выполнении полоса разрешения должна выбираться такой, чтобы линейные составляющие спектра были различимы и измеряемы с точностью, не уменьшающейся из-за наличия посторонних составляющих. Для пары синусоидальных сигналов одинакового уровня это выполняется, когда $(f_2 - f_1)/\Delta f_{-3} \geq 15$. Но поскольку вблизи них при измерениях находятся интермодуляционные составляющие с таким же разномом по частоте, имеющие существенно более низкий уровень, то целесообразно обеспечивать $(f_2 - f_1)/\Delta f_{-3} \geq 40$. При этом в целях ускорения измерений полоса обзора $SPAN$ должна выбираться минимально необходимой. Если установить запас по полосе в 20%, то тогда необходимое значение $SPAN = 3,2(f_2 - f_1)$, при этом $SPAN/\Delta f_{-3} \geq 128$.

Учитывая, что для определения $IP3_{in}$ измерениям подлежат уровни гармонических составляющих, используемый тип детектора не имеет принципиального значения. При этом не обязательно использовать гармонические сигналы с высоким уровнем, его значение должно быть достаточным для того, чтобы в пределах ограничения по отображаемому диапазону можно было наблюдать и измерять как значения L_s , так и продуктов интермодуляции, причем значение L_{IM3} должно быть таким, чтобы собственный шум не влиял на результаты таких измерений. В этой связи рекомендуемая разница между L_{IM3} и L_{NIND} составляет не менее 15 дБ.

Измерения значения $IP3_{in}$ предполагают использование либо двух генераторов гармонических сигналов, суммируемых при помощи моста сложения, либо векторного генератора. Последний вариант предпочтительнее, поскольку при более сложной настройке не требует калибровки

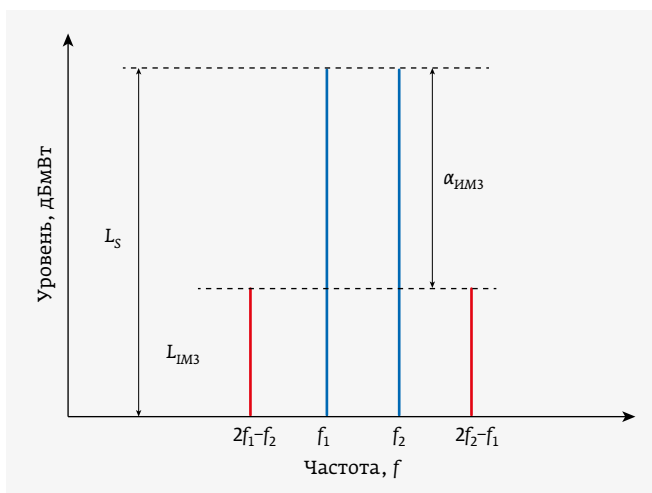


Рис. 1. К экспериментальному определению значения $IP3_{in}$

моста сложения на частотах измерений и исключает использование дополнительной оснастки. Основное предъявляемое к генераторам сигналов требование состоит в приемлемом уровне побочных спектральных составляющих — собственных гармонических и интермодуляционных продуктов.

Как видно из представленного описания, осуществление измерений характеристик, необходимых для расчета максимального динамического диапазона АС, не представляет заметной сложности и состоит из рутинных операций. Для повышения эффективности использования средств измерений и ускорения их выполнения, а также для исключения ошибок их несложно автоматизировать, если привлекаемые приборы и АС имеют возможность работать под удаленным управлением.

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗАТОРОВ СК4-МАХ6

В экспериментальной части работы объектом исследований является анализатор спектра и сигналов СК4-МАХ6 производства АО «Производственная компания «Новэл». Приборы этой серии имеют полосу рабочих частот от 1 Гц до 40 ГГц и относятся к средствам измерений высшего класса [8]. Для расширения частотного диапазона приборы опционально имеют встроенный диплексер, позволяющий анализировать сигналы с внешних смесителей.

В линейном тракте приборов СК4-МАХ6 используется двух- или трехкратный перенос по частоте. Схема обработки предусматривает использование аналого-цифрового преобразования (АЦП) либо с частотой 2400 МГц и разрядностью 12 бит, либо с частотой 200 МГц и разрядностью 16 бит. Активированный режим оцифровки определяется как компромисс между необходимыми скоростью сканирования и динамическим диапазоном.

В обычном режиме максимальный входной уровень сигнала для СК4-МАХ6 составляет 30 дБмВт, для повышения уровня перегрузки по промежуточной частоте в линейном тракте имеется преселектор, также обеспечивающий увеличение избирательности по зеркальному каналу и на комбинационных частотах. Отличительной чертой СК4-МАХ6 является возможность использования преселектора даже при анализе спектра в реальном времени, что достигается за счет сверхбыстрой коммутации блоков полосовых фильтров. Для улучшения характеристик избирательности в трактах ПЧ применяются полосовые фильтры с ослаблением до 140 дБ в полосах заграждения. Аппаратная платформа приборов СК4-МАХ6 реализована на базе модульного шасси CompactPCI Serial, являющегося широко используемым промышленным стандартом. Это позволяет наращивать функциональность прибора за счет установки в свободные слоты новых аппаратных модулей, подключаемых к внутренней шине PCIe 3.0 с пиковой производительностью до 8 Гбит/с. Обработка отсчетов после АЦП с построением спектра может быть реализована либо цифровой фильтрацией высокого порядка, либо быстрым преобразованием Фурье. В приборах СК4-МАХ6 реализованы типовые для АС автоматические измерения, в том числе занимаемой полосы и мощности в канале.

Анализаторы спектра и сигналов СК4-МАХ6 имеют опцию анализа спектра в реальном времени с мгновенной полосой до 160 МГц, что позволяет использовать их в специальных приложениях, например, для поиска редко повторяющихся аномалий в сигналах. Наличие встроенного следящего генератора обеспечивает проведение двухпортовых измерений. Опционально приборы СК4-МАХ6 могут выполнять демодуляцию сигналов с аналоговой амплитудной, фазовой и частотной модуляциями, а также векторную демодуляцию сигналов с цифровыми видами модуляции. Также СК4-МАХ6 имеют выходы второй и третьей промежуточной частоты с шириной полосы 180 и 50 МГц. Центральные частоты для них составляют соответственно 450 и 50 МГц. Весьма полезными являются опции измерительного приемника, измерения спектральной плотности фазового шума, измерения коэффициента шума и характеристик нелинейности устройств.

Для обеспечения углубленного анализа сигнала с использованием математических пакетов типа MATLAB данные с аналого-цифрового преобразователя могут записываться на извлекаемый твердотельный жесткий диск. Специальный интерфейс QSPF+ обеспечивает выдачу данных на внешние устройства со скоростью до 40 Гбит/с, что при наличии дополнительных средств обработки достаточной производительности позволяет создавать специализированные и уникальные измерительные комплексы.

Для обеспечения интеграции в автоматизированные измерительные комплексы приборы СК4-МАХ6 поддерживают коммуникационный стандарт LXI и могут подключаться к беспроводным, кабельным и оптическим сетям Ethernet для внешнего управления с использованием унифицированной системы команд. Конструкторское исполнение АС СК4-МАХ6 предусматривает возможность монтажа в 19-дюймовые стойки. Для упрощения и ускорения работы АС СК4-МАХ6 имеют сенсорный экран.

Таким образом, АС СК4-МАХ6 обладают широкими функциональными возможностями и характеристиками, определяющими их широкое потенциальное применение для анализа сигналов и измерения характеристик радиотрактов. Ниже представлены результаты экспериментальной оценки $IP3_{in}$, L_{NIND} , L_N , NF для образца прибора СК4-МАХ6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОГО ДД И ДРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА СК4-МАХ6

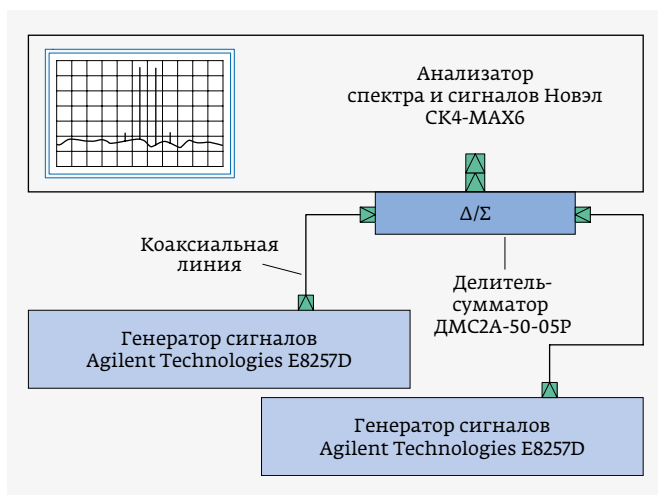
Средства измерений, используемая оснастка и основные настройки приборов. В качестве объекта исследований использовался прибор СК4-МАХ6 (зав. №5253751), измерения для которого проводились в диапазоне частот от 9 кГц до 26,5 ГГц. Они имели своей целью экспериментальное получение массивов данных для определения $IP3_{in}$, L_{NIND} , L_N , NF .

Как следует из формулы (1), экспериментальная оценка уровня отображаемого шума L_{NIND} фактически сводится к его прямым измерениям при заданных настройках АС при согласованной нагрузке на входе прибора и с последующим пересчетом к полосе 1 Гц. Такие измерения являются вполне тривиальными, ввиду чего схема измерительной установки здесь не приводится. Единственной существенной особенностью здесь являлось то, что представленные ниже результаты были получены при использовании детектора средних значений без усреднения по многим реализациям развертки.

На рис. 2а показана схема установки для определения $IP3_{in}$. Для формирования интермодулирующих сигналов применялась пара генераторов Agilent Technologies E8257D, (зав. № MY60020039; MY59140019), измерения уровня интермодуляционных составляющих выполнялись при выходной мощности –20 дБм. Сигналы суммировались при помощи делителя-сумматора мощности ДМС2А-50-05Р, перекрывающего диапазон рабочих частот исследуемого прибора.

Измерения, результаты которых приведены ниже, проводились в автоматизированном режиме, при определении $IP3_{in}$ применялось программное обеспечение Novel Production JSC.

Результаты измерений и расчетов. При помощи описанных измерительных установок для разных частот f



а)

Рис. 2. Измерительная установка: а – схема; б – фотография

рабочего диапазона прибора СК4-МАХ6 были получены массивы значений L_{NIND} для случаев включенных и отключенных преселектора (ПС) и предусилителя (ПУ), а также мощностей IP_{3in} , соответствующих точкам пересечения третьего порядка. Массив данных, использовавшихся при построении зависимостей $L_{NIND}(f)$, содержал не менее 130 строк для каждой из упомянутых конфигураций линейного тракта.

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений отображаемого уровня шума в полосе 1 Гц с детектором средних значений, полученные соответственно при выключенном и включенном предусилителе. Точками здесь показаны первично снятые данные. Как видно, в пределах небольших интервалов частот разброс значений шума при однократной реализации спектра оказывается весьма значительным и составляет ± 4 дБ относительно среднего значения (математического ожидания). В качестве результатов измерений принято значение отображаемого уровня шума, полученное усреднением скользящим средним по 19 опорным точкам. Такая математическая обработка позволяет заменить усреднение по многим измерениям шума. Следовательно, для расчета значений L_N при разных конфигурациях линейного тракта должна использоваться поправка $P = 2,5$ дБ. На рис. 5 для всех четырех рассматриваемых конфигураций измерительного тракта представлены графики функции $L_N(f)$.

Из анализа рис. 3–5 можно сделать следующие выводы. Когда ПУ выключен, использование ПС, улучшающего избирательность АС, дает существенное повышение уровня шума. Следовательно, использование ПС целесообразно при наличии достаточного запаса по чувствительности



б)

и в случае, когда в измеряемом сигнале имеются паразитные составляющие, способные создавать интермодуляционные явления в выбранной полосе обзора или совпадающие с зеркальными частотами.

Использование ПС при включенном ПУ, как это следует из рис. 4, несколько понижает средний уровень шума, что связано с ограничением полной мощности на первом смесителе АС, приводящим к снижению уровня перекрестной шумовой широкополосной интермодуляции для составляющих с уровнем, близким к тепловому шуму пассивного тракта с волновым сопротивлением, равным 50 Ом. Таким образом, максимальная чувствительность АС рассматриваемого типа достигается при включенных ПУ и ПС.



Рис. 3. Зависимости $L_{NIND}(f)$ при выключенном предусилителе



Рис. 4. Зависимости $L_{NIND}(f)$ при включенном предусилителе

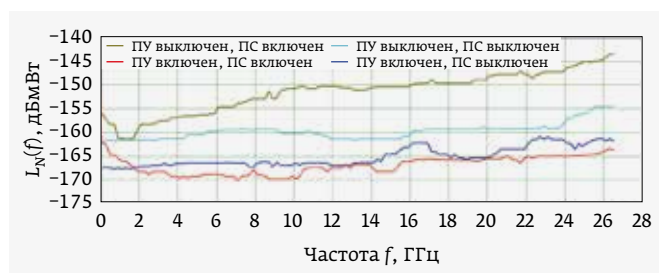


Рис. 5. Зависимости $L_N(f)$ при разных конфигурациях линейного тракта

Для каждой конфигурации линейного тракта в соответствии с (2) может быть получена зависимость шум-фактора от частоты: $NF(f) = L_N(f) + 174$ дБмВт. Такие графики представлены на рис. 6. Как следует из них, включение ПС без ПУ повышает шум-фактор примерно на 20 дБ. Когда же ПС и ПУ выключены, значение NF лежит в основном в пределах 12–15 дБ, что соответствует современному уровню проектирования и изготовления АС высшего класса. Включение ПУ для приборов СК4-МАХ6 позволяет снизить шум-фактор до 7–10 дБ практически во всей полосе частот, одновременное использование ПУ и ПС обеспечивает его снижение до 4–8 дБ на частотах от 2–24 ГГц. При этом важно подчеркнуть, что дальнейшее снижение абсолютного уровня шума АС для температур эксплуатации порядка 300 К является технически сложной задачей. Для многих применений АС ее решение является экономически нецелесообразным.

Массив для определения $IP3_{in}$ имел объем 155 строк и включал результаты, полученные на основе измерений уровней сигналов на частотах $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$ (рис. 1), которые для реальных АС будут

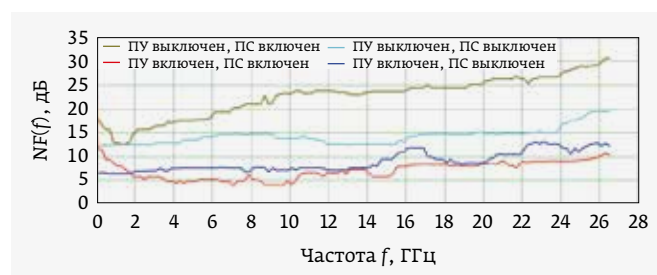


Рис. 6. Зависимости $NF(f)$ для разных конфигураций линейного тракта АС

несколько отличаться из-за неравномерности амплитудно-частотной характеристики прибора и различий в передаточных характеристиках смесителя на разных частотах. За результат измерений для каждой частоты принималось наименьшее из рассчитанных значений $IP3_{in}$.

На рис. 7 представлена спектрограмма, полученная при измерениях $IP3_{in}$ для частоты 5,5 МГц. На этом рисунке хорошо видны интермодуляционные составляющие. График $IP3_{in}(f)$, построенный для частот от 9 кГц до 26,5 ГГц, показан на рис. 8. Сглаживание, примененное для улучшения отображения данных на графике, осуществлялось скользящим средним. В пределах небольших диапазонов частот разброс измеренных значений $IP3_{in}$ составлял около 4 дБ. Значение $IP3_{in}$ уменьшается с ростом частоты, что связано с различиями в передаточных характеристиках тракта АС. На частотах выше 16 ГГц $IP3_{in}$ имеет порядок 0 дБмВт, что характерно для многих современных приборов и связано с повышением количества переносов по частоте.



Рис. 7. Спектрограмма, полученная при измерениях $IP3_{in}$ на частоте 5,5 МГц

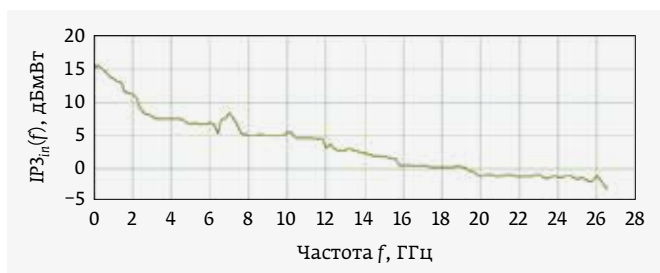


Рис. 8. Зависимость $IP3_{in}(f)$

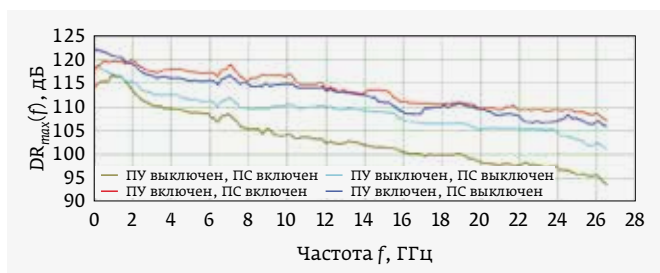


Рис. 9. Зависимости $DR_{max}(f)$ для разных конфигураций линейного тракта АС



Рис. 10. Зависимости $L_{s,omn}(f)$ для разных конфигураций линейного тракта АС

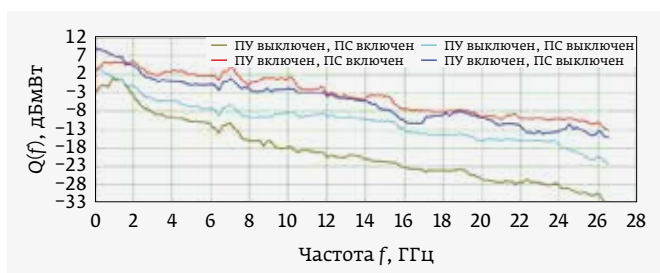


Рис. 11. Зависимости $Q(f)$ для разных конфигураций линейного тракта АС

На основе полученных результатов измерений, помимо шум-фактора, могут быть определены для каждой из конфигураций линейного тракта частотные зависимости:

- максимального динамического диапазона DR_{max} – в соответствии с (1);

- оптимального уровня сигнала на первом смесителе, при котором достигается значение DR_{max} – по формуле $L_{s,omn} = (2IP3_{in} - 174 \text{ дБмВт} + 10 \lg(\Delta f_{ш}) + NF)/3$, обоснование которой представлено в [1];
- коэффициента качества линейного тракта, который принято определять соотношением $Q = IP3_{in} - NF$.

Перечисленные зависимости представлены на рис. 9–11. С учетом тенденций к снижению $IP3_{in}$ и росту NF с увеличением частоты на рис. 9 ожидаемо наблюдается уменьшение максимального ДД. Разница в значениях DR_{max} на краях полосы рабочих частот прибора СК4-МАХ6 составляет от 25 до 35 дБ в зависимости от конфигурации линейного тракта. Графики построены для $\Delta f_{ш} = 1 \text{ ГГц}$. При увеличении шумовой полосы в k раз значение DR_{max} для той же частоты снизится на $6,67 \lg(k)$ дБ. Следует также отметить, что ДД, равный 100 дБ, считается достаточным для решения практически всех задач, требовательных к этому показателю средств измерений [9].

На рис. 10 показаны графики функций $L_{s,omn}(f)$, характер которых определяется двумя конкурирующими процессами. С одной стороны, существенно снижается мощность $IP3_{in}$ (рис. 8). С другой стороны, наблюдается увеличение шум-фактора NF . Эти процессы стремятся сместить значение $L_{s,omn}$ в противоположные стороны, в результате чего интервал изменений $L_{s,omn}(f)$ в пределах рабочего диапазона частот АС оказывается существенно меньше влияющих величин и не превосходит 14–16 дБ для любой конфигурации линейного тракта. С увеличением частоты будет наблюдаться снижение $L_{s,omn}$, причем включение ПС смещает этот показатель в сторону более низких значений. Как и в предыдущем случае, графики на рис. 10 построены для $\Delta f_{ш} = 1 \text{ ГГц}$. При увеличении шумовой полосы в a раз значение $L_{s,omn}$ для той же частоты повысится на $3,33 \lg(a)$ дБ.

На рис. 11 представлены зависимости $Q(f)$. Ход графиков здесь определяется снижением $IP3_{in}$ и повышением NF с увеличением частоты. При использовании ПС значение Q превышает –5 дБмВт на частотах до 14 ГГц. Применение ПС существенно сказывается на значении Q и приводит к его падению ниже указанного значения на частотах выше 2 ГГц. Таким образом, применение ПС при измерениях должно быть обосновано с тем, чтобы оно не приводило к снижению прочих показателей АС в критичных случаях.

Результаты, аналогичные представленным, могут быть получены и для случая, когда ДД ограничен интермодуляционными составляющими второго порядка.

Оценка и максимизация ДД необходимы в приложениях, когда требуется провести одновременные измерения по спектру для сигналов сильно различающихся уровней. Ограничения ДД связаны с собственными шумами

и нелинейностью трактов АС. Для выбранной частоты измерений значение DR_{max} также будет в пределах 2 дБ зависеть от настроек АС, в частности, из-за использования детектора того или иного типа.

Значение ДД для АС зависит от многих факторов: частоты, полосы разрешения, уровня сигнала на первом смесителе АС, от ослабления, установленного на встроенном аттенюаторе, а также от топологии линейного тракта. Ввиду столь большого числа влияющих факторов и их разнородности значения ДД обычно не приводятся в технической документации на АС, но, как было показано выше, могут быть определены для заданных настроек путем весьма простых измерений.

Полученные характеристики исследованного образца прибора СК4-МАХ6 в целом характерны для анализаторов спектра высшего класса. При отключенном ПС максимальный ДД превосходит значение 100 дБ, соответствующее типовому диапазону отображения для анализаторов спектра. Однако использование ПС, как правило, не требуется в задачах, где необходима максимизация ДД. Таким образом, анализаторы спектра и сигналов СК4-МАХ6 оказываются вполне универсальными средствами измерений для радиосвязи и радиолокации, в том числе специфических приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Раушер К.** Основы спектрального анализа. М.: R&S, Горячая линия – Телеком, 2006. 226 с.
2. Радиотехника. Энциклопедия / Под ред. Мазора Ю.Л., Мачусского Е.А., Правды В.И. М., 2016. 944 с.
3. **Корякин В.С., Кравчук Ю.В., Лебедев О.В. и др.** Измерители радиопомех / Под ред. Фастовского И.А. М.: Связь, 1973. 152 с.
4. **Лемешко Н.В.** Теоретические основы моделирования сертификационных испытаний радиоэлектронных средств по эмиссии излучаемых радиопомех. Монография. М.: МИЭМ, 2012. 196 с.
5. **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.
6. ГОСТ Р 51317.4.4-2007. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний.
7. ГОСТ Р 51317.4.5-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний.
8. Анализатор сигналов и спектра СК4-МАХ6. Брошюра. v.2.1.0 от 21.03.2023. АО «ПК «НОВЭЛ», 2023. 27 с.
9. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1300 руб.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ. ИЗДАНИЕ 3-Е, ИСПРАВЛЕННОЕ Оппенгейм А., Шафер Р.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 1048 с.
ISBN 978-5-94836-329-5

Предлагаемая вниманию читателя книга — третье переработанное издание всемирно известного классического учебника «Цифровая обработка сигналов», опубликованного в 1975 году. В ее основу лег развернутый курс по цифровой обработке сигналов, преподававшийся в течение ряда лет в Массачусетском технологическом институте. Учебник посвящен математическим алгоритмам, реализуемым в цифровых системах.

В нем опущены сложные доказательства математических утверждений, но все приемы и методы иллюстрированы многочисленными примерами и задачами.

Книга будет полезна как студентам, осваивающим предмет, так и инженерам-разработчикам и системотехникам.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru