

Keysight Technologies

Высокоточные измерения
коэффициента шума
с использованием анализаторов
цепей серии PNA-X

Рекомендации
по применению



Содержание

Общее представление о коэффициенте шума	3
Что такое коэффициент шума?.....	3
Значение точности измерения коэффициента шума	5
Методы измерения коэффициента шума	6
Метод Y-фактора	7
Метод холодного источника	8
Ограничения точности измерений	9
Допущения, используемые в методе Y-фактора.....	9
Составляющие погрешности измерения коэффициента шума.....	10
Уникальный подход PNA-X.....	19
Варианты выбора опций	19
Коррекция эффектов, связанных с шумовыми параметрами	21
Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора.....	23
Скалярная калибровка шума	30
Аспекты, касающиеся числа циклов свипирования.....	31
Использование стандартных приёмников для измерения коэффициента шума	32
Параметры мощности шума	38
Измерение преобразователей частоты.....	38
Измерение дифференциальных устройств	40
Измерение шумовых параметров	42
Обзор калибровки.....	43
Векторная калибровка шума	43
Калибровка шума стандартного приёмника.....	45
Скалярная калибровка шума.....	46
Калибровка для преобразователей частоты	46
Калибровка на пластине	47
Перемещение плоскости калибровки шума	49
Практические рекомендации по измерениям	50
Установка температуры окружающей среды	50
Усреднение шума	50
Оптимизация уровней мощности при измерении S-параметров.....	54
Оптимизация уровня преобразователя мощности во время калибровки.....	55
Уровни компрессии и максимально допустимые уровни	56
Электромагнитные помехи	58
Дополнительные ресурсы.....	59
Рекомендации по применению.....	59
Журнальные статьи.....	59
Научные статьи	59
Публикации в интернете.....	59

Общее представление о коэффициенте шума

Что такое коэффициент шума?

Коэффициент шума является показателем качества, который характеризует количество избыточного шума, присутствующего в системе. Минимизация коэффициента шума позволяет улучшить характеристики системы, связанные с избыточным шумом. В нашей повседневной жизни шум ухудшает качество изображения на экране телевизора и неблагоприятно влияет на качество голосовой связи при разговоре по сотовому телефону. В оборонных областях применения, таких как радиолокация, шум приёмника ограничивает эффективный диапазон системы. В цифровых системах связи шум увеличивает коэффициент битовых ошибок (BER). Разработчики систем всегда стараются оптимизировать результирующее отношение сигнал/шум системы. Этого можно добиться либо посредством увеличения уровня сигнала, либо посредством уменьшения уровня шума. В приёмно-передающей системе, такой как радиолокационная станция (РЛС), одна из возможностей заключается в увеличении излучаемой мощности РЛС за счёт использования более мощных усилителей и/или антенн большего размера. Снижение потерь в тракте передачи между передатчиком и приёмником также помогает увеличить отношение сигнал/шум, но потери в тракте передачи часто определяются условиями окружающей среды, которые не могут контролироваться разработчиком системы. Отношение сигнал/шум можно также увеличить за счёт снижения уровня шума, вносимого приёмником, который обычно определяется качеством маломощного усилителя (МШУ) во входном каскаде приёмника. В большинстве случаев проще и дешевле снизить уровень шума приёмника (и достичь лучшего коэффициента шума), чем увеличивать мощность передатчика.

Определение коэффициента шума является простым и наглядным. Фактор шума (F) (или коэффициент шума в линейных единицах) какой-либо цепи определяется как отношение сигнал/шум на входе цепи к отношению сигнал/шум на выходе цепи:

$$F = (S_i N_i) / (S_o N_o), \text{ где}$$

S_i = уровень мощности сигнала на входе
 S_o = уровень мощности сигнала на выходе
 N_i = уровень мощности шума на входе
 N_o = уровень мощности шума на выходе

Коэффициент шума (NF) - фактор шума, выраженный в децибелах: $NF = 10 \cdot \lg(F)$

Это определение справедливо для любых электрических цепей, в том числе и таких, которые переносят частоту входного сигнала на другое значение частоты на выходе, как, например, преобразователи с повышением или понижением частоты.

Для лучшего понимания понятия коэффициента шума рассмотрим усилитель, в котором уровень сигнала на выходе равен уровню сигнала на входе, умноженному на коэффициент усиления. Если усилитель является идеальным, уровень шума на выходе будет также равен уровню шума на входе, умноженному на коэффициент усиления, следствием чего является одно и то же значение отношения сигнал/шум как на входе, так и на выходе усилителя. Однако для любого реального усилителя уровень шума на выходе больше, чем уровень шума на входе, умноженный на коэффициент усиления, и поэтому отношение сигнал/шум на выходе меньше, чем на входе. В результате фактор шума F обычно больше единицы, а NF - больше 0 дБ.

Важно отметить, что при измерении и сравнении значений коэффициента шума предполагается, что испытательная система должна обеспечить идеальное 50-омное согласование на входе и выходе тестируемого устройства (ТУ). Однако в реальности такого никогда не случается. Позднее мы обсудим, какие последствия для точности измерений возникают в результате неполного 50-омного согласования в испытательной системе, и покажем, каким образом методы калибровки и измерения могут компенсировать ошибки, порождаемые из-за неполного 50-омного согласования в источнике.

Что такое коэффициент шума? (продолжение)

Другой способ выражения уровня шума, добавляемого усилителем или системой, основан на эффективной температуре шума, приведенной ко входу (T_e). Чтобы понять смысл этого параметра, напомним, что уровень шума, который можно получить от пассивной согласованной нагрузки, может быть представлен выражением kTB , где k - постоянная Больцмана, T - температура согласованной нагрузки в градусах Кельвина, а B - полоса пропускания системы. Для заданного значения полосы уровень шума прямо пропорционален температуре. Поэтому уровень шума, создаваемый устройством, может быть выражен в виде эквивалентной температуры шума, нормализованной к полосе 1 Гц. Например, уровень электрического шума на выходе источника шума с избыточным коэффициентом шума (ИКШ), равным 15 дБ, эквивалентен согласованной нагрузке при температуре 8880 К. Фактор шума любого реального устройства может быть выражен как эффективная температура входного шума. Хотя T_e не является в действительности физической температурой усилителя или преобразователя частоты, она является эквивалентной температурой (в градусах Кельвина) входной согласованной нагрузки, подключенной к идеальному ("бесшумному") устройству, которая могла бы создать такой же уровень дополнительного шума на выходе. T_e выражается через фактор шума следующим образом:

$$T_e = 290 \cdot (F - 1)$$

График зависимости T_e от коэффициента шума показан на рисунке 1. Хотя характеристики большинства МШУ описываются с использованием коэффициента шума, T_e часто используется для описания характеристик МШУ, которые имеют значения коэффициента шума меньше, чем 1 дБ. T_e также полезна для математических вычислений, включающих мощности шума.

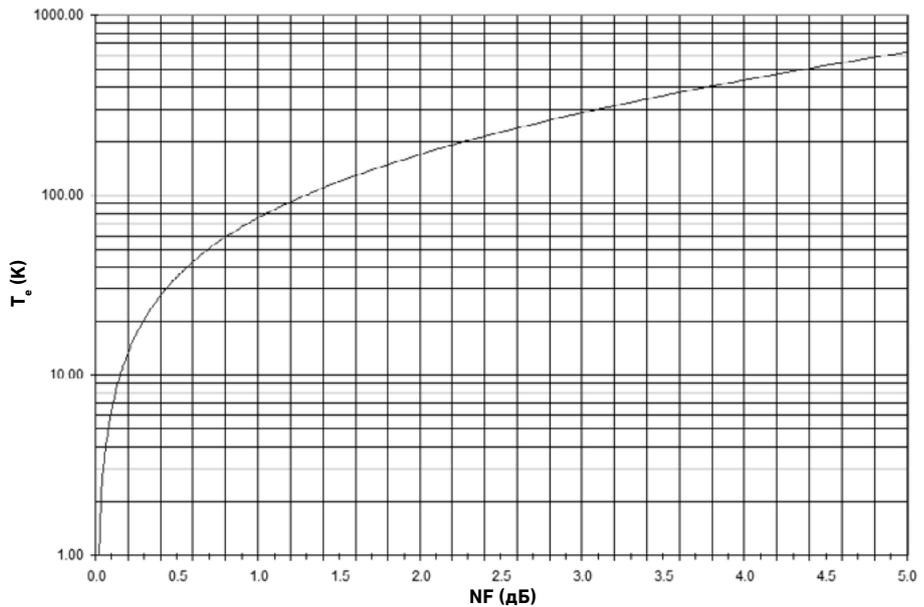


Рисунок 1 - Зависимость эффективной температуры шума от коэффициента шума.

Значение точности измерения коэффициента шума

Данный документ поможет читателям более детально изучить проблемы точности измерений, относящихся к измерениям коэффициента шума. Точность измерений важна как в процессе НИОКР, так и на производстве. Более высокая точность на этапе НИОКР означает, что будет достигнута более хорошая корреляция между результатами моделирования и измерений, что поможет разработчикам быстрее усовершенствовать свои разработки. Однако более высокая точность также означает, что разработчик системы может лучше оптимизировать приёмно-передающие системы, подобные тем, которые используются при решении задач радиолокации. При определении рабочих характеристик для всех индивидуальных компонентов системы разработчик системы должен добавить поля допусков параметров, учитывающие погрешности измерений, поскольку разработчики компонентов будут измерять свои устройства, чтобы подтвердить их рабочие характеристики. Что касается коэффициента шума, повышенная точность измерений и меньшие поля допусков параметров означают, что МШУ может иметь лучшие характеристики, что, в свою очередь, означает, что для достижения того же самого отношения сигнал/шум можно использовать в передатчиках усилители с меньшей мощностью. Это позволяет разрабатывать передатчики, которые обладают меньшим объёмом, массой и стоимостью, что в совокупности очень важно для авиационной и аэрокосмической отраслей.

В условиях производства повышенная точность измерений позволяет также использовать меньшие поля допусков параметров, что обеспечивает наилучшую корреляцию результатов испытаний при использовании нескольких испытательных установок. Это означает, что меньше изделий придётся дорабатывать, в результате чего повышается выход годных изделий, увеличивается производительность и снижается стоимость испытаний. Меньшие поля допусков параметров также позволяют более точно определять технические характеристики устройств и выпускать более конкурентоспособные изделия, которые продаются по более высоким ценам или достигают увеличения доли на рынке.

Методы измерения коэффициента шума

Имеется два основных метода измерения коэффициента шума. Наиболее широко используемым является метод, который получил название метода Y-фактора или горячего/холодного источника. Он используется в анализаторах коэффициента шума компании Keysight Technologies, а также в технических решениях на базе анализаторов спектра.

Метод Y-фактора использует калиброванный источник шума, состоящего из специально разработанного шумового диода, который может быть включён или выключен, и следующего за ним аттенюатора для обеспечения хорошего согласования по выходу (рисунок 2). Когда диод находится в выключенном состоянии (то есть, ток смещения отсутствует), источник шума представляет для ТУ согласованную нагрузку при комнатной температуре. Когда к диоду прикладывается напряжение обратного смещения, он переходит в состояние лавинного пробоя, в результате чего формируется электрический широкополосный шум, который добавляется к шуму, формируемому согласованной нагрузкой при комнатной температуре. Этот уровень дополнительного шума определяется как "избыточный коэффициент шума" или ИКШ. Для данного источника шума ИКШ изменяется в зависимости от частоты. Типовые источники шума имеют номинальные значения ИКШ в диапазоне от 5 до 15 дБ, в зависимости от значения ослабления внутреннего аттенюатора. С использованием источника шума проводятся два измерения мощности шума на выходе ТУ, а также определяется отношение результатов этих двух измерений, которое называется Y-фактором и используется для вычисления коэффициента шума. Дополнительным результатом метода Y-фактора является также определение скалярного коэффициента передачи ТУ.



$$\text{Избыточный коэффициент шума (ИКШ)} = \frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{290\text{K}}$$

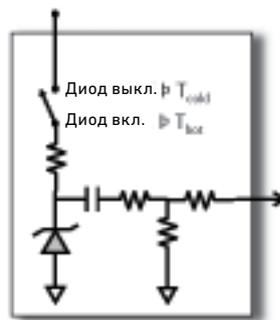


Рисунок 2 - Схема источника избыточного токового шума.

Второй метод измерения коэффициента шума - метод холодного источника, который также иногда называют методом прямого измерения шума. Он основывается на использовании одной "холодной" (обычно при комнатной температуре) согласованной нагрузки на входе ТУ и независимого измерения коэффициента передачи ТУ. Этот метод часто используется с векторными анализаторами цепей, поскольку в этом случае можно выполнить комплекс измерений параметров усилителей или преобразователей частоты (S-параметры, компрессия коэффициента усиления, коэффициент шума), используя только один набор подключений.

Метод Y-фактора

Рассмотрим метод Y-фактора более подробно. С использованием источника шума проводятся два измерения мощности шума. Одно измерение проводится с источником шума в его холодном состоянии (шумовой диод выключен), а другое измерение - с источником шума в его горячем состоянии (шумовой диод включён). Используя результаты этих двух измерений, а также известные значения ИКШ, можно вычислить две переменные: скалярный коэффициент передачи (усиления) и коэффициент шума тестируемого усилителя.

При измерении ТУ также измеряется шум, вносимый приёмником шума контрольно-измерительного прибора. Чтобы устранить эффекты, связанные с этим добавочным шумом, перед измерением проводится калибровка, в ходе которой источник шума подключается к контрольно-измерительному прибору, чтобы определить коэффициент шума внутреннего приёмника шума. Для получения коэффициента шума ТУ из результирующего измерения уровня шума системы может быть использовано простое математическое выражение. Этот шаг относится к коррекции шума второго каскада, поскольку измеренный коэффициент шума ТУ корректируется, основываясь на коэффициенте передачи (усиления) и коэффициенте шума второго каскада, в качестве которого в данном случае служит приёмник шума контрольно-измерительного прибора.

Если мощность шума на выходе усилителя представить в виде графика зависимости от уровня шума на входе, то он будет представлять прямую линию, как показано на рисунке 3, пока усилитель находится в линейном режиме. Такая модель поведения свойственна для МШУ, поскольку их назначением является усиление сигналов низкого уровня, которые находятся далеко от области компрессии усилителя. Если уровень шума на входе равен нулю, всё равно будет присутствовать некоторый уровень шума на выходе усилителя вследствие процессов генерации шума внутри активной схемы усилителя. Уровень шума, генерируемого усилителем, определяется при измерении коэффициента шума. Графически легко продемонстрировать, почему два измерения мощности шума можно использовать для решения задачи определения коэффициента усиления (наклон линии) и коэффициента шума (получаемого из точки пересечения с осью Y).

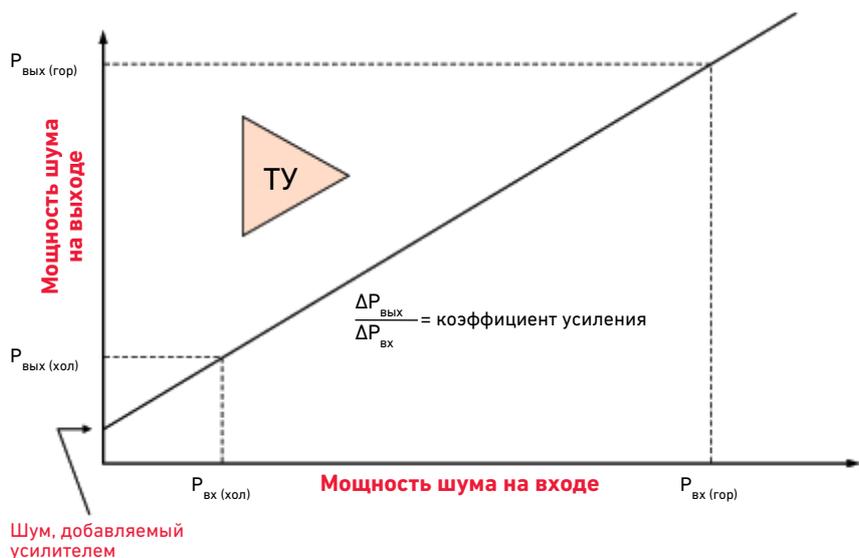


Рисунок 3 - Графическое представление метода Y-фактора

Метод холодного источника

Теперь более подробно рассмотрим метод холодного источника. Идея этого метода очень проста. Согласованная нагрузка при комнатной температуре (так называемая “холодная” согласованная нагрузка) помещается на входе ТУ, и проводится одно измерение мощности шума. Измеренный уровень шума является результатом усиления входного шума и аддитивного шума, вносимого усилителем или преобразователем. Если коэффициент усиления усилителя (или коэффициент передачи преобразователя) точно известен, то можно рассчитать уровень шума, вносимого исследуемым устройством, путём вычитания из результата измерения значения усиленного шума на входе ТУ. В результате останется только уровень шума, вносимого ТУ. Из этого можно рассчитать коэффициент шума. Чтобы измерения при использовании метода холодного источника были точными, коэффициент передачи ТУ должен быть известен с высокой степенью точности. Векторный анализатор цепей способен обеспечить необходимый уровень точности за счёт использования двухпортовой векторной коррекции ошибок, а также других передовых методов калибровки. Поэтому метод холодного источника хорошо подходит для решений на базе векторного анализатора цепей.

Как и при использовании метода Y-фактора, требуется этап калибровки для определения коэффициента шума и коэффициента передачи приёмников шума контрольно-измерительного прибора. Калибровку можно выполнить, используя источник шума, как и в случае метода Y-фактора, либо измеритель мощности и встроенный генератор в режиме свипирования по частоте для определения эффективной шумовой полосы пропускаемого приемника. Необходимо отметить, что при использовании метода холодного источника источник шума и измеритель мощности используются ТОЛЬКО во время калибровки, а не во время измерения ТУ.

На рисунке 4 показано графическое представление зависимости мощности шума на выходе от мощности шума на входе. Наклон линии известен из независимого измерения коэффициента передачи ТУ. Чтобы определить линию, требуется провести только одно измерение для установления точки пересечения с осью Y, которая позволяет получить коэффициент шума ТУ.

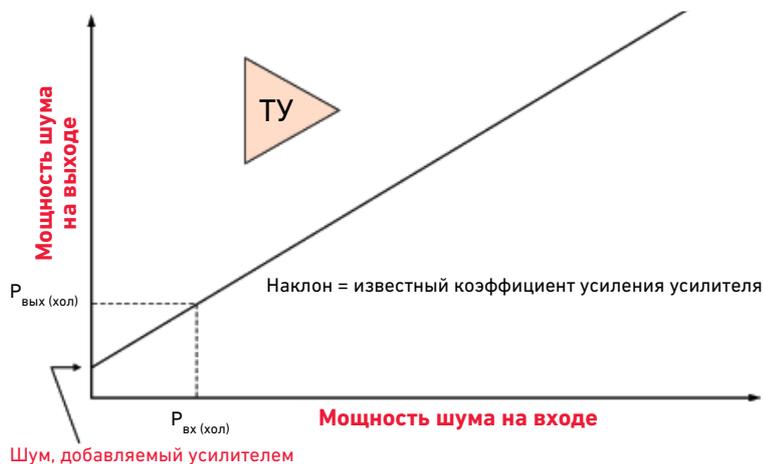


Рисунок 4 - Графическое представление метода холодного источника.

Следует заметить, что при использовании векторного анализатора цепей для измерения коэффициента передачи ТУ может быть использована векторная коррекция ошибок, которая даёт более точное значение, чем значение, полученное при использовании метода Y-фактора. Векторная коррекция ошибок требует, чтобы были измерены все четыре S-параметра ТУ, для чего требуется два цикла свипирования анализатора (в прямом и обратном направлении). Скорректированные значения S_{11} и S_{22} ТУ используются для коррекции других ошибок измерения. Это обсуждается позже. Модернизация этого подхода была разработана для измерения преобразователей частоты, в которых значения частоты сигнала на входе и выходе отличаются.

Ограничения точности измерений

Допущения, используемые в методе Y-фактора

Точность метода Y-фактора основывается на некоторых допущениях, касающихся усилителя и испытательной системы. Обоснованность этих допущений изменяется в зависимости от S-параметров и шумовых параметров испытательной системы и ТУ.

Первое допущение заключается в том, что источник шума представляет для ТУ стабильное 50-омное согласование. Это допущение верно, если источник шума подключен непосредственно к ТУ, особенно в случае использования источников шума с низким ИКШ, которые обычно обеспечивают лучшее согласование, чем источники шума с большим ИКШ. Однако это не очень хорошее допущение, если между источником шума и ТУ включена какая-либо электрическая цепь. Отклонение от идеального 50-омного согласования в источнике может внести значительную погрешность измерения, как будет показано ниже.

Имеется несколько примеров, когда непрактично или невозможно подключить источник шума непосредственно ко входу ТУ. Во-первых, многие устройства, используемые для решения задач в аэрокосмической/оборонной отраслях и коммерческих системах СВЧ-связи, не имеют соединителей. Например, многие приёмо-передающие модули, используемые в РЛС с фазированной антенной решёткой, имеют микрополосковые входные и выходные линии, которые требуют устройств подключения для сопряжения с коммерческим измерительным оборудованием, имеющим коаксиальные соединители. Другим примером являются монолитные ИС СВЧ диапазона (ММИС), которые часто тестируются, когда они ещё находятся на пластине, на которой были изготовлены, перед тем, как их запаяют в герметичные корпуса. В этом случае для подключения измерительного оборудования к ТУ должны использоваться пробники, обеспечивающие переход с коаксиальных трактов в копланарные. В обоих случаях источник шума невозможно подключить непосредственно ко входу ТУ.

Даже если ТУ имеет коаксиальные соединители, оно неоднократно измеряется автоматизированной испытательной системой (АИС), которая обеспечивает подключение множества измерительных приборов для полного определения характеристик ТУ. Например, анализатор цепей может использоваться для измерения S-параметров и компрессии коэффициента усиления, а анализатор спектра вместе с генераторами сигналов и источником шума - для измерения интермодуляционных искажений и коэффициента шума. Для реализации таких сценариев испытаний между измерительным оборудованием и ТУ помещается коммутационная матрица. Следовательно, опять при измерении коэффициента шума источник шума не может быть подключён непосредственно ко входу усилителя.

Во всех этих случаях, когда источник шума не может быть подключён непосредственно ко входу ТУ, добавление кабелей, переходов, переключателей, устройств подключения и/или пробников увеличивает потери, а также вносит дополнительные отражения, которые являются причиной ухудшения согласования в источнике испытательной системы. Хотя влияние потерь может быть снижено применением скалярной коррекции значений ИКШ источника шума, эффекты, связанные с ухудшением согласования в источнике, являются трудно устранимыми, приводя к соответствующему ухудшению точности измерения.

Второе допущение заключается в том, что согласование на выходе источника шума не изменяется при переключении между горячим и холодным состояниями. В действительности будет некоторое отличие, поскольку импеданс шумового диода будет изменяться в зависимости от того, находится ли он в смещённом или несмещённом состоянии. Это изменение имеет меньшую величину для источников шума с низким ИКШ, которые имеют большее ослабление между диодом и выходным соединителем.

Допущения, используемые в методе Y-фактора (продолжение)

Третье допущение заключается в том, что коэффициент шума приёмника шума измерительного прибора имеет одно и то же значение, когда подключается источник шума и когда подключается ТУ, даже если эти два устройства будут представлять для приёмника шума различные импедансы источника. Однако в действительности шумовые параметры приёмника шума будут определять, как его коэффициент шума будет изменяться с изменением импеданса источника. Это предполагает, что коррекция шума второго каскада должна быть настроена в зависимости от S_{22} ТУ.

Последнее допущение касается того, как следует поступать с имеющимся коэффициентом передачи усилителя, который используется при вычислениях коэффициента шума и определяется как коэффициент передачи усилителя с сопряжёнными согласованными импедансами на входе и выходе. Коэффициент усиления, получаемый при использовании метода Y-фактора, является в действительности скалярным коэффициентом усиления по мощности, который близок к значению имеющегося коэффициента усиления только в том случае, если согласование по входу и выходу ТУ близко к 50 Ом. Для плохо согласованных устройств, например, несогласованных транзисторов, для определения истинного имеющегося коэффициента усиления требуется измерение всех его четырёх S-параметров. Без векторного анализатора цепей сделать это невозможно.

Влияние этих допущений на точность измерений по методу Y-фактора лучше всего анализировать, используя калькулятор погрешностей коэффициента шума, который учитывает все эти эффекты. Примеры результатов, полученных с помощью такого калькулятора, будут рассмотрены позже. В следующем разделе более подробно будут рассмотрены погрешности измерения как для метода Y-фактора, так и для метода холодного источника.

Составляющие погрешности измерения коэффициента шума

Для понимания погрешности измерения коэффициента шума и отличий между методами измерений необходимо знать, какие источники погрешностей есть в испытательной системе, и как они взаимодействуют с ТУ. Имеется множество составляющих погрешности измерения коэффициента шума. Некоторые из источников погрешностей являются общими для обоих методов, хотя величины погрешностей могут сильно отличаться в зависимости от того, какой метод используется, и какой уровень коррекции ошибок применён. Некоторые источники погрешностей являются уникальными для каждого метода измерения.

Примерами общих источников погрешностей являются погрешность измерительного прибора и погрешность ИКШ. Эти два источника являются единственными источниками погрешностей, характеристики которых обычно точно определены. Характеристики погрешности ИКШ обычно предоставляются изготовителем источника шума. Они определяются в соответствии с методикой испытаний, используемой для определения значений избыточного шума. Погрешности измерительного прибора являются, как правило, самыми незначительными источниками погрешностей. Но было бы ошибкой считать, что полная погрешность измерения может быть определена с использованием только этих двух составляющих погрешности.

Джиттер является ещё одним источником погрешностей измерения, общим для обоих методов, вытекающим из измерений случайных сигналов низкого уровня (шума). Джиттер используется для определения точности оценки средней мощности шумового сигнала. Джиттер может рассматриваться как уровень шума на самом графике коэффициента шума (подобно шуму графика S-параметров при большом уровне сигнала, но для шума (или шумового сигнала) он больше), и связан с продолжительностью времени измерения шума и полосой пропускания испытательной системы. Эту составляющую можно уменьшить до допустимого значения посредством расширения полосы измерения или увеличения времени интегрирования (измерения). Это достигается в анализаторах PNA-X посредством увеличения числа усреднений шума. Усреднение шума используется только при измерении коэффициента шума, когда измеряется мощность шума, и устанавливается независимо от усреднения при свипировании, которое применяется к полному графику коэффициента шума.

Составляющие погрешности измерения коэффициента шума (продолжение)

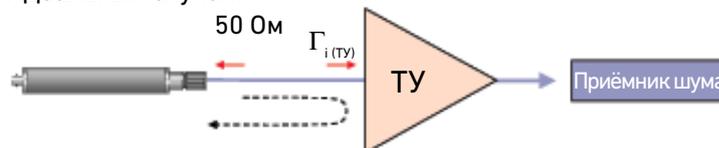
Последним общим источником погрешности измерения является дрейф параметров испытательной системы, в основном связанный с изменениями температуры. Дрейф часто присутствует в испытательных системах, но он может быть скомпенсирован их повторной калибровкой.

Как было указано ранее, предполагается, что измерения коэффициента шума проводятся с использованием испытательных систем с идеальным 50-омным согласованием. Если согласование в источнике испытательной системы не в точности равно 50 Ом, возникают два источника ошибок измерения. Если эти ошибки не будут скорректированы, они часто вносят самый большой вклад в погрешность измерения коэффициента шума.

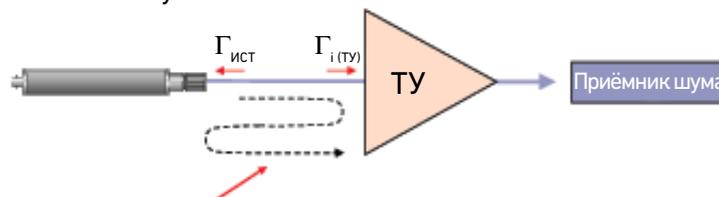
Ошибки рассогласования

Первая ошибка связана с наличием рассогласования между источником шума и входом ТУ. Это приводит к появлению ошибки рассогласования, зависящей от частоты шумового сигнала. Это тот же самый эффект рассогласования, который возникает при использовании синусоидальных сигналов для измерения S-параметров. На рисунке 5 показано проявление этого эффекта для измерения с использованием метода Y-фактора. Номинальное значение согласования по входу для большинства высокочастотных МШУ равно 50 Ом, но фактически оно варьируется в зависимости от частоты около этого значения. Этот справедливо и для согласования в источнике для источника шума и любой электрической цепи, включённой между источником шума и ТУ. В зависимости от степени рассогласования по входу в ТУ, некоторая часть мощности шума, поступающей от источника шума, отражается от входа усилителя. Если бы источник шума обеспечивал идеальное 50-омное согласование, эта отражённая мощность была бы полностью поглощена, и был бы измерен коэффициент шума МШУ при точном 50-омном согласовании. Однако источник шума не обеспечивает идеальное согласование в источнике, поэтому часть мощности шума переотражается обратно к ТУ, где она суммируется с первоначальным сигналом в зависимости от относительных фаз рассогласования. Эффект от этого рассогласования проявляется в виде классических пульсаций, наблюдаемых в результатах измерения, если полоса частот является достаточно широкой для представления одного или большего количества периодов повторения пульсаций. Часто эти пульсации не видны на результатах измерения. Это может быть связано с тем, что полоса частот измерения слишком узкая, или число точек измерения слишком мало, но составляющая погрешности рассогласования всё равно будет присутствовать в результатах измерения.

Идеальный случай:



Реальный случай:



Повторные отражения вызывают пульсации в зависимости от частоты

Рисунок 5 - Ошибки рассогласования при использовании метода Y-фактора.

Ошибки рассогласования (продолжение)

Для метода Y-фактора ошибки рассогласования могут быть довольно большими из-за неполного согласования источника шума (или источника шума, последовательно соединённого с переходами, кабелями, переключателями или зондами), и неспособности анализаторов спектра и анализаторов коэффициента шума устранять эти ошибки математически. Для метода холодного источника величина ошибки зависит от качества 50-омной согласующей нагрузки на входе ТУ и типа используемой коррекции ошибок, если это имеет место. При использовании векторного анализатора цепей с соответствующей коррекцией ошибок влияние ошибки рассогласования в случае метода холодного источника будет очень незначительным, так как векторный анализатор цепей способен измерять S-параметры испытательной системы и ТУ и математически компенсировать эффект рассогласования.

Эффекты шумовых параметров

Другой тип ошибок, который является результатом неполного согласования в источнике системы, не так хорошо известен для многих специалистов по измерениям. Причина в том, что некоторая часть мощности шума, генерируемой ТУ, выходит из входного порта ТУ, где она отражается обратно от источника шума (из-за неполного согласования в источнике системы) и поступает снова на вход ТУ. Отражённый шум приводит к изменению результатов измерения коэффициента шума ТУ в зависимости от фазы отражённой мощности шума и корреляции между различными генераторами шума внутри усилителя. Таким образом, измеренный коэффициент шума изменяется как функция импеданса источника системы.

Этот эффект хорошо знаком разработчикам МШУ, которые измеряют шумовые параметры индивидуальных устройств, используемых в конструкции усилителей. Эти шумовые параметры показывают разработчику, какой минимальный коэффициент шума будет получен для данного устройства, а также при каком импедансе источника (оптимальном значении - Γ_{opt}) этот минимум будет иметь место. Шумовые параметры также показывают разработчику, как коэффициент шума усилителя будет изменяться при отклонении импеданса источника от его оптимального значения. При данном изменении импеданса величина результирующего изменения коэффициента шума является разной для разных усилителей и преобразователей частоты. Некоторые устройства являются очень чувствительными к изменениям импеданса источника, а другие - в меньшей степени. Обладая достаточными знаниями о параметрах шума и S-параметрах устройства, разработчик МШУ может приступить к разработке согласующей схемы для оптимизации коэффициента усиления и коэффициента шума для конкретного применения.

При измерении коэффициента шума эффекты, связанные с шумовыми параметрами, могут стать серьёзным источником погрешностей, если ничего не предпринимать для их компенсации. Эта тема более подробно рассмотрена в следующем разделе.

Понятие шумовых параметров

Эффекты, связанные с шумовыми параметрами, возникают как на входе ТУ, так и на входе приёмника шума внутри контрольно-измерительного прибора. Чтобы понять, почему возникают ошибки, связанные с шумовыми параметрами, сначала необходимо понять, что такое шумовые параметры. Шумовые параметры усилителя описывают, как его коэффициент шума изменяется при изменении импеданса источника, $\Gamma_{ист}$. Шумовые параметры обычно отображаются в виде круговых диаграмм постоянного значения коэффициента шума на диаграмме Смита (рисунок 6). Данный набор круговых диаграмм соответствует одной частоте. Для любого конкретного усилителя независимо от того, используется ли он в качестве самостоятельного изделия или встроено во входной каскад преобразователя частоты, имеется минимальное значение коэффициента шума, которое возникает при некотором оптимальном значении импеданса, $\Gamma_{опт}$. Чем дальше отклоняется импеданс источника от оптимального значения, тем больше коэффициент шума усилителя. Шумовые параметры усилителей зависят как от токов смещения транзисторов, так и рабочей частоты.

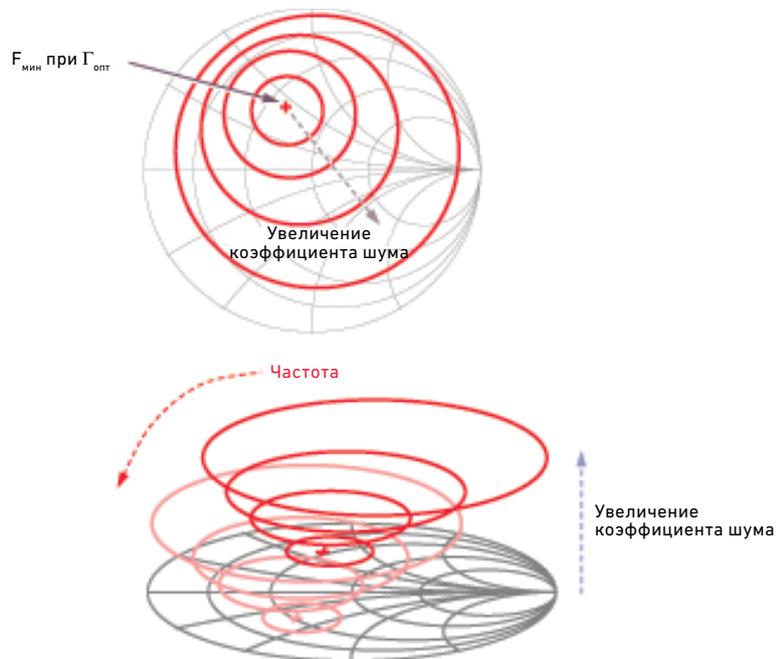


Рисунок 6 - Шумовые параметры, графически изображённые в виде круговых диаграмм постоянных значений коэффициента шума.

Взаимосвязь коэффициента шума и импеданса источника можно выразить математически с помощью выражения шумовых параметров:

$$F = F_{мин} + \frac{4R_n}{Z_0} \frac{|\Gamma_{опт} - \Gamma_{ист}|^2}{|1 + \Gamma_{опт}|^2 (1 - |\Gamma_{ист}|)^2}$$

Исходя из этого выражения, можно увидеть, что фактор шума F изменяется как функция импеданса источника, $\Gamma_{ист}$. Помимо Z_0 (характеристическое сопротивление системы 50 Ом), в выражении имеется три константы (две скалярные и одна векторная), соответствующие четырём шумовым параметрам. Эти четыре шумовых параметра следующие: $F_{мин}$ (минимальный фактор шума), $\Gamma_{опт-амплитуда}$, $\Gamma_{опт-фаза}$ (оптимальный импеданс источника, соответствующий $F_{мин}$), и R_n (шумовое сопротивление), которое является выражением чувствительности и управляет, насколько быстро коэффициент шума ухудшается при отклонении импеданса источника от $\Gamma_{опт}$. Те члены выражения, которые содержат квадраты от абсолютных значений, включая $\Gamma_{ист}$ - это то, что генерирует круговые диаграммы постоянного коэффициента шума.

Корреляция между источниками шума

Чтобы понять, почему коэффициент шума устройства изменяется в зависимости от входного согласования, рассмотрим более подробно двухпортовую модель усилителя с источниками шума. Двухпортовая цепь с шумами будет иметь два источника шума. Один источник шума связан с входным портом, а второй источник шума с выходным портом. Математически генераторы шума могут быть представлены как источники тока или напряжения, либо как сочетание этих двух типов источников. Нижнее изображение, представленное на рисунке 7, широко используется для анализа шума, поскольку отделяет генераторы шума от идеального блока усиления и помещает генераторы шума на входе усилителя, упрощая понимание того, как согласование в источнике взаимодействует с этими двумя генераторами. Эти два источника шума в основном не зависят друг от друга, но в типовых случаях между ними имеется некоторая степень корреляции в зависимости от физических и электрических характеристик усилителя.

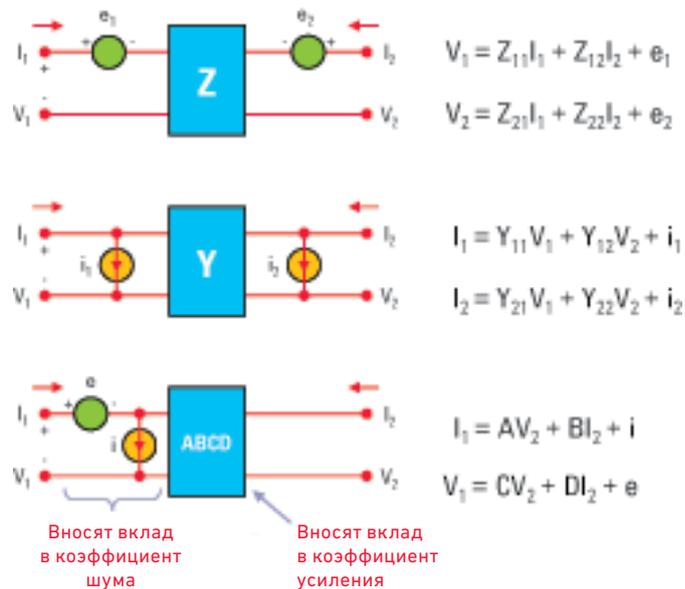


Рисунок 7 - Двухпортовые модели с источниками шума.

Корреляция между источниками шума (продолжение)

Идея корреляции между источниками шума является ключевой для понимания шумовых параметров. Как показано на рисунке 8, если два источника шума коррелированы полностью, то мгновенные значения их сигналов (ток и напряжение) будут отличаться только коэффициентом масштабирования (усиления). Если они полностью не коррелированы, то каждый сигнал будет в полном смысле слова случайным и не связанным с другим сигналом. В реальных усилителях степень корреляции будет находиться между этими двумя крайностями, поскольку источники шума, связанные с входными и выходными портами, совместно используют общую активную схему внутри усилителя. Эти физические источники шума генерируют шум как в прямом, так и обратном направлении (что способствует корреляции), но изменения амплитуд и фаз в каждом направлении будут отличаться (что не способствует корреляции). Например, транзисторы имеют усиление в одном направлении, а потери - в другом. Если имеется любая степень корреляции между источниками шума, то будет и некоторое значение импеданса источника (Γ_{opt}), который обеспечивает правильную величину амплитудного и фазового сдвига, обеспечивающего максимальную компенсацию, которая приводит к минимальному коэффициенту шума.

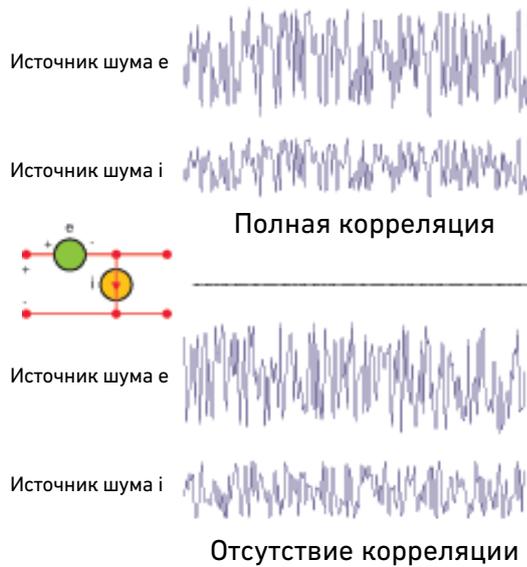


Рисунок 8 - Корреляция между источниками шума.

Корреляция между источниками шума (продолжение)

Концепция шумовых параметров имеет непосредственное значение для возможности точно измерять коэффициент шума при 50-омном согласовании. Поскольку импеданс источника испытательной системы изменяется около значения 50 Ом, измеренное значение коэффициента шума ТУ будет также изменяться, если $\Gamma_{ист}$ пересекает круговые диаграммы шума вблизи центра диаграммы Смита. На рисунке 9 показано согласование по входу источника шума с ИКШ, равным 15 дБ, в выключенном состоянии. Если оно отцентрировано на значении 50 Ом, то его коэффициент отражения чётко изменяется как функция частоты. Нескорректированное согласование в источнике векторного анализатора цепей (ВАЦ) даже хуже, что неудивительно, и обусловлено его более сложной структурной схемой. Поскольку коэффициент шума усилителя является функцией импеданса источника, можно увидеть, как традиционные системы измерения коэффициента шума могут вносить значительные погрешности измерения из-за неидеального согласования в источнике. Влияние этого эффекта также проявляется в виде пульсаций в результатах измерения, неотличимых от пульсаций, связанных с ошибками рассогласования. Чем больше изменяется согласование в источнике, тем больше погрешности, вносимые в результаты измерения коэффициента шума.

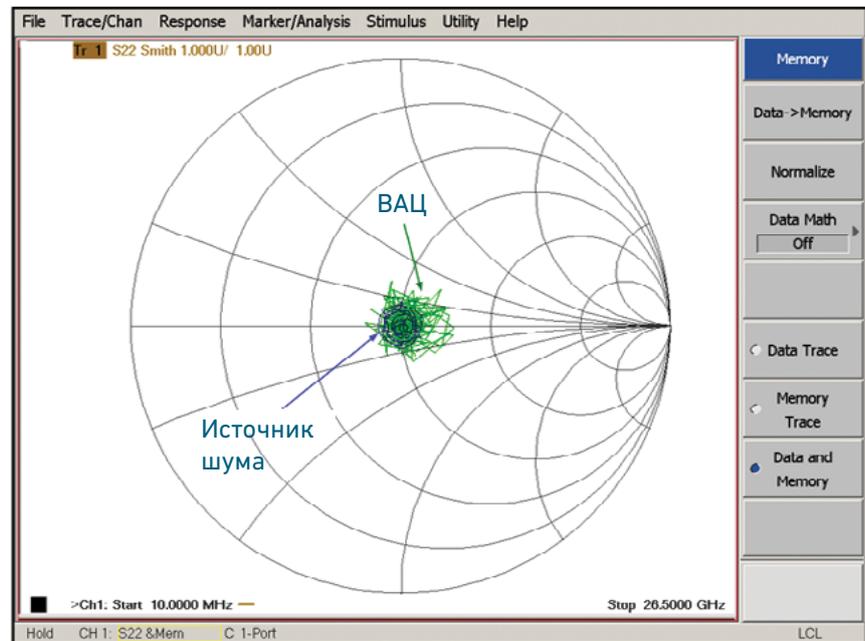


Рисунок 9 - Согласование в источнике источника шума и ВАЦ.

Эффекты, связанные с шумовыми параметрами, присутствуют как при измерении методом Y-фактора, так и при измерении методом холодного источника. При измерениях методом Y-фактора погрешности, вносимые шумовыми параметрами, присутствуют даже в том случае, если источник шума подключен непосредственно к ТУ. Если согласование источника шума хорошее, погрешность обычно небольшая. Однако в зависимости от того, какой источник шума используется и на какой частоте, эта погрешность может быть значительной. Добавление компонентов между источником шума и ТУ усиливает этот эффект, даже если используется компенсация потерь, приводя к значительно большим величинам погрешностей.

При использовании векторного анализатора цепей и метода холодного источника нескорректированное согласование в источнике системы является обычно плохим, если не используются аттенюаторы или методы коррекции неполного согласования в источнике. При использовании уникального метода векторной коррекции неполного согласования в источнике анализатора PNA-X, которая будет обсуждаться позже, эффективное согласование в источнике получается превосходным, результатом чего является очень небольшая величина погрешности, связанная с шумовыми параметрами ТУ или приёмника шума внутри PNA-X.

Модели погрешностей при измерении коэффициента шума

Теперь, когда основные источники погрешностей при измерениях коэффициента шума рассмотрены, мы можем рассмотреть визуальные модели погрешностей, которые показывают, как испытательная система и ТУ взаимодействуют во время калибровки и измерений. На рисунке 10 показана упрощенная модель погрешностей, присутствующих при измерениях методом Y-фактора. Погрешность ИКШ присутствует как на этапе калибровки, так и во время измерения. Погрешности, связанные с рассогласованием, обусловлены неполным согласованием (не в точности равным 50 Ом) источника шума, приёмника шума и ТУ. Погрешности, связанные с шумовыми параметрами, также появляются из-за неполного согласования источника шума. Это приводит к тому, что коэффициент шума приёмника шума и ТУ изменяется в зависимости от частоты. Этот источник погрешностей зависит от шумовых параметров приёмника и ТУ. Джиттер и погрешность измерительного прибора вносят относительно небольшой вклад в погрешность измерения.

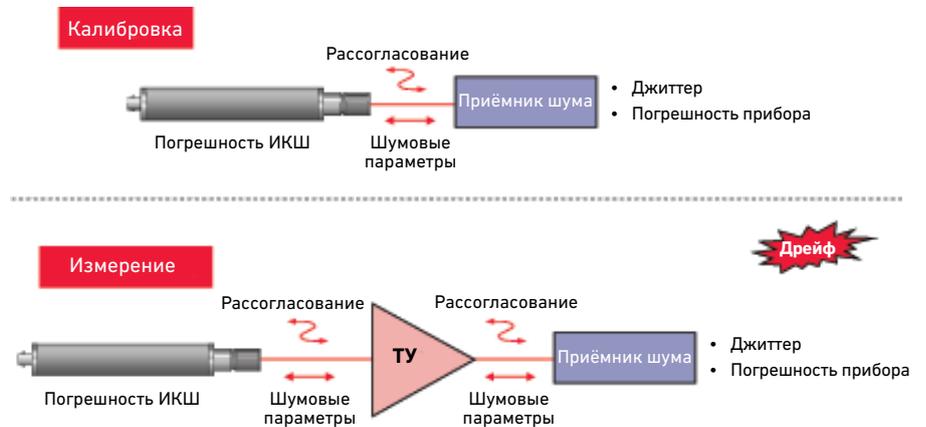


Рисунок 10 - Модель погрешностей при измерении методом Y-фактора.

На рисунке 11 показана упрощенная модель погрешностей для реализации метода холодного источника в анализаторе цепей PNA-X с использованием источника шума для калибровки приёмника шума PNA-X. Процесс калибровки имеет больше шагов, чем при использовании метода Y-фактора. Погрешность ИКШ представлена только на этапе калибровки, поскольку источник шума не используется во время измерения. Заметим также, что показаны составляющие погрешности, обусловленные рассогласованием и шумовыми параметрами, но они очень незначительны благодаря передовым методам коррекции ошибок компании Keysight. Погрешность S-параметров, погрешность из-за неполного согласования на входе приёмника и погрешность установки состояния тюнера импеданса являются дополнительными источниками погрешностей, но они также незначительны благодаря векторной коррекции ошибок. Джиттер также присутствует, как и при измерениях методом Y-фактора, а динамическая погрешность эквивалентна погрешности измерительного прибора. Оба они являются ничтожно малыми источниками погрешностей.

Модели погрешностей при измерении коэффициента шума (продолжение)



* Методы векторной коррекции ошибок и коррекции согласования в источнике, используемые PNA-X, значительно снижают погрешности, обусловленные рассогласованием и шумовыми параметрами, в сравнении с методом Y-фактора.

Рисунок 11 - Модель погрешностей при измерении методом холодного источника с использованием анализатора цепей PNA-X.

Для оценки суммарной погрешности измерения компанией Keysight был разработан калькулятор погрешностей, использующий метод Монте-Карло. Этот калькулятор объединяет все источники погрешностей для каждого из методов измерения коэффициента шума. Таким образом можно сравнить суммарные погрешности измерения при использовании методов Y-фактора и холодного источника для конкретного ТУ. Пример этого будет показан позже. Калькулятор погрешностей PNA-X (рисунок 12) может быть загружен с сайта по ссылке: www.keysight.com/find/nfu.

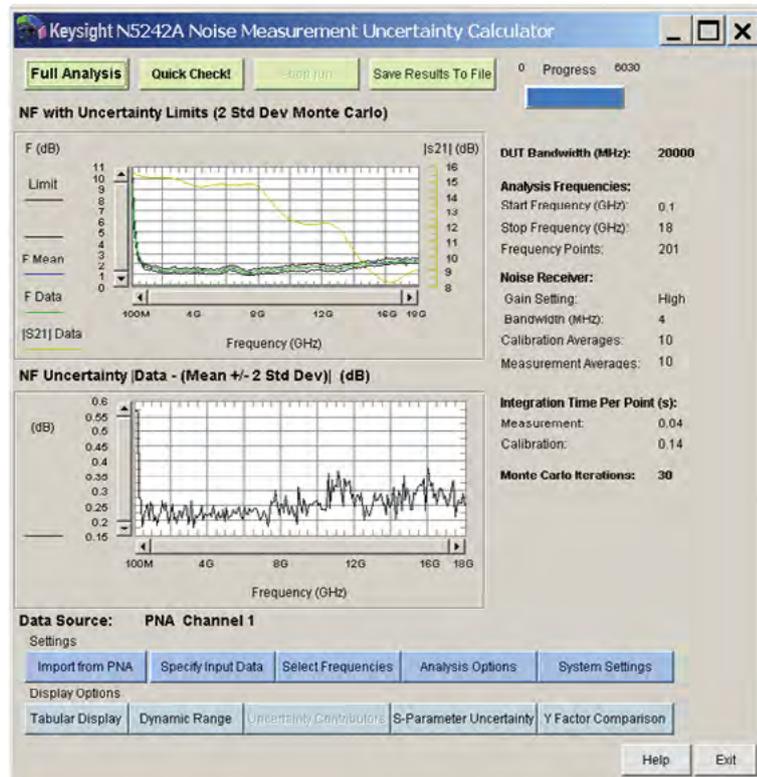


Рисунок 12 - Калькулятор погрешностей измерения коэффициента шума PNA-X использует метод Монте-Карло для вычисления суммарной погрешности измерения коэффициента шума.

Уникальный подход PNA-X

В данном разделе будет рассмотрена уникальная реализация метода холодного источника для измерения коэффициента шума, использованная в анализаторах цепей PNA-X, а также показано, как эти измерения могут быть проведены для усилителей, преобразователей частоты и балансных (дифференциальных) устройств.

Опции для измерения коэффициента шума анализатора цепей PNA-X расширяют комплекс измерений, которые могут быть проведены при одном подключении к ТУ. Например, при одном подключении можно измерить S-параметры, коэффициент шума, компрессию коэффициента усиления и фазы, гармоники и интермодуляционные искажения. Измерения коэффициента шума с использованием PNA-X обеспечивают наивысшую точность в сравнении с любыми техническими решениями для измерения коэффициента шума, представленными в настоящее время на рынке.

Варианты выбора опций

Доступно несколько опций, позволяющих добавить возможности измерения коэффициента шума для PNA-X. Опция 029 (для моделей N5241A с диапазоном частот до 13,5 ГГц и N5242A с диапазоном частот до 26,5 ГГц) и опция H29 (для моделей N5244A с диапазоном частот до 43,5 ГГц и N5245A с диапазоном частот до 50 ГГц) добавляют как аппаратные средства в виде малошумящих приёмников с диапазоном частот до 13,5 ГГц (для модели N5241A) или до 26,5 ГГц (для моделей N5242/44/45A), так и специализированные алгоритмы калибровки и измерения. Опция 028 применяет алгоритмы калибровки и измерения к стандартным приёмникам (к тем, которые обычно используются для измерения S-параметров, усиления преобразования, компрессии коэффициента усиления и интермодуляционных искажений), расширяя возможность измерения коэффициента шума до 50 ГГц.

Варианты выбора опций (продолжение)

На рисунке 13 показана структурная схема 2-портового анализатора цепей N5241A (13,5 ГГц) или N5242A (26,5 ГГц) серии PNA-X с дополнительными аппаратными средствами для измерения коэффициента шума, включёнными в состав опции 029. При измерении коэффициента шума с малошумящим приёмником имеется пять установок полосы пропускания шума: 24, 8, 4, 2 и 0,8 МГц. При использовании дополнительного моста на измерительном порте 2 измерения S-параметров, усиления преобразования и мощности шума, необходимые для метода холодного источника, можно выполнить без механического переключения. Это особенно полезно, если для настройки устройства с целью оптимизации коэффициента шума требуется несколько измерений, или если данное устройство является частью испытательной системы, предназначенной для массового производства.

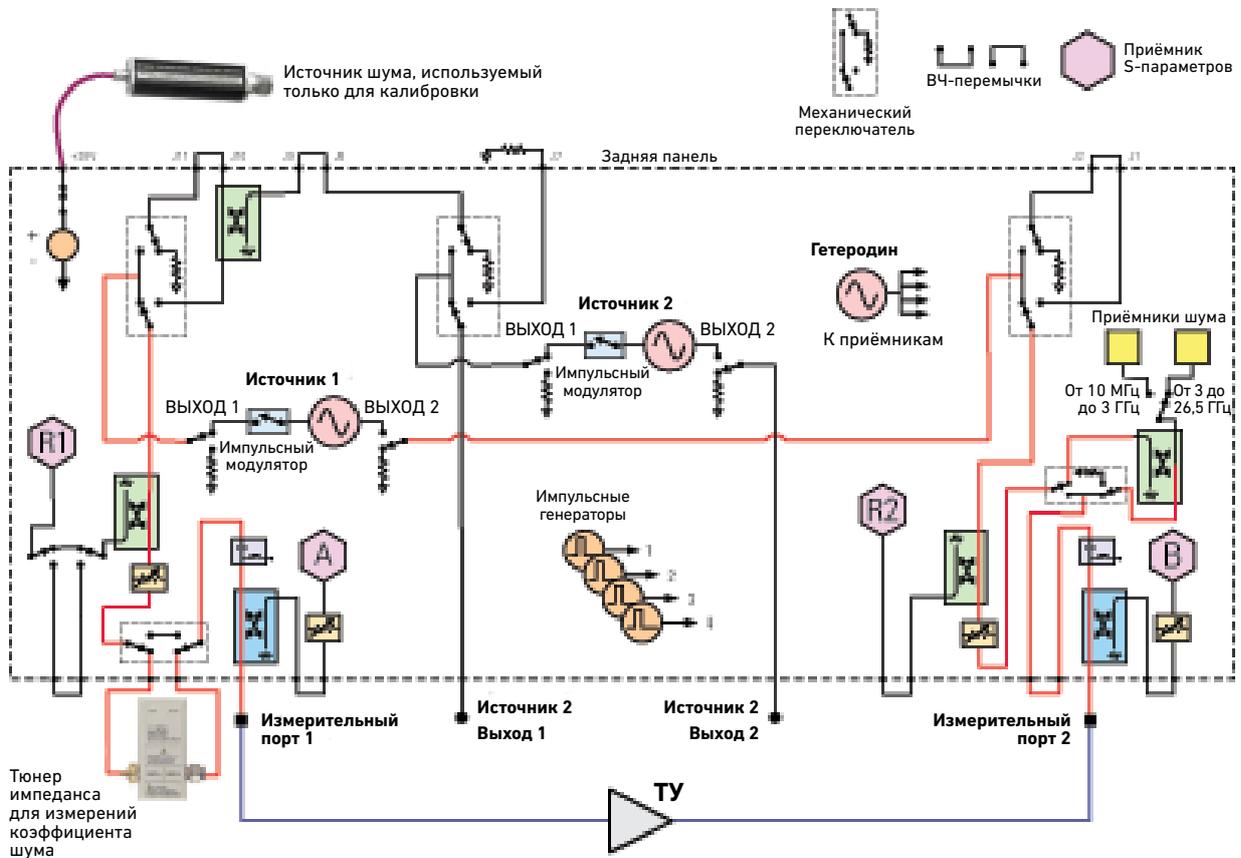
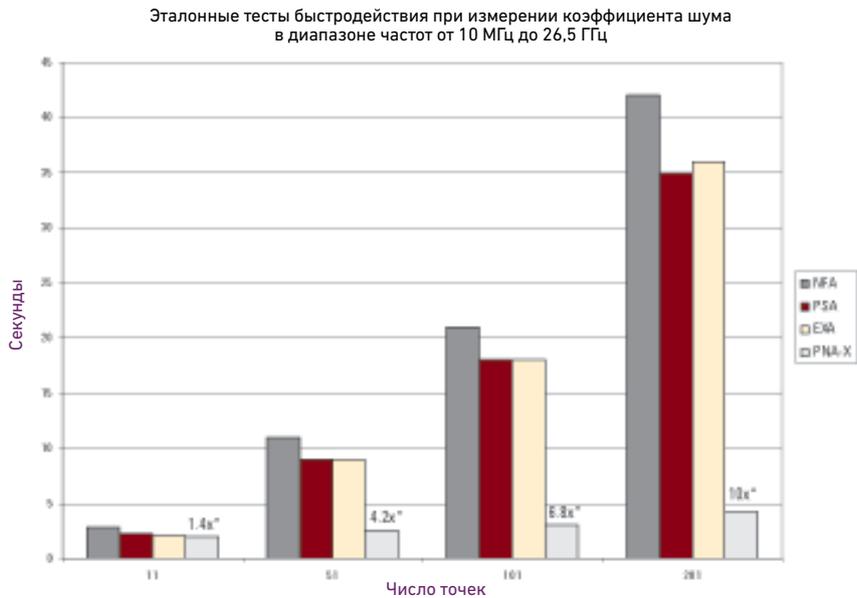


Рисунок 13 - 2-портовый анализатор цепей серии PNA-X с опцией аппаратных средств для измерения коэффициента шума.

При использовании технического решения для измерения коэффициента шума на базе анализатора цепей серии PNA-X также требуется источник шума (при использовании малошумящих приёмников) и/или измеритель мощности (при использовании стандартного приёмника или при измерении преобразователей частоты). И тот, и другой используются только во время проведения калибровки. Для измерений с полной векторной коррекцией ошибок требуется стандартный модуль электронной калибровки (ECal), который должен быть назначен для использования в качестве тюнера импеданса. Кроме того, ещё один модуль ECal или механический калибровочный комплект требуется для калибровки в части, касающейся S-параметров.

Варианты выбора опций (продолжение)

Модуль ECal, используемый в качестве тюнера импеданса, помогает устранить эффекты, связанные с неполным согласованием в источнике системы. Это будет подробнее объяснено ниже. За счёт этого одновременно обеспечивается более высокая точность, когда проводится комплекс измерений при одном наборе подключений. С опциями 029 и H29 включён обходной переключатель в контуре источника на измерительном порте 1, за счёт чего модуль ECal может быть исключен при проведении измерений компрессии коэффициента усиления или интермодуляционных искажений, если необходимо. Возможен также выбор скалярной калибровки, которая характеризуется меньшей точностью, но при этом обеспечивается большее быстродействие, и не требуется модуль ECal, используемый в качестве тюнера импеданса. Даже при использовании полной векторной коррекции неполного согласования в источнике техническое решение для измерения коэффициента шума на базе PNA-X обеспечивает большее быстродействие, чем технические решения на базе анализаторов коэффициента шума серии NFA и анализаторов спектра (рисунок 14). Высокое быстродействие PNA-X позволяет использовать большее число точек для обеспечения высокой разрешающей способности измерений.



* Преимущество в быстродействии PNA-X в режиме свипирования в сравнении с NFA

Рисунок 14 - Сравнение быстродействия PNA-X с измерениями, использующими метод Y-фактора, без усреднения.

Коррекция эффектов, связанных с шумовыми параметрами

Как упоминалось ранее, обычная векторная коррекция ошибок используется с векторными анализаторами цепей для коррекции ошибок рассогласования. Для коррекции ошибок, связанных с шумовыми параметрами, должны быть измерены шумовые параметры ТУ, для чего, в свою очередь, требуется тюнер импеданса на входе ТУ. Тюнер импеданса может быть электромеханического типа. Такой тюнер обычно используется с испытательными системами для измерения шумовых параметров. Он воспроизводит широкий диапазон значений импеданса источника для ТУ. Может использоваться также вышеупомянутый модуль ECal, который воспроизводит более ограниченный диапазон значений импеданса, необходимый для вычисления коэффициента шума при 50-омном согласовании. Для более эффективной коррекции шума второго каскада шумовые параметры приёмников шума также должны быть измерены в процессе калибровки.

Коррекция эффектов, связанных с шумовыми параметрами (продолжение)

На рисунке 15 этот метод представлен в графическом виде. На диаграмме Смита квадрат в середине указывает место, в котором было бы желательно измерять коэффициент шума ТУ. Это место соответствует идеальному 50-омному согласованию в источнике. Однако, как отмечалось ранее, нам известно, что наша испытательная система не обеспечивает идеальное 50-омное согласование. Вместо предположения о том, что мы измеряем коэффициент шума с идеальным согласованием в источнике, мы намеренно обеспечиваем набор импедансов, которые НЕ РАВНЫ 50 Ом, но значения которых хорошо известны. Как показано на рисунке, мы представляем ТУ с минимум четырьмя различными значениями импеданса на каждой частоте и при каждом значении импеданса измеряем мощность шума, поступающего от ТУ. Значения импеданса этих четырёх состояний измеряются во время калибровки системы, а мощности шума измеряются с ТУ, установленным на своём месте. Пары значений импеданс/мощность шума затем используются для решения уравнения шумовых параметров (используя четыре уравнения с четырьмя неизвестными переменными), что, в свою очередь, обеспечивает очень точную калибровку коэффициента шума, соответствующую 50-омному согласованию в источнике. Таким образом, используя измерения, показанные в виде маленьких кружков на диаграмме Смита, мы можем точно вычислить коэффициент шума, связанный с квадратом в центре диаграммы.

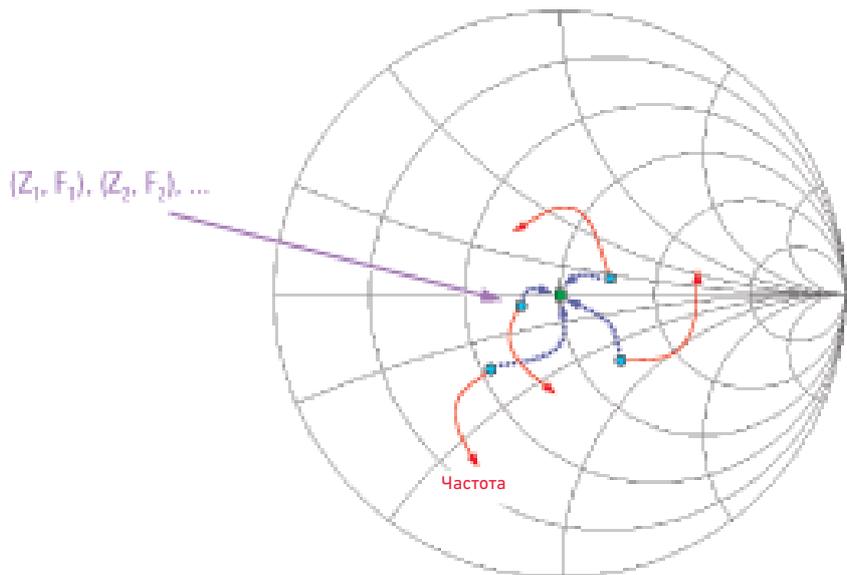


Рисунок 15 - Графическое представление уникального метода коррекции согласования в источнике, используемого в PNA-X.

Точно так же, как векторная коррекция ошибок используется для значительного улучшения нескорректированного согласования в источнике и нагрузке векторного анализатора цепей при измерении S-параметров, метод коррекции согласования в источнике представляет неполное согласование в источнике PNA-X таким, как если бы оно выглядело вполне допустимым для измерений коэффициента шума. Во время реального измерения ТУ проводится свипирование частоты для каждого состояния импеданса, а не изменение состояний импеданса в каждой частотной точке, следствием чего является ускорение времени измерений. При использовании модулей ECal серии N4690 можно выбрать до семи состояний импеданса для улучшения точности, используя избыточно определённые данные.

Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора

Используя калькулятор погрешностей коэффициента шума на базе метода Монте-Карло, описанный ранее, были рассчитаны погрешности измерения на примере МШУ (рисунок 16). Измерения проводились в автоматизированной испытательной системе (АИС). Приведено сравнение результатов измерений при использовании метода коррекции неполного согласования в источнике PNA-X и метода Y-фактора. Использовался источник шума с ИКШ = 14 дБ. Характеристики МШУ для данного примера: коэффициент усиления = 15 дБ, согласование по входу/выходу = 10 дБ, коэффициент шума = 3 дБ, $\Gamma_{\text{мин}} = 2,7$ дБ, $\Gamma_{\text{опт}} = 0,27 + j0$, $R_n = \text{от } 12 \text{ до } 33$.

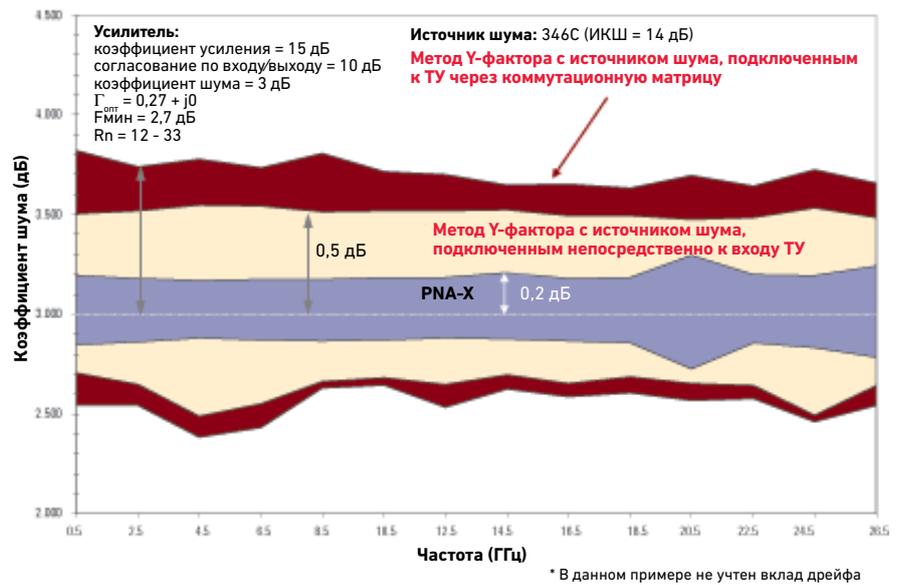


Рисунок 16 - Пример погрешностей измерения коэффициента шума в АИС.

В этом случае, даже если источник шума подключен непосредственно к усилителю, PNA-X даёт значительно меньшую погрешность измерения, чем метод Y-фактора (0,2 дБ для PNA-X против приблизительно 0,5 дБ для метода Y-фактора). При добавлении модели коммутационной матрицы между источником шума и МШУ погрешность измерения при использовании метода Y-фактора ухудшается приблизительно до 0,75 дБ. Для устройств с низким или средним коэффициентом шума степень улучшения, обеспечиваемая PNA-X, весьма значительна.

Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора (продолжение)

На рисунке 17 показано распределение основных составляющих погрешности измерения, приведённого в предыдущем примере. При использовании метода Y-фактора два источника погрешностей, которые вносят наибольший вклад, обусловлены неполным согласованием в источнике системы. Самый большой вклад вносит эффект, связанный с шумовыми параметрами и вызванный неидеальным согласованием источника шума, взаимодействующего с шумом, генерируемым ТУ. Следующий источник погрешностей, который вносит второй по величине вклад, обусловлен эффектами рассогласования. Необходимо отметить, что когда моделируемая цепь АИС вставляется между источником шума и ТУ, вклад эффектов, связанных с шумовыми параметрами, получается даже больше в сравнении с вкладом, обусловленным эффектами рассогласования. Для метода коррекции неполного согласования в источнике, который используется в PNA-X, самый большой вклад вносит погрешность ИКШ источника шума, используемого во время калибровки, которая влияет на точность измерения внутренних приёмников шума PNA-X.

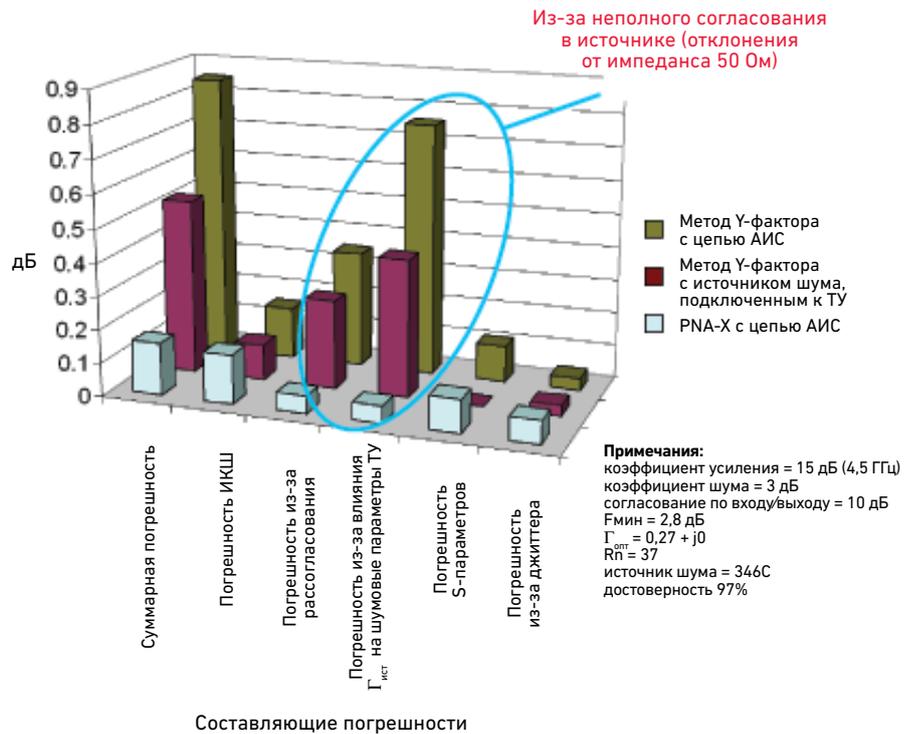


Рисунок 17 - Распределение составляющих погрешности для примера определения погрешности измерения коэффициента шума в составе АИС.

Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора (продолжение)

На рисунке 18 показан пример измерения на пластине, когда тестируемый МШУ не заключён в корпус. Это означает, что при использовании метода Y-фактора источник шума не может быть непосредственно подключён к усилителю, а вместо этого должен быть подключён через кабель и зонд. Погрешность измерения с использованием PNA-X увеличивается отчасти из-за потерь в зондах, которые наиболее значительны на частотах выше 24 ГГц. Но при этом погрешность PNA-X всё ещё значительно меньше, чем при использовании метода Y-фактора. Добавление коммутационной матрицы к установке зондового контроля делает метод Y-фактора ещё хуже, чем в предыдущем примере. Теперь погрешность составляет приблизительно 1,1 дБ в сравнении с 0,3 дБ для PNA-X.

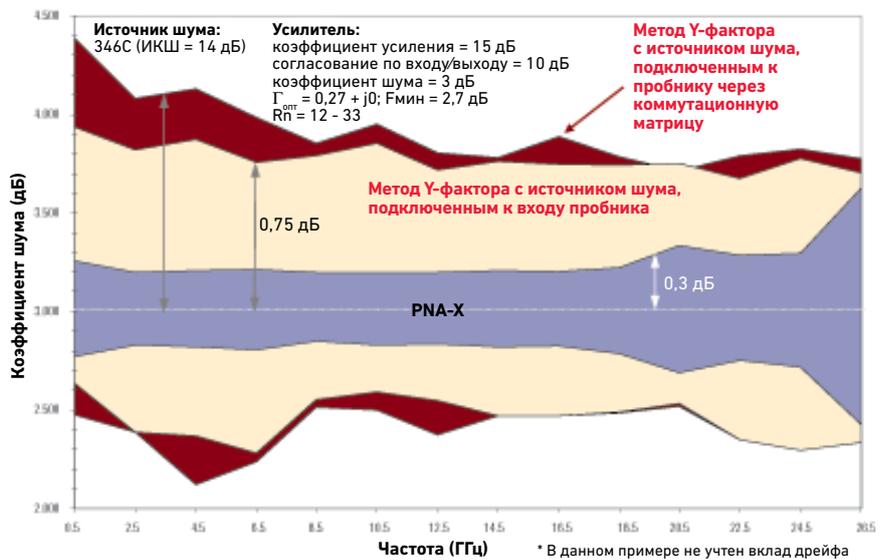


Рисунок 18 - Пример погрешности измерения коэффициента шума с использованием зондовой станции.

На рисунке 19 показано распределение основных составляющих погрешности для примера с использованием зондовой станции. Опять, как и в примере с АИС, источниками погрешностей, которые вносят наибольший вклад для метода Y-фактора, являются те, которые обусловлены эффектами рассогласования и эффектами, связанными с шумовыми параметрами.



Составляющие погрешности

Рисунок 19 - Распределение составляющих погрешности для примера определения погрешности измерения коэффициента шума на зондовой станции.

Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора (продолжение)

На рисунке 20 показано сравнение результатов реальных широкополосных измерений коэффициента шума несогласованного малошумящего транзистора в корпусе, включающих 401 точку и полученных с помощью метода коррекции неполного согласования в источнике PNA-X и метода Y-фактора, использующего источник шума с высоким значением ИКШ (14 дБ). Получение более точных результатов измерений для данного устройства затруднено из-за его плохого согласования по входу. Отметим, что график результатов измерения PNA-X является относительно равномерным и соответствует среднему значению графика результатов измерений, полученных с использованием метода Y-фактора, которые имеют вид пульсаций. Пульсации при измерениях с использованием метода Y-фактора нечасто видны по двум причинам. Первая причина заключается в том, что многие устройства являются узкополосными, и поэтому используемая полоса частот измерения часто слишком узкая, чтобы отобразить присущие данному методу пульсации. При узкополосных измерениях с центральной частотой ниже примерно 15 ГГц метод Y-фактора может представить рабочие характеристики МШУ либо гораздо лучше, либо гораздо хуже, чем на самом деле. Вторая причина заключается в том, что даже при широкополосных измерениях невысокая скорость измерений, обеспечиваемая методом Y-фактора, вынуждает использовать небольшое число точек измерения. За счёт этого представление реальных рабочих характеристик устройства формируется в условиях недостаточного шага дискретизации или наложения спектров. На рисунке показано, как выглядел бы график результата измерения в случае использования только 11 точек измерения. Это значение по умолчанию, которое определяет число точек графика в анализаторах коэффициента шума серии NFA. Если используется 401 точка, пульсации ясно видны. Анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает меньший уровень пульсаций и за счёт этого - более высокую точность измерений и более достоверное отображение коэффициента шума исследуемого устройства.

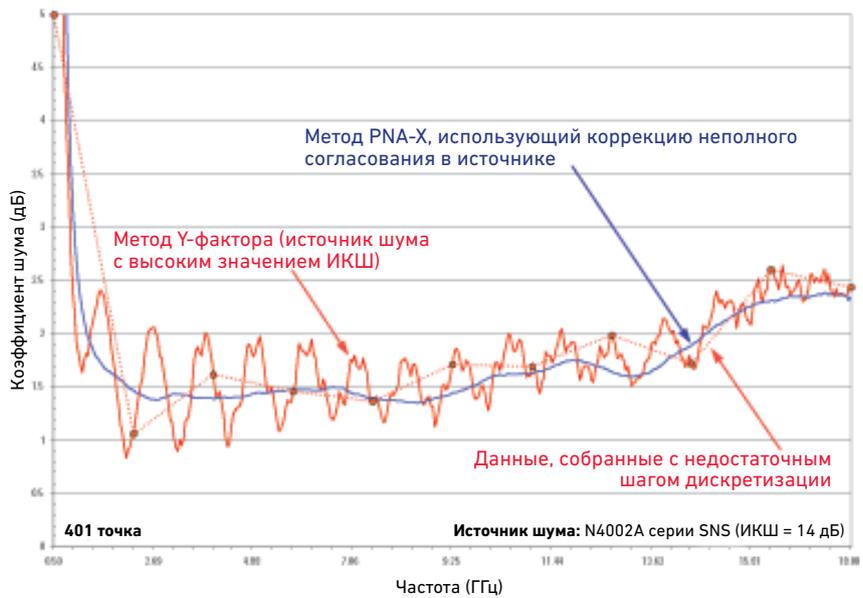


Рисунок 20 - Примеры результатов измерения коэффициента шума, полученных при использовании анализатора цепей серии PNA-X и анализатора коэффициента шума серии NFA с источником шума с высоким значением ИКШ.

Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора (продолжение)

На рисунке 21 показано то же самое измерение, использующее источник шума с низким значением ИКШ (6 дБ). В этом примере пульсации при измерении методом Y-фактора меньше, но хуже, чем обеспечивает метод PNA-X.

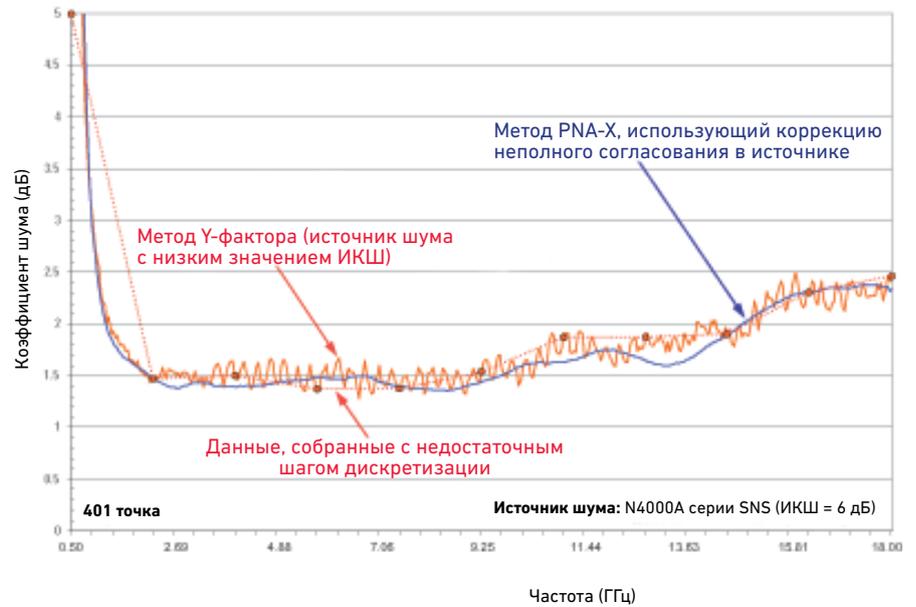


Рисунок 21 - Примеры результатов измерения коэффициента шума, полученных с помощью анализатора цепей серии PNA-X и анализатора коэффициента шума серии NFA при использовании источника шума с низким значением ИКШ.

Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора (продолжение)

Другим способом, позволяющим показать, присутствуют ли в испытательной системе погрешности измерения, вносимые в результате неполного согласования в источнике, является использование воздушной линии для вращения фазы согласования в источнике для ТУ. На рисунке 22 показан результат измерения коэффициента шума одного усилителя и усилителя с воздушной линией, включённой перед ним. Если испытательная система устраняет эффект неполного согласования в источнике, то добавление воздушной линии должно только увеличить коэффициент шума на величину потерь воздушной линии, которая в этом диапазоне частот значительно ниже 0,1 дБ. Этот эффект виден на нижнем графике, где показаны результаты измерений с использованием анализатора цепей серии PNA-X. Однако на верхнем графике, где показаны результаты измерений с использованием анализатора коэффициента шума серии NFA и источника шума (ИКШ = 14 дБ), можно увидеть, что добавление воздушной линии служит причиной значительных отличий в значениях коэффициента шума (в зависимости от частоты), больших, чем это можно было бы теоретически обосновать. Эти большие изменения показывают, что на результат измерения с использованием метода Y-фактора неблагоприятно влияет неполное согласование в источнике системы. Как отмечалось ранее, эффекты рассогласования и шумовых параметров из-за неполного согласования в источнике системы не могут быть устранены при использовании метода Y-фактора.

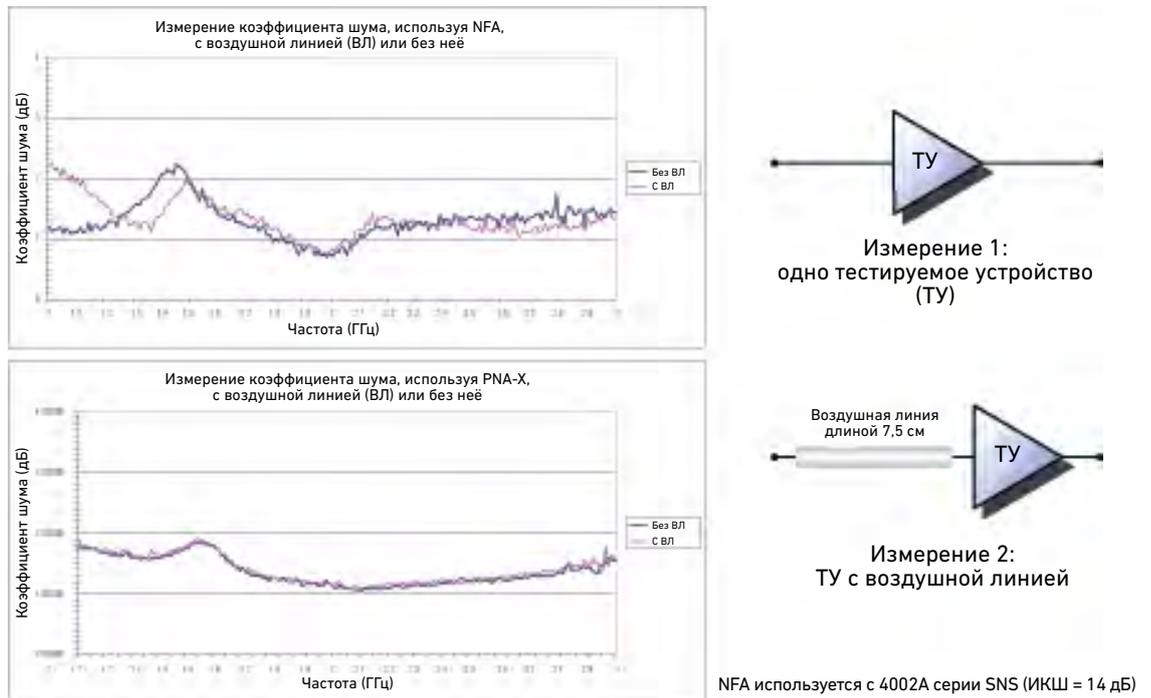


Рисунок 22 - Воздушная линия является эффективным средством выявления погрешностей измерения, вносимых в результате неполного согласования в источнике.

Сравнение результатов измерений при использовании PNA-X и метода Y-фактора (продолжение)

На рисунке 23 показан другой пример того, как неполное согласование в источнике может явиться причиной пульсаций в результатах измерений коэффициента шума с использованием метода Y-фактора. В данном случае для моделирования среды АИС перед ТУ был помещён простой отрезок гибкого кабеля длиной 12 дюймов (304,8 мм). Для измерений по методу Y-фактора этот кабель был вставлен между источником шума (ИКШ = 14 дБ) и ТУ. Скалярные потери в анализаторе коэффициента шума серии NFA. В АИС часто используются источники шума с высоким значением ИКШ, поскольку потери между источником шума и ТУ слишком большие, чтобы можно было получить хорошие результаты, используя источник шума с низким значением ИКШ. При измерениях с использованием анализатора цепей серии PNA-X этот кабель был частью испытательной системы, а плоскости калибровки находились на входе и выходе ТУ. Большие пульсации в результатах измерений по методу Y-фактора опять показывают, что неполное согласование в источнике системы является причиной значительных источников погрешностей измерения.

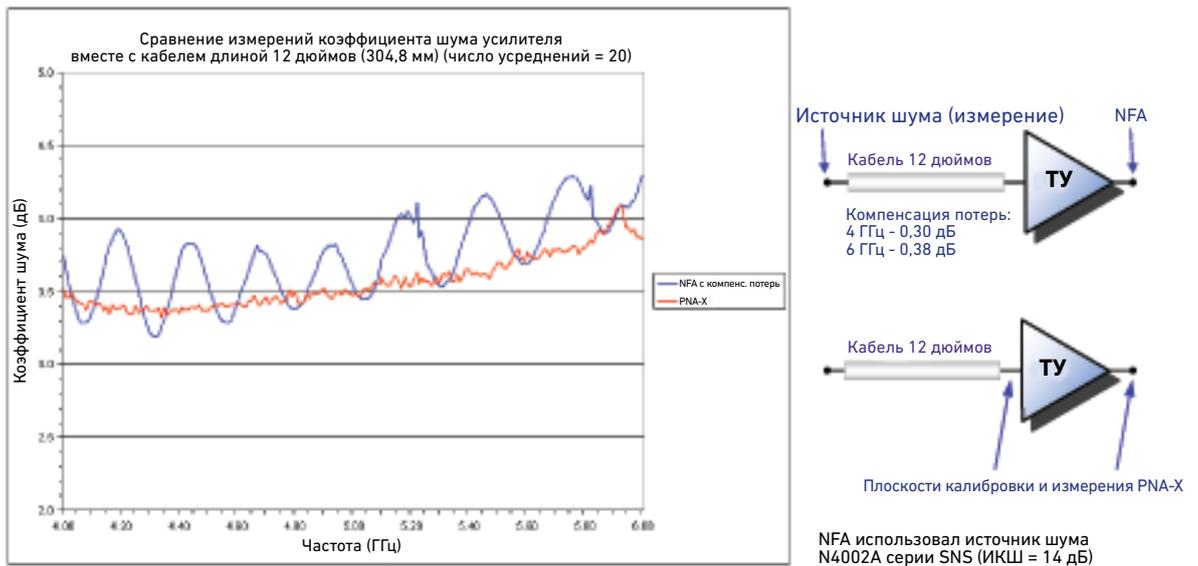


Рисунок 23 - Измерение коэффициента шума в псевдосреде АИС.

Скалярная калибровка шума

Ранее в данных рекомендациях по применению описывалось, как PNA-X корректирует неполное согласование в источнике, воспроизводя для ТУ четыре или большее число значений импеданса во время измерения коэффициента шума. Этот метод вызывается выбором пункта меню "Vector Noise" (векторная калибровка шума) во время калибровки. Существует другой вариант калибровки, который называется "Scalar Noise" (скалярная калибровка шума). Он проще и быстрее, но обеспечивает меньшую точность. Этот вариант также использует метод холодного источника, при котором измеряются коэффициент передачи ТУ и мощность шума на его выходе. Однако при скалярной калибровке шума предполагается, что согласование в источнике системы является идеальным (в точности равным 50 Ом в диапазоне частот измерения), и поэтому исключается необходимость в тюнере импеданса. Отметим два преимущества такого подхода: измерения выполняются быстрее, поскольку необходим только один цикл свипирования мощности шума, а не 4-7 циклов, как при векторной калибровке шума. Скалярная калибровка дешевле, поскольку стоимость модуля ECal, используемого в качестве тюнера импеданса, вычитается из стоимости системы. Цена этого компромиссного решения заключается в том, что в этом случае больше уровень пульсаций (и, соответственно, меньше точность) результатов измерений, поскольку погрешность, обусловленную шумовыми параметрами ТУ, невозможно устранить. Величина этой погрешности зависит от того, насколько хорошим является согласование в источнике системы, и насколько ТУ чувствительно к изменениям импеданса источника.

На рисунке 24 показано сравнение векторной и скалярной калибровки шума. Нетрудно увидеть, что векторная калибровка обеспечивает самый сглаженный график, а также что добавление внешних аттенюаторов на конце кабеля измерительного порта помогает уменьшить пульсации при использовании скалярной калибровки шума. Для данного ТУ использование аттенюатора с ослаблением 6 дБ даёт результаты, близкие к результатам, полученным с использованием векторной калибровки шума.

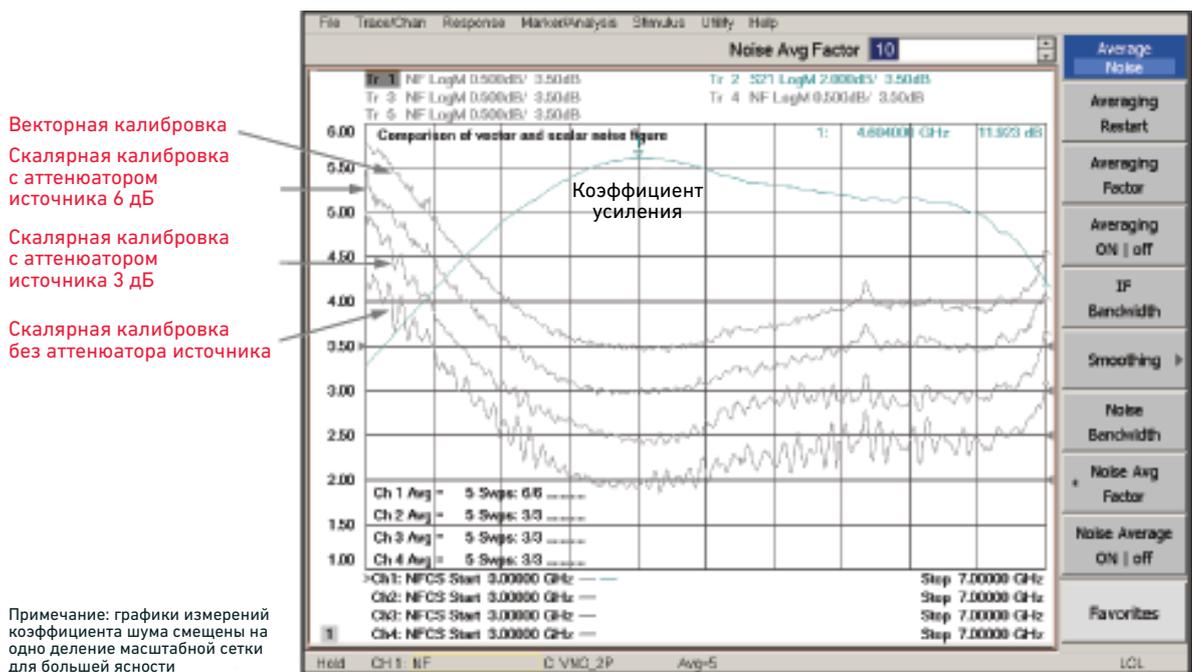


Рисунок 24 - Сравнение векторной и скалярной калибровки шума.

Аспекты, касающиеся числа циклов свипирования

При тестировании усилителей, помимо четырёх - семи циклов свипирования для измерения мощности шума, требуемых для векторной калибровки шума, выполняются два традиционных цикла свипирования для измерения S-параметров (в прямом и обратном направлениях). За счёт этого обеспечивается точное измерение коэффициента усиления тестируемого усилителя. Таким образом, с учётом четырех циклов свипирования при различных значениях импеданса (значение по умолчанию), анализатор должен выполнить шесть циклов свипирования, чтобы собрать необходимые данные для расчёта коэффициента шума. При тестировании преобразователей частоты минимальное число циклов свипирования равно восьми, поскольку два дополнительных цикла необходимы при измерении усиления преобразования с коррекцией согласования, чтобы учесть разницу по частоте между входным и выходным сигналами. При использовании скалярной калибровки шума для тестирования усилителей требуется только три цикла свипирования (два цикла для измерения S-параметров плюс один цикл - для измерения мощности шума), а для тестирования преобразователей частоты - пять циклов (четыре цикла - для измерения усиления преобразования с коррекцией согласования плюс один цикл - для измерения мощности шума). На рисунке 25 показаны скорости измерений при использовании скалярной и векторной калибровки шума для тестирования усилителей: с усреднением и без усреднения шума и при различном числе точек графика. Если используется усреднение шума (рекомендуется), скалярный метод примерно в четыре раза быстрее.

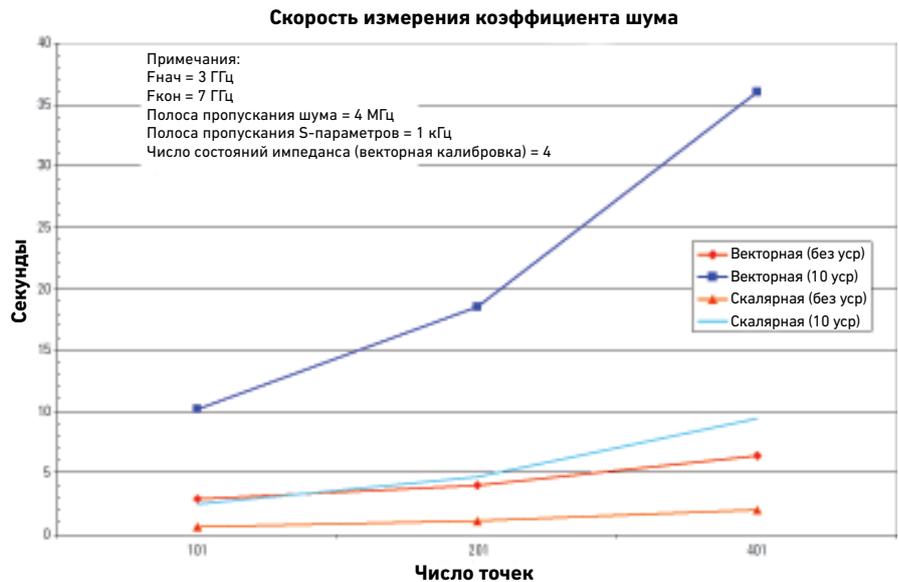


Рисунок 25 - Скалярная калибровка шума примерно в четыре раза увеличивает скорость измерений.

Если в приборе установлены малозумящие приёмники (включены в состав опций 029 и H29), то циклы свипирования при измерении мощности шума выполняются с использованием малозумящих приёмников (внутренний источник синусоидального сигнала выключен), а стандартные приёмники используются для измерения S-параметров или усиления преобразования (используя внутренний источник синусоидального сигнала). За счёт наличия дополнительного моста на измерительном порте 2, который поставляется вместе с малозумящими приёмниками, как только прибор переключается в режим измерения коэффициента шума, при переключении между стандартными и малозумящими приёмниками никакого дополнительного механического переключения не требуется. С опцией 028 все измерения проводятся с использованием стандартных приёмников.

Использование стандартных приёмников для измерения коэффициента шума

С опцией 028, установленной в анализаторе цепей серии PNA-X, для измерения мощности шума и коэффициента передачи ТУ, которые необходимы для вычисления коэффициента шума, используются стандартные приёмники PNA-X (опции 029 и H29, которые содержат малошумящие приёмники, также позволяют использовать стандартные приёмники для измерений коэффициента шума, как показано на рисунке 26). При использовании стандартных приёмников для измерения коэффициента шума необходимо учитывать некоторые практические ограничения, касающиеся коэффициента усиления и фильтрации, чтобы получить пригодные для использования результаты измерения. Эти проблемы рассматриваются на примере малошумящих приёмников, которые доступны при установке опций 029 и H29. На рисунке 27 показана структурная схема той части малошумящего приёмника опций 029 и H29, которая относится к верхней полосе (от 3 до 26,5 ГГц). Здесь присутствуют два ключевых блока: первый - это малошумящий усилитель (МШУ) на входе и второй - блок фильтров перед смесителем.

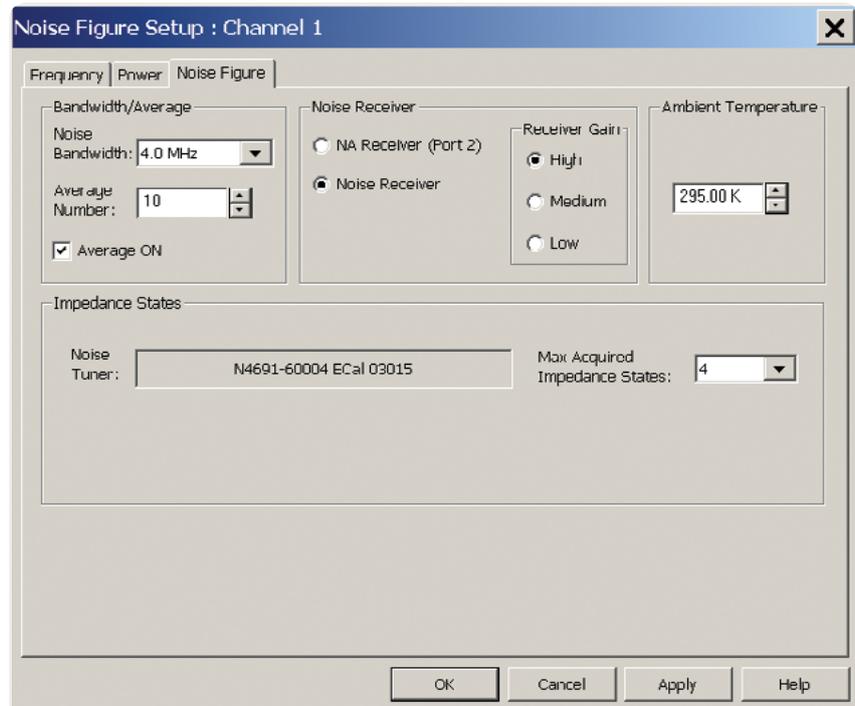


Рисунок 26 - Диалоговое окно установки параметров измерения коэффициента шума опций 029/H29, отображающее возможность выбора между приёмником шума (Noise Receiver) и стандартным приёмником анализатора цепей (NA receiver).

Использование стандартных приёмников для измерения коэффициента шума (продолжение)

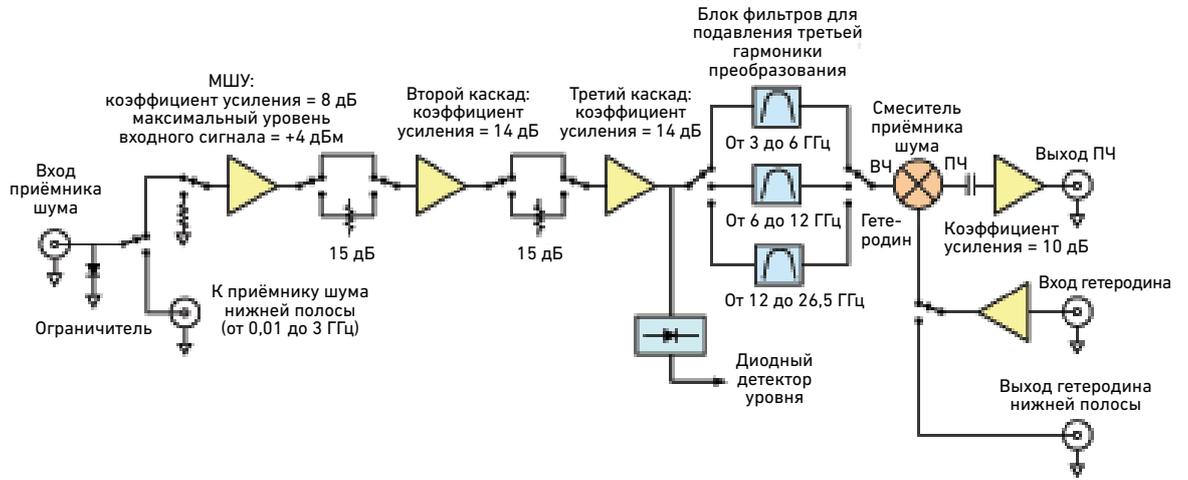


Рисунок 27 - Структурная схема приёмника шума верхней полосы.

Требования, касающиеся коэффициента усиления

Малошумящий усилитель (МШУ) обеспечивает усиление без добавления большой величины собственного шума (другими словами, он имеет низкий коэффициент шума), а это означает в целом хорошую чувствительность приёмника. На рисунке 28 показан типовой график коэффициента шума на измерительном порте 2 с установленной опцией 029. МШУ позволяет измерять параметры устройств, которые характеризуются как низким уровнем шума, так и низким коэффициентом усиления без внешнего предусилителя. Для ТУ, сумма коэффициента усиления и коэффициента шума которых не превышает приблизительно 30 дБ, используются все три усилителя. Для ТУ с уровнем избыточного шума, превышающим 30 дБ, каскады 2 и 3 могут быть переключены на установку уровня ослабления до 15 дБ, по мере надобности, для предотвращения компрессии приёмника.

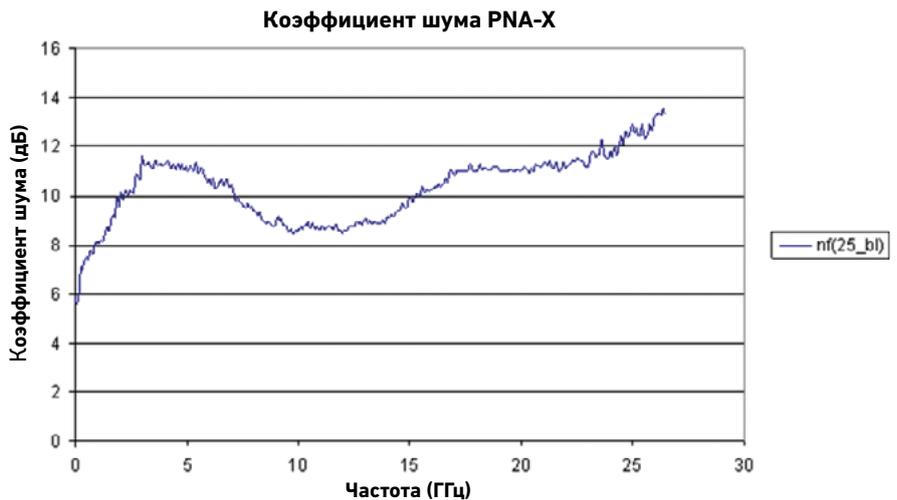


Рисунок 28 - Типовой график коэффициента шума на измерительном порте 2.

Требования, касающиеся коэффициента усиления (продолжение)

При использовании стандартных приёмников, у которых отсутствует МШУ перед смесителем, и которые по этой причине имеют высокий эффективный коэффициент шума от 25 до 45 дБ, в зависимости от частоты (без учёта потерь в направленном ответвителе измерительного порта), уровень шума, поступающего на приёмник, должен быть выше, а в идеальном случае, - значительно выше, чем шум, генерируемый внутри приёмника. Чтобы выполнить это условие, рекомендуется использовать внешний предусилитель, если сумма коэффициента усиления и коэффициента шума $TU < 30$ дБ до 20 ГГц, < 40 дБ до 50 ГГц или < 45 дБ до 67 ГГц. Предусилитель можно удобно поместить в тракт приёмника с использованием переключек передней панели, как показано на рисунке 29. Поскольку предусилитель подключается после ТУ, его коэффициент усиления не исключается из результатов измерения. Поэтому важно иметь стабильную температуру окружающей среды, а калибровка и измерения должны проводиться только после того, когда предусилитель полностью прогреется. При использовании внешнего предусилителя обычно требуется внешний фильтр на выходе предусилителя, как описано в следующем разделе. Стандартные приёмники применимы для измерения ТУ с очень высоким коэффициентом усиления (> 60 дБ), таких, как например, преобразователи частоты, которые в других обстоятельствах переводили бы маломощные усилители в режим компрессии даже при использовании самой низкой установки коэффициента усиления.

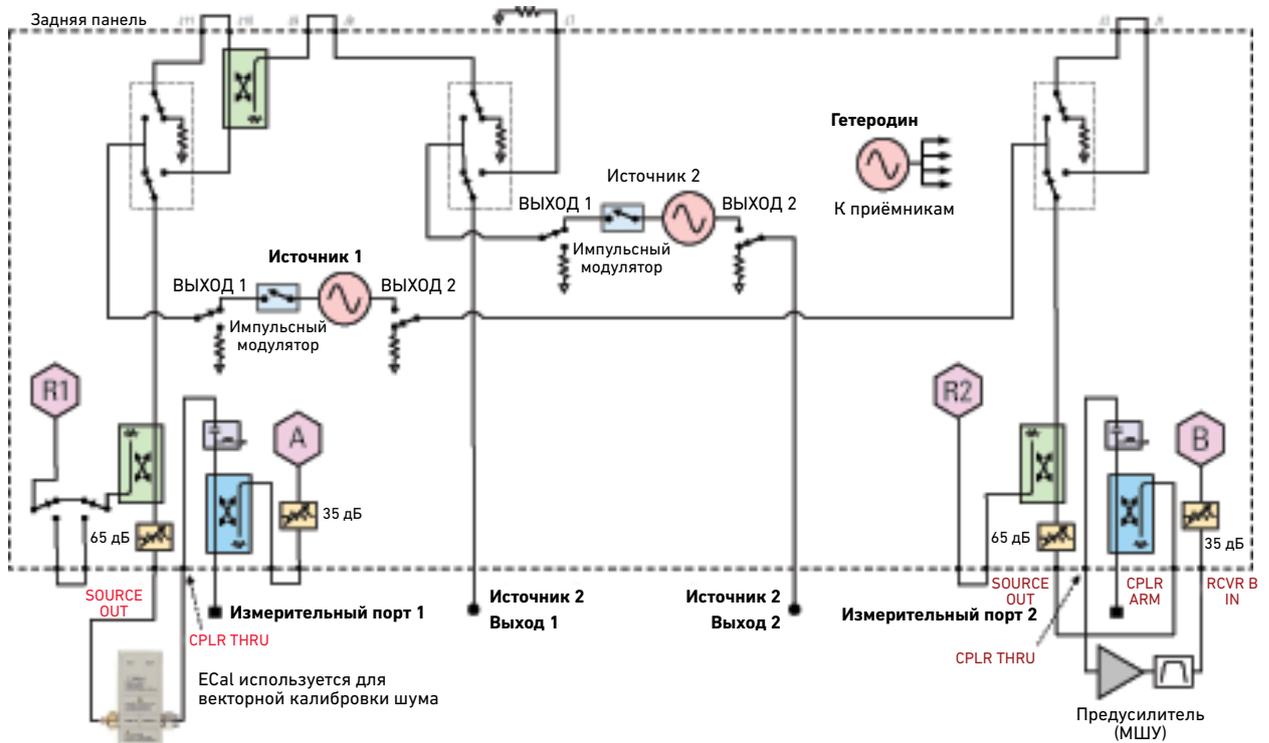


Рисунок 29 - Размещение внешнего предусилителя и фильтра для измерений коэффициента шума с использованием стандартного приёмника и направленного ответвителя порта 2, включённого в обратном направлении.

Требования, касающиеся коэффициента усиления (продолжение)

Независимо от того, используется предусилитель или нет, для большинства устройств рекомендуется включать в обратном направлении направленный ответвитель измерительного порта, который используется для измерения коэффициента шума с помощью стандартного приёмника (показано на рисунке 30), поскольку за счёт этого устраняются потери ответвителя в тракте приёмника. Это позволяет повысить чувствительность системы приблизительно на 15 дБ на частотах выше 1 ГГц и даже на большее значение на частотах ниже 1 ГГц, поскольку коэффициент ответвления направленного ответвителя имеет завал в области низких частот (рисунок 31). Изменение направления ответвителя измерительного порта на обратное не запрещает проведение измерений S-параметров, но уменьшает номинальную мощность при измерениях S_{12} или S_{22} . Однако это обычно является приемлемым компромиссом, поскольку за счёт этого достигается увеличение чувствительности при проведении измерений коэффициента шума.



Рисунок 30 - Размещение кабельных перемычек для включения направленного ответвителя измерительного порта в обратном направлении (прямой и ответвлённый каналы поменялись местами).



Рисунок 31 - АЧХ ответвителя измерительного порта (ответвлённый канал).

Требования, касающиеся фильтрации

Другим ключевым элементом специализированных малошумящих приемников является блок фильтров перед смесителем. Эти фильтры удаляют шум около основной частоты или третьей гармоники гетеродина приёмника, в зависимости от того, используется ли смешение на основной частоте или на третьей гармонике в конкретной полосе частот измерения. Как показано на рисунке 32, если используется смешение на основной частоте, то смеситель внутри генерирует нежелательный сигнал третьей гармоники из-за нелинейного процесса смешения (гармоники более высоких порядков также генерируются, но их воздействие является обычно довольно небольшим, и его можно игнорировать). Если имеется шум на входе смесителя на частотах около третьей гармоники, он будет подмешиваться к сигналу ПЧ наряду с шумом, который смешивается с основной частотой гетеродина. Поскольку коэффициент преобразования около частоты третьей гармоники приблизительно на 10 дБ меньше, чем около основной частоты, уровень дополнительного шума будет относительно небольшим. Без использования фильтрации может показаться, что этот дополнительный шум поступает от ТУ, следствием чего является нежелательное увеличение измеренного коэффициента шума. Такая же проблема может возникнуть, если анализатор намеренно использует генерируемую внутри третью гармонику для смешения шума с переносом вниз на частоту ПЧ. Правда, в этом случае нежелательный избыточный шум около основной частоты будет значительно больше, чем искомый шум около третьей гармоники. В результате этого погрешность будет намного больше, чем при смешении на основной частоте. Эта проблема устраняется с помощью соответствующих фильтров перед смесителем, как, например, в случае с опциями 029 или H29 (до 26,5 ГГц).

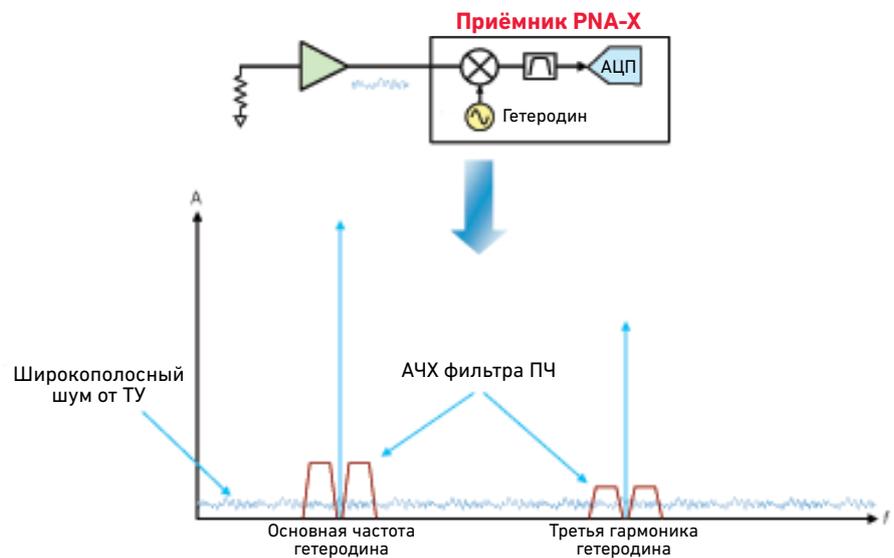


Рисунок 32 - При использовании стандартного приёмника широкополосный входной шум подмешивается около основной частоты и генерируемой внутри третьей гармоники гетеродина.

Требования, касающиеся фильтрации (продолжение)

Для моделей анализаторов цепей серии PNA-X с диапазоном частот до 43,5 и 50 ГГц смещение на основной частоте используется в диапазоне частот до 26,5 ГГц, а смещение на третьей гармонике - на частотах выше 26,5 ГГц. На рисунке 33 показано сравнение результатов измерений широкополосного усилителя без использования фильтрации и того же самого усилителя с полосовым фильтром, центральная частота которого равна 41 ГГц. В случае, когда фильтрация не используется, в результатах измерения коэффициента шума на частоте 26,5 ГГц вблизи центра экрана возникает большой перепад, и на частоте 41 ГГц коэффициент шума усилителя выглядит так, как будто бы он равен приблизительно 19 дБ. При использовании фильтрации измеренный коэффициент шума на частоте 41 ГГц представляет правильное значение, равное 4,5 дБ. Устройства, которые по своему назначению обеспечивают фильтрацию или являются узкополосными, не нуждаются во внешних фильтрах при использовании стандартных приёмников. При использовании предусилителя в контуре приёмника фильтрация будет требоваться, если АЧХ предусилителя недостаточно узка, чтобы подавить нежелательные продукты смещения. При измерениях широкополосных устройств для перекрытия интересующего диапазона частот может потребоваться больше одного фильтра. В таких случаях измерение должно быть разбито на более узкие поддиапазоны. Для измерений коэффициента шума, перекрывающих полный диапазон частот от 10 МГц до 50 ГГц, рекомендуется использовать модель N5245A с опцией H29. В диапазоне частот до 26,5 ГГц могут использоваться внутренние маломощные приёмники с их фильтрами подавления третьей гармоники, а в диапазоне частот от 26,5 до 50 ГГц - предусилитель с одним фильтром верхних частот (ФВЧ), имеющим частоту излома в интервале между 18 и 26,5 ГГц. Одним из простых способов реализации коаксиального ФВЧ на этих частотах является соединение вместе двух коаксиально-волноводных переходов, поскольку волноводные тракты характеризуются присущей им АЧХ в области высоких частот.

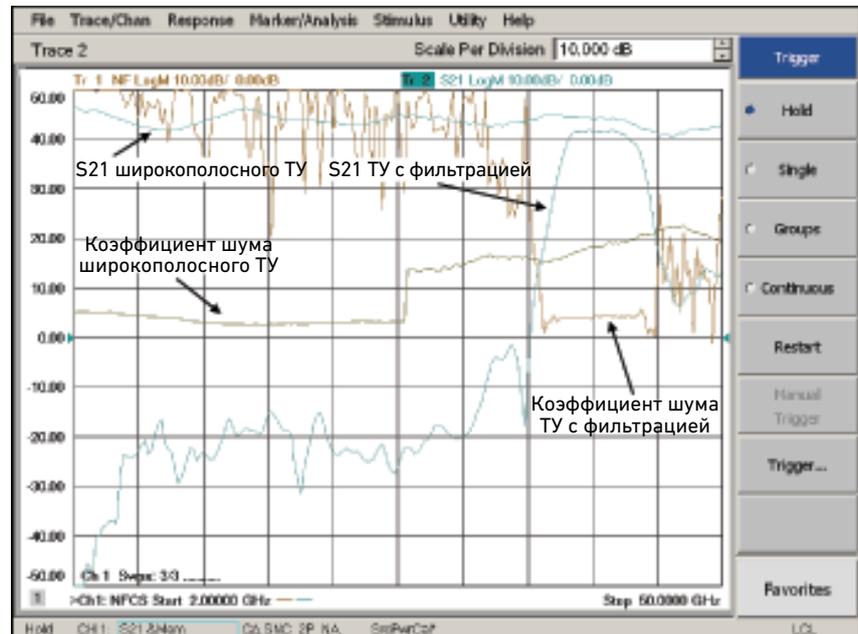


Рисунок 33 - Сравнение графиков коэффициента шума усилителя, измеренных с использованием стандартного приёмника анализатора цепей серии PNA-X с диапазоном частот до 50 ГГц, с фильтрацией и без таковой.

Параметры мощности шума

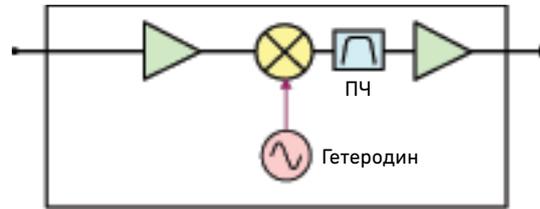
Помимо измерения коэффициента шума устройства, PNA-X может также отображать параметры мощности шума, выходящего из ТУ. Мощность шума может быть выражена в терминах мощности на согласованной нагрузке (вычисленной на сопряжённой согласованной нагрузке) или падающей мощности (вычисленной на нагрузке 50 Ом), и может отображаться в абсолютных единицах (дБм, нормализованных к полосе 1 Гц) или относительных единицах (дБ, относительно уровня -174 дБм). Параметры мощности шума системы включают дополнительную мощность шума, вносимую приёмниками шума, тогда как при определении параметров мощности шума ТУ вклад приёмников шума вычитается из измеренной мощности шума. Возможно также непосредственное измерение ИКШ. При измерениях ИКШ анализатор цепей серии PNA-X измеряет зависимость мощности шума от частоты с включённым источником шума и вычисляет ИКШ, используя измеренные значения "горячего" шума наряду со значениями "холодного" шума, измеренными во время калибровки системы.

Если измеряются параметры мощности шума, векторная калибровка шума недоступна. Поэтому измерения занимают два цикла свипирования: S_{22} (для коррекции шумовых параметров приёмников при вычитании мощности шума, вносимого приёмниками, для определения параметров мощности шума ТУ, и для вычисления мощности на согласованной нагрузке) и цикл измерения мощности шума.

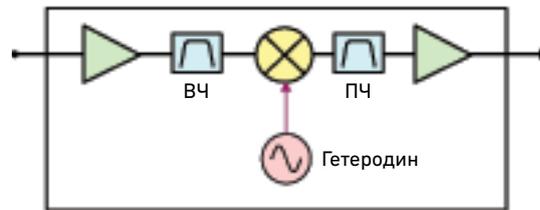
Измерение преобразователей частоты

Одним из преимуществ использования метода холодного источника для преобразователей частоты является то, что он правильно измеряет коэффициент шума как однополосных преобразователей (ОБП), так и двухполосных (ДБП). Двухполосные преобразователи частоты имеют больший уровень шума при преобразовании с понижением частоты, чем эквивалентные однополосные преобразователи, поскольку они не имеют фильтра подавления зеркального канала перед смесителем (рисунок 34). Это означает, что шум, который присутствует в боковых полосах, центрированных на частотах $(f_{\text{гет}} + f_{\text{пч}})$ и $(f_{\text{гет}} - f_{\text{пч}})$, преобразуется на промежуточную частоту (ПЧ). Вклад составляющих шума от этих двух боковых полос может отличаться. Это зависит от АЧХ входного каскада преобразователя, который предшествует каскаду преобразования частоты. Если АЧХ входного каскада является равномерной между этими боковыми полосами (определяемыми смещением ПЧ), то двухполосный преобразователь будет иметь уровень шума на 3 дБ больше, чем эквивалентный однополосный преобразователь. Если АЧХ не является равномерной, то это отличие может быть меньше, если фильтр подавления зеркального канала эквивалентного однополосного преобразователя настроен на верхнюю боковую полосу (ВБП), и больше, если фильтр подавления зеркального канала эквивалентного однополосного преобразователя настроен на нижнюю боковую полосу (НБП). При использовании метода Y-фактора измеренное значение коэффициента шума будет одинаковым для эквивалентных однополосных и двухполосных преобразователей, поскольку определяется отношение результатов измерений уровней мощности, и избыточный уровень шума двухполосного преобразователя (относительно однополосного) исключается. Для большинства двухполосных ТУ технические решения на базе анализаторов коэффициента шума серии NFA или анализаторов спектра дают результаты, которые на 0 ... 3 дБ лучше (меньше), чем действительное значение коэффициента шума, хотя возможно наблюдать даже большие ошибки. Поскольку при использовании метода холодного источника измерение мощности шума проводится только один раз, здесь отсутствует эффект, связанный с определением отношений, и поэтому коэффициент шума двухполосных и однополосных преобразователей частоты будет измеряться правильно.

Измерение преобразователей частоты (продолжение)



Двухполосный преобразователь частоты



Однополосный преобразователь частоты

Рисунок 34 - Сравнение однополосных и двухполосных преобразователей частоты.

Измерения преобразователей частоты со встроенным гетеродином

Устройства со встроенным гетеродином, в которых отсутствует доступ к гетеродину или его временной базе, возникает дополнительная проблема при измерениях преобразователей частоты. Встроенные гетеродионы являются общепринятым техническим решением для многих спутниковых ретрансляторов, поскольку ограничения по массогабаритным характеристикам и потенциальная опасность возникновения нежелательных паразитных сигналов исключают возможность организации простого доступа к гетеродинам на борту спутника. Без доступа к гетеродину или его временной базе может возникнуть проблема при измерении, поскольку значение выходной частоты ТУ может быть не совсем таким, каким должно быть, поскольку действительное значение частоты гетеродина никогда в точности не равно его номинальному значению. Если это смещение частоты является достаточно большим в сравнении с полосой ПЧ, используемой для измерения усиления преобразования, то в результате измерения усиления преобразования будет внесена значительная ошибка. Решение заключается в том, чтобы установить параметры настройки приёмников PNA-X таким образом, чтобы выходной сигнал ТУ попадал на середину фильтра ПЧ, используемого во время измерения усиления преобразования. Для обеспечения эффективности этого подхода стабильность частоты внутренних гетеродинов должна быть относительно высокой. Это является обычным случаем для спутниковых ретрансляторов и приёмников, используемых в аэрокосмической и оборонной отраслях, поскольку их гетеродионы синхронизированы с генераторами с кварцевой стабилизацией частоты, которые очень стабильны и имеют низкий уровень фазового шума.

Процесс настройки, используемый анализаторами цепей серии PNA-X, довольно прост. Во-первых, тестовый ВЧ-сигнал устанавливается на центральную частоту измерения. Затем PNA-X выполняет цикл свипирования с использованием широкополосного приёмника, центрированного на номинальной частоте выходного сигнала ТУ (базирующейся на номинальной частоте гетеродина). Разность между пиковыми значениями действительного и ожидаемого сигналов даёт значение смещения частоты, которое может быть использовано для установки параметров настройки приёмников PNA-X. Диапазон частот свипирования внутреннего приёмника может быть установлен пользователем в пределах до 10 МГц, хотя это намного больше, чем типовое значение смещения реального преобразователя частоты.

Измерение дифференциальных устройств

Проводить измерения коэффициента шума дифференциальных (то есть, балансных) усилителей в принципе несложно. Для того чтобы получить истинный шумовой сигнал при дифференциальном включении, необходимо использовать симметрирующее устройство (согласующий трансформатор) или противофазный делитель мощности ($0^\circ/180^\circ$) на входе ТУ. Для полностью балансных устройств на выходе ТУ также необходим согласующий трансформатор или противофазный делитель мощности, как показано на рисунке 35. Противофазные делители мощности - весьма полезные компоненты, поскольку могут использоваться для измерения коэффициента шума как в дифференциальном, так и синфазном режиме, используя преимущества как суммирующего (Σ (0°)), так и противофазного плеча (Δ (180°)). При измерении параметров устройств на пластине, измерительные зонды используются на дифференциальной (или синфазной) стороне симметрирующего устройства или противофазного делителя мощности. Проведение измерений в дифференциальном (или синфазном) режиме может быть в итоге сведено к трём шагам:

1. Выполнить калибровку коэффициента шума в несимметричном режиме без согласующего трансформатора, противофазного делителя мощности, или зондов, используя скалярную или векторную калибровку шума
2. Вставить согласующие трансформаторы или противофазные делители мощности с известными характеристиками (если необходимо, с зондами) между несимметричным измерительным портом и дифференциальными портами ТУ
3. Измерить характеристики ТУ, используя математическое исключение цепей согласующего трансформатора или противофазного делителя мощности на входе (и на выходе, если используются) с помощью функции "Fixture" (устройство подключения) анализатора

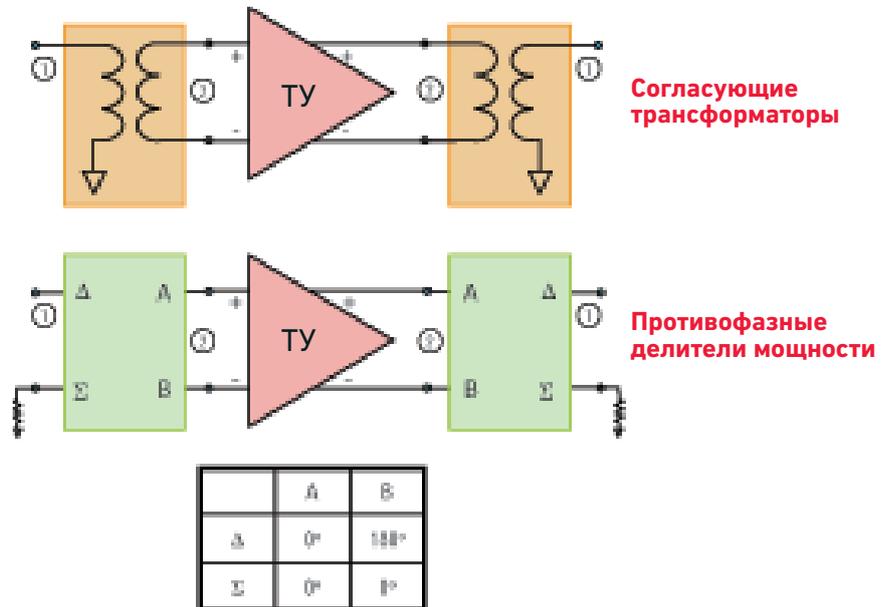


Рисунок 35 - Измерение балансных усилителей или преобразователей частоты требует использования согласующих трансформаторов или противофазных делителей мощности.

Определение характеристик согласующих трансформаторов и противофазных делителей мощности

Хотя согласующие трансформаторы или противофазные делители мощности являются трёхпортовыми устройствами с девятью несимметричными параметрами или параметрами смешанного режима, при исключении цепей их можно рассматривать как двухпортовые устройства с четырьмя параметрами. Это делается за счёт игнорирования параметров, которые относятся к ненужному режиму.

Определение характеристик согласующих трансформаторов и противофазных делителей мощности (продолжение)

Например, для согласующего трансформатора важны только четыре параметра пересчёта из несимметричного режима в дифференциальный режим, а пять параметров пересчёта из синфазного режима в смешанный режим могут быть игнорированы. Если требуется также измерить коэффициент шума в синфазном режиме, используя противофазный делитель мощности, то необходимо добавить к четырём параметрам пересчёта из несимметричного в дифференциальный режим также четыре параметра пересчёта из несимметричного в синфазный режим. Файлы параметров дифференциального или синфазного режимов .s2p, которые используются для исключения цепей согласующих трансформаторов или противофазных делителей мощности, должны быть сгенерированы вручную до начала измерения ТУ. Согласующие трансформаторы или противофазные делители мощности измеряются как несимметричные трёхпортовые устройства, а анализатор цепей серии PNA-X пересчитывает параметры дифференциального или синфазного режима из данных измерения несимметричного режима. Первым шагом в этом процессе является проведение трёхпортовой калибровки на анализаторе PNA-X. Затем к согласующим трансформаторам или противофазным делителям мощности добавляются соединительные кабели (и зонды, если необходимо), которые будут использоваться во время измерения. Далее устанавливаются и измеряются требуемые параметры смешанного режима (рисунок 36) с использованием 4 графиков. Несимметричный вход согласующего трансформатора или противофазного делителя мощности, используемого на входе или выходе ТУ, должен быть подключён к порту 1 анализатора PNA-X, поскольку при использовании исключения цепи функция "Fixture" (устройство подключения) анализатора предполагает, что порт 2 исключаемого компонента будет подключён ко входу или выходу ТУ. При использовании противофазных делителей мощности 50-омная согласующая нагрузка должна быть подключена к плечу Σ для измерений в дифференциальном режиме и плечу Δ - для измерений в синфазном режиме. Если требуется определение характеристик в обоих режимах, данные должны быть сохранены в отдельных файлах данных. Когда соответствующие данные дифференциального или синфазного режима измерены, их можно сохранить в файле .s2p [File, Save Data As..., Trace (*.s2p)]. Анализатор PNA-X будет спрашивать, какие порты следует включить. Для данных дифференциального режима следует выбрать S1 и D2, а для данных синфазного режима - S1 и C2.

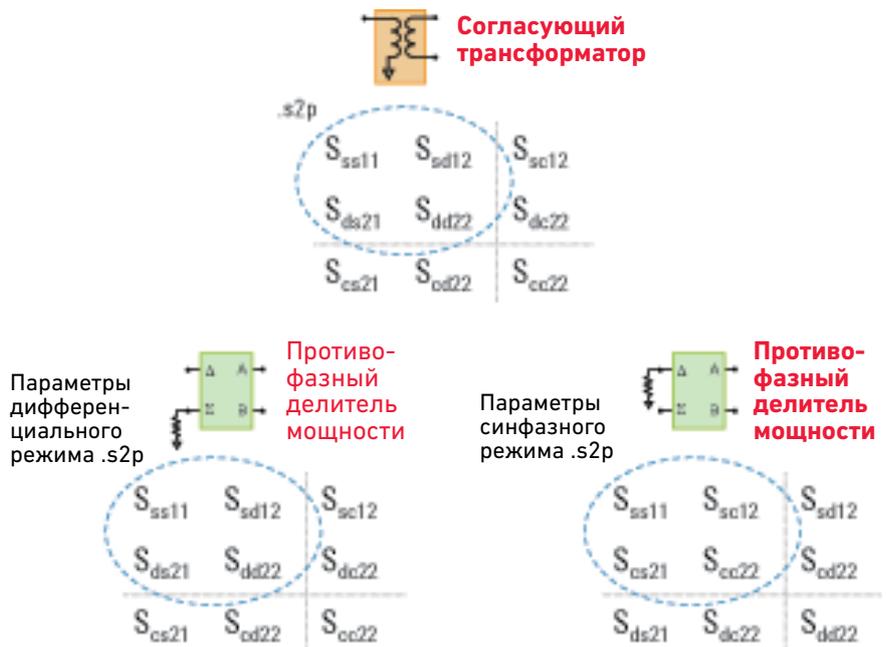


Рисунок 36 - Выбор 4-х соответствующих параметров дифференциального или синфазного режима.

Измерение шумовых параметров

Технические решения PNA-X, описанные до сих пор, предназначены для измерений коэффициента шума с 50-омным согласованием. Разработчикам МШУ часто необходимо измерять зависимость коэффициента шума от импеданса источника для несогласованных транзисторов с высоким коэффициентом отражения, чтобы разрабатывать оптимизированные согласующие схемы. Такой тип определения параметров измеряет шумовые параметры устройства. Для полного анализа шумовых параметров необходим тюнер, расположенный вблизи входа ТУ, чтобы обеспечить широкий диапазон значений импеданса источника. Компания Maugu Microwave разработала новую систему измерения шумовых параметров на базе анализатора цепей серии PNA-X, которая обеспечивает большее быстродействие и более высокую точность, чем устаревшие системы. Эта система намного проще, чем предыдущие решения, в состав которых входили отдельный векторный анализатор цепей и отдельный анализатор коэффициента шума. Система использует также значительно усовершенствованные алгоритмы измерений для увеличения скорости измерений более, чем в 100 раз, и обеспечения более высокой точности. На рисунке 37 показано улучшение точности за счёт более сглаженных результатов измерения при использовании нового метода. Системы измерения шумовых параметров на базе PNA-X, разработанные компанией Maugu, доступны с перекрытием диапазона частот до 50 ГГц.

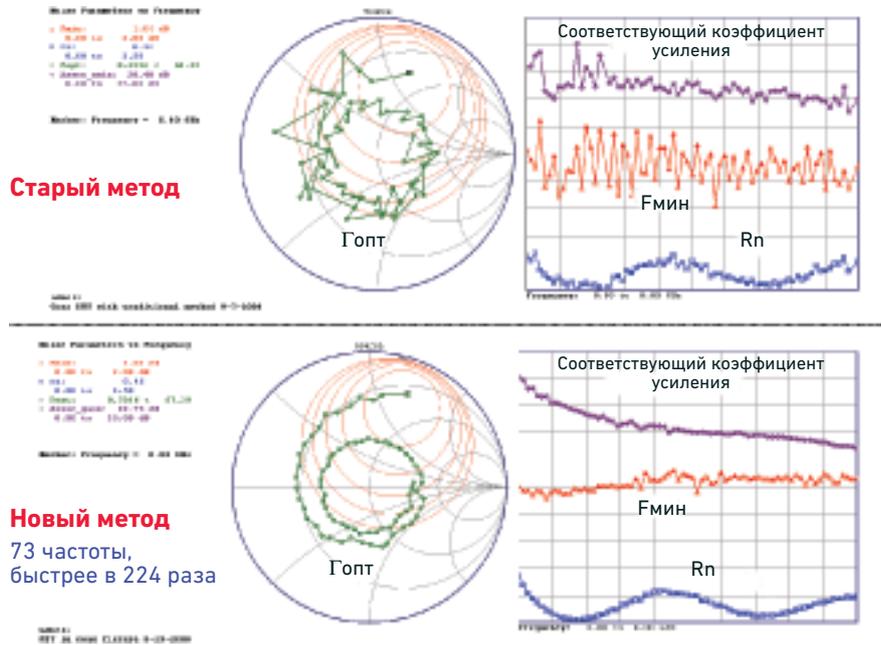


Рисунок 37 - Система измерения шумовых параметров на базе PNA-X, разработанная компанией Maugu Microwave, демонстрирует увеличение точности и скорости в сравнении с устаревшими системами.

Обзор калибровки

Выполнение калибровки шума является относительно простой процедурой с точки зрения пользователя. В простейшем случае калибровка состоит только из трёх шагов при измерении усилителей или четырёх шагов при измерении преобразователей частоты. Калибровка использует внутренний источник синусоидального сигнала, источник шума и/или измеритель мощности, кабель для соединения “на проход” и калибровочные меры, необходимые при измерении S-параметров, которые обеспечиваются либо модулем электронного калибратора ECal, либо механическим калибровочным комплектом. В процессе выполнения этих шагов проводится намного больше измерений, чем при простой калибровке S-параметров. Дополнительные шаги требуются в случае использования механического калибровочного комплекта, либо переходов, параметры которых должны быть математически исключены из результатов измерения, как, например, в случае измерений на пластине.

Векторная калибровка шума

На рисунке 38 показана процедура калибровки, которая применяется анализатором цепей PNA-X для измерений коэффициента шума усилителя с векторной калибровкой, когда два модуля ECal используются с малошумящими приёмниками. Калибровка состоит из трёх шагов. На первом шаге источник шума подключается к порту 2 испытательной системы. Проводятся измерения мощности шума в холодном и горячем состоянии с учетом соответствующих согласований источника шума. Второй шаг состоит из соединения “на проход” измерительных портов 1 и 2. На этом шаге проводятся измерения разности усиления при трёх установках коэффициента усиления приёмников шума при соответствующем согласовании в нагрузке. Поскольку все эти установки коэффициента усиления используются во время калибровки, установка коэффициента усиления во время измерения может быть изменена в случае индикации перегрузки. Во время этого шага также измеряются значения Гист (то есть, согласование в источнике) модуля ECal, используемого в качестве тюнера импеданса. На третьем шаге другой модуль ECal или механический калибровочный комплект используются для определения калибровочных коэффициентов, используемых при измерении S-параметров. Если соединители модуля ECal в точности соответствуют соединителям TУ, это будет единственным шагом. Если нет (например, оба соединителя TУ являются розетками, а соединителями модуля ECal являются вилка и розетка), то потребуются два шага.

- Калибровка использует источник синусоидального сигнала и генератор шума плюс “холодную” согласованную нагрузку
- Имеются некоторые отличия в калибровке верхней и нижней полосы
- Последовательность калибровки для простейшего случая (соединители модуля ECal соответствуют соединителям TУ)
 - **Подключить генератор шума к порту 2**
 - Измерить мощность шума горячего и холодного источника шума
 - Измерить согласование горячего и холодного источника шума
 - **Соединить “на проход” (порт 1 и 2)**
 - Измерить разность усиления при установках коэффициента усиления: 0, 15 и 30 дБ
 - Измерить согласование в нагрузке приёмников шума
 - Измерить значения Гист модуля ECal (тюнера импеданса)
 - **Подключить модуль ECal (порты 1 и 2)**
 - Измерить калибровочные коэффициенты, используемые при измерении S-параметров
 - Измерить мощность шума приёмника при различных значениях Гист, используя этот модуль ECal (тюнер не используется)
- Могут потребоваться дополнительные шаги
 - 1-портовая калибровка для исключения цепей перехода, если источник шума является невстраиваемым устройством
 - Шаги калибровки S-параметров, если соединители модуля ECal не соответствуют соединителям TУ
 - Калибровка мощности источника с помощью измерителя мощности в случае измерения преобразователей частоты



Рисунок 38 - Векторная калибровка шума, использующая малошумящие приёмники и модуль ECal для калибровки S-параметров.

Векторная калибровка шума (продолжение)

Модуль ECal, используемый на шаге определения калибровочных коэффициентов S-параметров, используется также как тюнер импеданса для измерения мощности шума приёмников с использованием различных значений импеданса источника для того, чтобы определить шумовые параметры приёмника. Этот модуль ECal используется для изменения импеданса источника на входе приёмников шума (а не модуль ECal, который используется как специализированный тюнер), поскольку потери между ним и приёмниками шума меньше, следствием чего являются большие значения Гист, которые позволяют более точно определять шумовые параметры.

На рисунке 39 показана процедура калибровки для измерений усилителя с векторной калибровкой, когда используются малошумящие приёмники и механический калибровочный комплект для калибровки, которая касается S-параметров. Этот процесс очень похож на процесс, представленный на предыдущем рисунке. Основное отличие заключается в том, что в этом случае измерения зависимости мощности шума приёмника от согласования в источнике проводятся на втором шаге (с использованием модуля ECal, сконфигурированного как тюнер) и на третьем шаге (используя механические калибровочные меры XX, K3 и согласованной нагрузки). Добавление измерений мощности шума приёмника с использованием механических калибровочных мер даёт больше данных для избыточно определённого технического решения, следствием чего является более высокая точность измерений.

- Калибровка использует источник синусоидального сигнала и генератор шума плюс "холодную" согласованную нагрузку
- Имеются некоторые отличия в калибровке верхней и нижней полосы
- Последовательность калибровки для простейшего случая (встраиваемое ТУ)
 - **Подключить генератор шума к порту 2**
 - Измерить мощность шума горячего и холодного источника шума
 - Измерить согласование горячего и холодного источника шума
 - **Соединить "на проход" (порт 1 и 2)**
 - Измерить разность усиления при установках коэффициента усиления: 0, 15 и 30 дБ
 - Измерить согласование в нагрузке приёмников шума
 - Измерить значения Гист модуля ECal (тюнера импеданса)
 - Измерить мощность шума приёмника при различных значениях Гист тюнера
 - **Подключить калибровочные меры (порты 1 и 2)**
 - Измерить калибровочные коэффициенты, используемые при измерении S-параметров
 - Измерить мощность шума приёмника с помощью калибровочных мер (XX, K3, согласованная нагрузка) (больше данных для избыточно определённого технического решения)
- Могут потребоваться дополнительные шаги
 - 1-портовая калибровка для исключения цепей перехода, если источник шума является невстраиваемым устройством
 - Шаги калибровки S-параметров для невстраиваемых ТУ
 - Калибровка мощности источника с помощью измерителя мощности в случае измерения преобразователей частоты



Рисунок 39 - Обзор векторной калибровки шума, использующей малошумящие приёмники и механический калибровочный комплект для калибровки S-параметров.

Калибровка шума стандартного приёмника

В процесс калибровки вносятся два изменения, если вместо малошумящего приёмника используется стандартный приёмник. Первое изменение заключается в том, что для определения шума, вносимого приёмником, источник шума не используется. При измерении малошумящих приёмников источник шума обеспечивает такое произведение коэффициента усиления и полосы пропускания приёмника, которое требуется для вычисления мощности шума, вносимого приёмником. Правда, эта методика не работает должным образом, если коэффициент шума приёмника намного больше, чем величина избыточного шума, создаваемая генератором шума, как это имеет место в случае измерения стандартного приёмника. Эта проблема может быть преодолена посредством отдельного измерения коэффициента усиления и полосы пропускания приёмника и математического вычисления производных параметров от коэффициента усиления и полосы пропускания. В части измерения коэффициента усиления, измеритель мощности используется в качестве меры абсолютной мощности для того, чтобы откалибровать приёмник для точных измерений мощности синусоидального сигнала. Шумовая полоса пропускания приёмника измеряется посредством узкополосного свипирования частоты для определения АЧХ фильтра ПЧ и последующего интегрирования этой АЧХ для вычисления эффективной полосы пропускания шума. Поскольку при измерении мощности шума используется преобразование на нулевую ПЧ, на экране во время калибровки виден отклик с двумя пиками, как показано на рисунке 40.

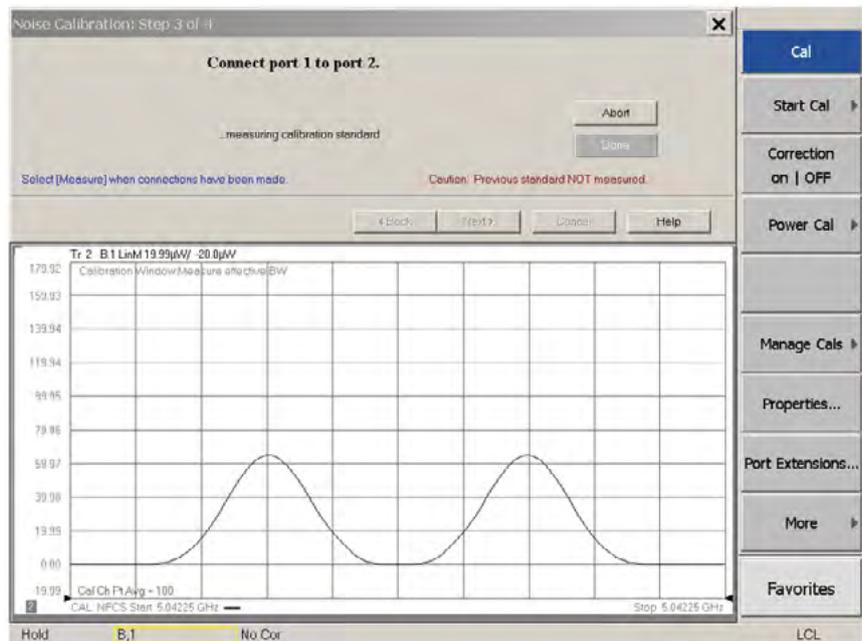


Рисунок 40 - Измерение эффективной полосы пропускания шума во время калибровки.

Второе изменение, вносимое в процедуру калибровки при использовании стандартного приёмника, заключается в том, что в этом случае необходимо только одно измерение коэффициента усиления, так как стандартные приёмники не имеют переключаемых усилителей перед смесителем.

Скалярная калибровка шума

В случае проведения скалярной калибровки шума измерения состояний импеданса модуля ECal, используемого в качестве тюнера импеданса, пропускаются, поскольку измерения со скалярной калибровкой предполагают, что имеется идеальное 50-омное согласование в источнике. Правда, измерения с изменением импеданса на входе приёмника, который используется для измерения мощности шума, всё ещё выполняются для того, чтобы сделать более точной работу по коррекции шума второго каскада. Если модуль ECal используется для калибровки S-параметров, он используется также для изменения импеданса источника на входе. Если используется механический калибровочный комплект, для изменения импеданса источника на входе используются меры XX, K3 и согласованной нагрузки. Поскольку для решения задачи определения шумовых параметров измерительного приёмника требуется минимум четыре меры импеданса, проводится дополнительное измерение во время шага, когда используется соединение “на проход” портов 1 и 2, где нескорректированное согласование в источнике испытательной системы используется в качестве дополнительной меры импеданса. Комплексные значения нескорректированного согласования в источнике определяются как часть калибровки S-параметров.

Калибровка для преобразователей частоты

При измерении преобразователей частоты в начале процесса калибровки добавляется специальный шаг, когда измеритель мощности подключается к измерительному порту 1. На этом шаге выполняется калибровка мощности источника, которая выравнивает (стабилизирует) уровень мощности источника в диапазоне частот измерения. Стабилизированный уровень мощности используется, чтобы откалибровать стандартные приёмники для абсолютных измерений мощности, которые необходимы при измерении усиления (или потерь) преобразования преобразователей частоты. Эта же методика используется и для класса измерений параметров смесителей/преобразователей частоты с использованием скалярной калибровки смесителя (SMC).

Калибровка на пластине

Для измерений на пластине с векторной калибровкой и использованием малошумящего приёмника имеется два метода проведения калибровки. В обоих случаях источник шума не может находиться в той же плоскости измерения, что и ТУ, поскольку коаксиальный соединитель источника шума не сопрягается с наконечником измерительного зонда. Хотя в последующих двух примерах показано, как источник шума подключается во время калибровки, подход, включающий смешанную коаксиальную калибровку и калибровку на пластине также используется при проведении измерений на пластине с использованием стандартного приёмника и измерителя мощности с коаксиальными соединителями или при измерении преобразователей частоты, которые также требуют подключения измерителя мощности.

В примере, показанном на рисунке 41, источник шума подключается непосредственно к измерительному порту 2 анализатора цепей серии PNA-X с использованием перехода розетка-розетка. После завершения измерения параметров шума проводится однопортовая калибровка в плоскости перехода, чтобы установить опорную плоскость калибровки шума. На шаге 3 подключается кабель между портом 2 анализатора цепей серии PNA-X и измерительным зондом, оставляя на месте переход розетка-розетка. После проведения двухпортовой калибровки на пластине опорную плоскость калибровки шума можно математически переместить к плоскости двухпортовой калибровки, используя алгоритм встраивания цепей, описанный в предыдущем разделе. Этот пример обеспечивает наилучшую точность калибровки внутреннего малошумящего приёмника анализатора цепей серии PNA-X, поскольку потери между источником шума и измерительным портом 2 минимальны.

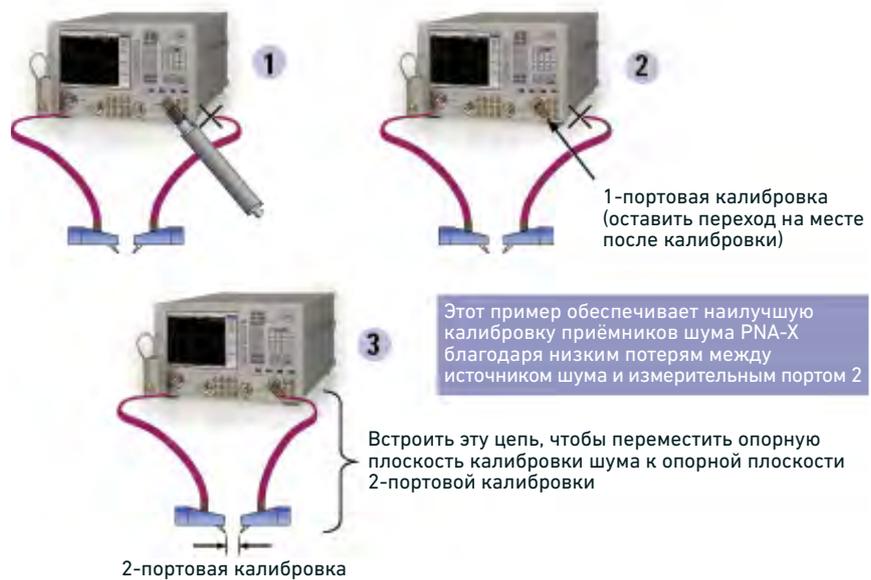


Рисунок 41 - Калибровка шума при измерениях на пластине, пример 1: подключение источника шума непосредственно к соединителю передней панели PNA-X.

Калибровка на пластине (продолжение)

В примере, показанном на рисунке 42, источник шума подсоединяется к концу кабеля, используемого для подключения измерительного зонда, а не к измерительному порту 2 анализатора. Это способ может оказаться более удобным из-за размещения PNA-X, который при проведении измерений на пластине часто находится в недоступном месте в приборной стойке позади зондовой станции. В этом случае переход розетка-розетка снова необходим для подключения источника шума к испытательной системе, и однопортовая калибровка с установленным на своём месте переходом проводится после определения шумовых параметров, чтобы установить опорную плоскость калибровки шума. В отличие от предыдущего примера, где переход оставался на месте после проведения однопортовой калибровки, здесь его нужно удалить, чтобы подсоединить встраивания цепей корректно переместит опорную плоскость калибровки шума к опорной плоскости двухпортовой калибровки, даже если переход розетка-розетка был удалён.

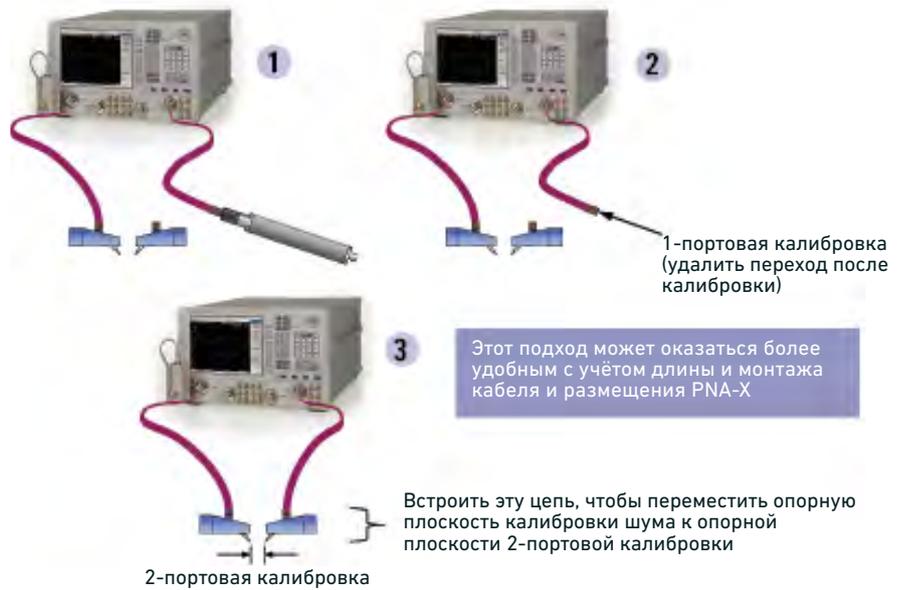


Рисунок 42 - Калибровка шума при измерениях на пластине, пример 2: подключение источника шума к концу коаксиального измерительного кабеля.

Перемещение плоскости калибровки шума

Для того, чтобы понять методы калибровки, приведённые в предыдущих примерах, когда плоскость калибровки шума перемещается к контактам измерительного зонда, даже если переход был удалён, необходимо изучить, как следует перемещаться от одной опорной плоскости к другой. Рассмотрим пример, приведённый на рисунке 43, где калибровка 1 (Cal 1) проводится с использованием перехода розетка-розетка ($[T_A]$), а калибровка 2 (Cal 2) проводится на пластине $[T_B]$. Для калибровки Cal 2 измерительный зонд может рассматриваться как другой переход. Заметим, что характеристики измерительного кабеля и векторного анализатора цепей - те же самые в обоих случаях. Они обозначены как $[T_{sys}]$ и учитывают объединённые T-параметры кабеля измерительного порта и векторного анализатора цепей. T-параметры извлекаются из S-параметров и используются по той причине, что сопутствующий математический аппарат для операций с каскадными цепями является очень простым. Например, две каскадных цепи T-параметров могут быть легко перемножены.

Для того, чтобы переместиться от плоскости калибровки 1 (установленной калибровкой Cal 1) к плоскости калибровки 2 (установленной калибровкой Cal 2), нам необходимо вычислить T-параметры виртуального перехода, которые обозначены как $[T_\Delta]$. Они могут быть выражены следующим образом:

$$[T_\Delta] = [T_B] * [T_A]^{-1}, \text{ где } [T_A]^{-1} \text{ является обратной величиной } [T_A].$$

Однако, поскольку мы не можем непосредственно получить $[T_B]$ или $[T_A]$, необходимо выполнить некоторые математические операции, чтобы вычислить $[T_\Delta]$, используя $[T_1]$ и $[T_2]$.

Нам известно, что:

$$[T_1] = [T_A] * [T_{sys}] \text{ и } [T_2] = [T_B] * [T_{sys}].$$

Поскольку $[T_{sys}]$ является общим членом в этих выражениях, мы можем составить следующее выражение:

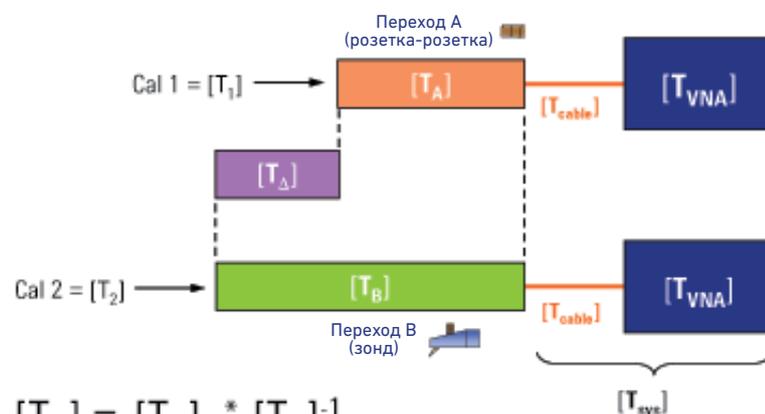
$$[T_{sys}] = [T_1] * [T_A]^{-1} = [T_2] * [T_B]^{-1}$$

Умножая на $[T_B]$, мы получим:

$$[T_B] * [T_1] * [T_A]^{-1} = [T_B] * [T_2] * [T_B]^{-1} = [T_2]$$

Умножая на $[T_1]^{-1}$, мы получим:

$$[T_1]^{-1} * [T_B] * [T_1] * [T_A]^{-1} = [T_1]^{-1} * [T_2] \text{ или } [T_B] * [T_A]^{-1} = [T_1]^{-1} * [T_2] = [T_\Delta]$$



$$[T_\Delta] = [T_B] * [T_A]^{-1} * [T_1]^{-1} * [T_2]$$

Рисунок 43 - Перемещение плоскости калибровки между переходами.

Практические рекомендации по измерениям

Установка температуры окружающей среды

При планировании измерений коэффициента шума необходимо учитывать температуру окружающей среды испытательной системы для вычисления точного значения входного уровня мощности шума. Это значение, которое вводится в диалоговом окне Noise Figure Setup (установка параметров измерения коэффициента шума) (см. рисунок 26), должно представлять среднюю температуру всех компонентов, находящихся за плоскостью калибровки по отношению к PNA-X, включая компоненты, расположенные после измерительных портов прибора. Хорошим первоначальным значением является температура окружающей среды, которое в типовом случае равно 298 К, но оно может быть также точно определено с помощью прецизионного термометра. Хотя модуль ECal внутри нагревается до 304 К, теплообмен между модулем ECal и ТУ обычно не позволяет его температуре подняться выше температуры окружающей среды. Может наблюдаться незначительный нагрев от измерительного прибора. Поэтому хорошей приблизительной оценкой может быть значение 299 К или 300 К. Заметим, что разница между использованием значений 298 и 300 К составляет всего лишь 0,7%, что соответствует изменению коэффициента шума только на 0,03 дБ.

При использовании источника шума во время калибровки в программе установки параметров калибровки предусмотрено окно ввода, в котором можно указать истинную температуру источника шума. Поскольку источник шума продолжает оставаться во включённом состоянии, когда он подсоединён к PNA-X, его температура обычно выше температуры окружающей среды на несколько градусов.

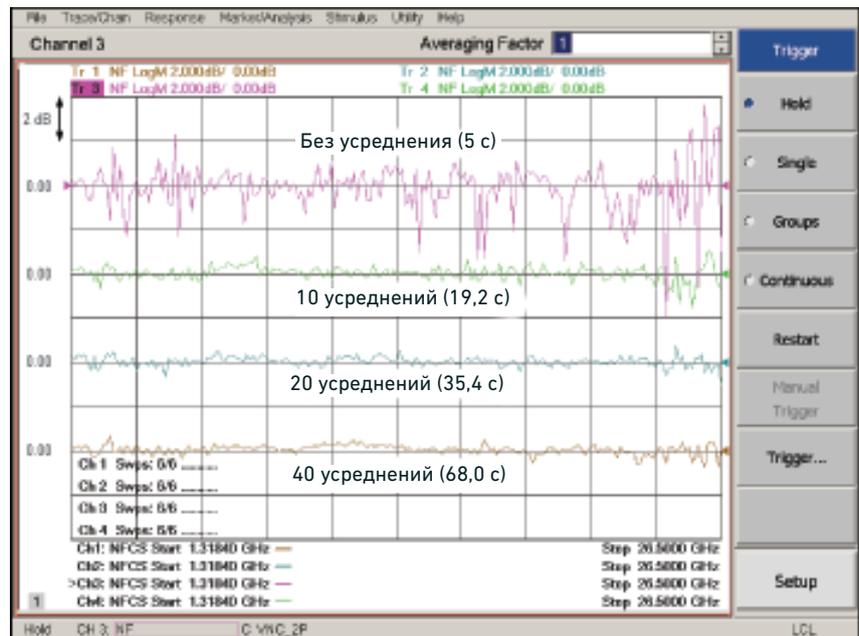
Усреднение шума

Усреднение шума - важное условие измерений, которое следует учитывать при проведении измерений коэффициента шума с использованием анализатора цепей серии PNA-X. Если усреднение шума не используется (или число усреднений равно 1), для каждого измерения мощности шума тем не менее используется множество отсчётов аналого-цифрового преобразователя с тем, чтобы оценить среднюю мощность шума, поступающего на приёмник шума. Число отсчётов АЦП является произвольным, PNA-X использует приблизительно 10000 отсчётов при использовании маломощных приёмников. Если усреднение шума используется, то усреднённое значение умножается на число отсчётов, захваченных АЦП. Это даёт лучшую оценку средней мощности шума вследствие снижения уровня джиттера на графике (шума трассы), но приводит к снижению скорости измерений. Во время калибровки настоятельно рекомендуется использовать усреднение шума со значением усреднения от 10 до 20 для маломощных приёмников и от 50 до 100 - для стандартных приёмников. Это будет способствовать выполнению качественной калибровки. Во время проведения измерения ТУ число усреднений шума может быть уменьшено с целью достижения компромисса между скоростью и точностью измерения. Чем выше коэффициент усиления имеет ТУ, тем меньше необходимость в усреднении шума во время проведения измерения. Если при калибровке усреднение шума не использовалось, то шум, который присутствует во время проведения калибровки, не может быть удалён из последующих измерений, даже если усреднение шума будет позже включено.

При использовании стандартных приёмников для измерения коэффициента шума доступны только две установки полосы пропускания шума - 720 кГц и 1,2 МГц вместо пяти установок, доступных при использовании маломощных приёмников, которые перекрывают диапазон от 0,8 до 24 МГц. Чем меньше полоса пропускания шума, тем больше величина джиттера в результатах измерения и тем больше усреднений требуется.

Измерение коэффициента шума соединения “на проход”

На рисунке 44 показаны четыре разных результата измерения коэффициента шума соединения “на проход” с помощью анализатора цепей серии PNA-X, который использует малошумящие приёмники, при разных значениях усреднения шума (полоса пропускания шума равна 4 МГц - значение по умолчанию). Это очень непростое измерение для метода холодного источника, поскольку здесь отсутствует избыточный шум, поступающий в приёмники шума, из-за того, что ТУ (в данном случае, соединение “на проход”) не имеет ни усиления, ни избыточного шума. Это означает, что алгоритм коррекции шума второго каскада заключается в вычитании двух сигналов с шумами с одной и той же средней мощностью. Для PNA-X в случае отсутствия усреднения шума измерение коэффициента шума является очень быстрым, и среднее значение равно 0 дБ, как и ожидалось, но джиттер (шум трассы) имеет довольно высокий уровень. Увеличение усреднения шума до 10 даёт довольно значительное уменьшение уровня джиттера и соответствующее улучшение точности. Двадцать усреднений дают ещё лучшие результаты. Улучшение при использовании сорока усреднений уже не такое существенное. При использовании малошумящих приёмников использование от десяти до двадцати усреднений является хорошим компромиссом между скоростью и точностью, и поэтому это количество усреднений должно всегда использоваться во время калибровки коэффициента шума (в случае стандартных приёмников следует использовать от пятидесяти до ста усреднений). Необходимо заметить, что эти уровни джиттера будут намного выше при том же самом количестве используемых усреднений для устройств с усилением.



Примечание: число точек = 1; усреднение используется во время калибровки и измерения; для более чёткого представления графики смещены на два деления масштабной сетки.

Рисунок 44 - Измерение коэффициента шума соединения “на проход” при различных значениях усреднения шума.

Измерение коэффициента шума соединения “на проход”

На рисунке 45 показано сравнение результатов измерений коэффициента шума соединения “на проход” при использовании NFA (метод Y-фактора) и PNA-X (метод холодного источника с малошумящими приёмниками) при аналогичных временах измерения. Для PNA-X было использовано двадцать усреднений, чтобы получить примерно то же самое время интегрирования, как и в NFA. Нетрудно увидеть, что уровень джиттера для обоих измерений примерно один и тот же. Среднее значение, полученное при использовании PNA-X, ближе к ожидаемому значению 0 дБ за счёт более точного измерения коэффициента усиления ТУ, которое в данном случае равно 0 дБ.

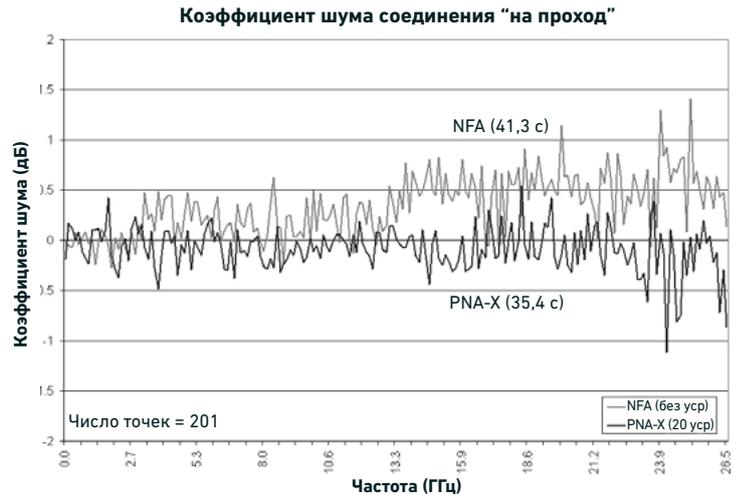
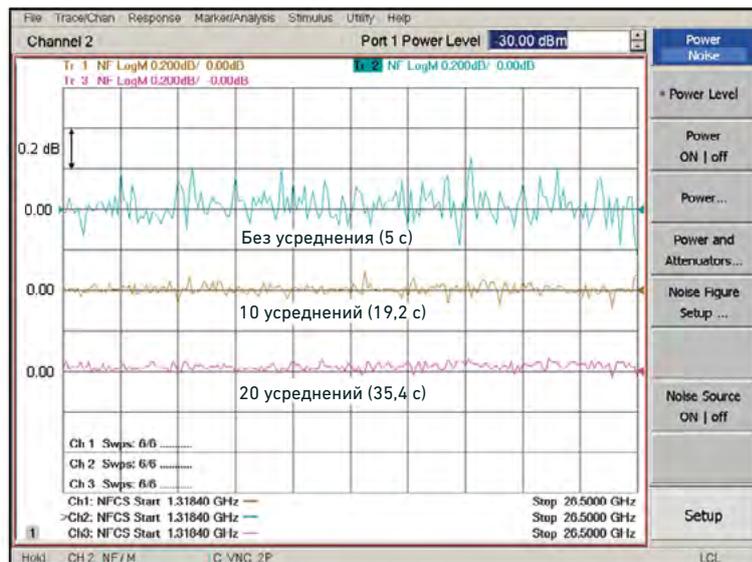


Рисунок 45 - Сравнение результатов измерения соединения “на проход” при использовании PNA-X с малошумящими приёмниками и NFA.

Измерение коэффициента шума усилителя

На рисунке 46 показаны три разных измерения коэффициента шума усилителя с коэффициентом усиления от 15 до 20 дБ при использовании PNA-X с малошумящими приёмниками и разных значений усреднения шума. Заметим, что в данном примере цена деления равна 0,2 дБ/дел, тогда как в предыдущем примере измерения соединения “на проход” цена деления шкалы была 2 дБ/дел. При использовании от десяти до двадцати усреднений уровень джиттера является достаточно низким.



Примечания: ТУ = 83017А с аттенуатором 20 дБ на выходе; число точек = 201; усреднение используется во время калибровки и измерения; данные нормализованы (данные/память) для удаления наклона; графики для удобства восприятия смещены на два деления

Рисунок 46 - Измерение коэффициента шума усилителя с использованием малошумящих усилителей при различных значениях усреднения шума.

Измерение устройств с низким усилением или потерями

Анализатор цепей серии PNA-X вполне способен измерять устройства с низким коэффициентом усиления или низким коэффициентом шума. Чтобы проиллюстрировать это, на рисунке 47 показаны результаты измерений устройства, которое не имеет ни усиления, ни избыточного шума, – это аттенюатор с ослаблением 40 дБ. Это измерение является очень трудным или даже невозможным при использовании метода Y-фактора, поскольку отличие в уровнях шума горячего и холодного состояний источника шума уменьшается аттенюатором до очень малой величины. Этот пример используется только для демонстрации обоснованности использования метода холодного источника, так как больше никто в мире не измеряет коэффициент шума аттенюаторов, поскольку коэффициент шума аттенюатора всегда равен его потерям. Заметим, что коэффициент шума является зеркальным отражением S_{21} в логарифмическом формате, и это верно, поскольку для аттенюатора коэффициент шума всегда является положительной величиной, а логарифмическая амплитуда S_{21} – всегда отрицательной. Опорные уровни между измерениями S_{21} и коэффициента шума изменяют знак на противоположный по отношению друг к другу, так что оба графика можно просматривать вместе. Заметим, что было использовано пятьдесят усреднений шума, чтобы получить приемлемое значение джиттера.

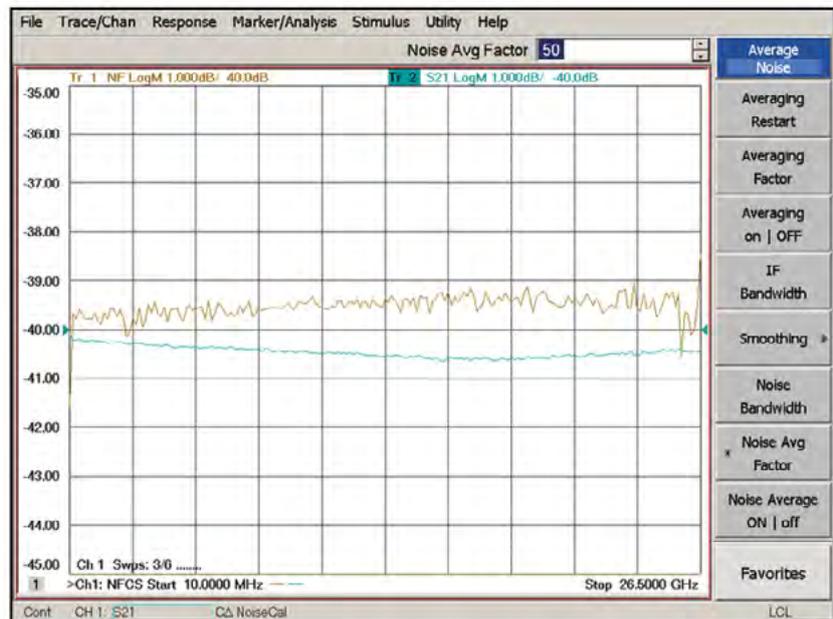


Рисунок 47 - Измерение коэффициента шума аттенюатора с ослаблением 40 дБ.

Оптимизация уровней мощности при измерении S-параметров

Поскольку часто требуется провести измерения коэффициента шума усилителей или преобразователей частоты с высоким коэффициентом усиления, уровень мощности измерительного порта, используемый во время той части измерения коэффициента шума, которая относится к измерению S-параметров или усиления преобразования, часто является низким. Для повышения точности измерений можно рекомендовать следующие два метода, касающиеся установок уровня мощности на измерительном порте. Первое, что можно сделать, – это развязать уровни мощности на портах, и использовать более высокий уровень мощности для порта анализатора цепей PNA-X, который подключён к выходному порту ТУ. Измерение S_{22} ТУ необходимо для коррекции шума второго каскада, поэтому этот уровень мощности должен быть достаточно высоким для обеспечения измерения отражения при хорошем соотношении сигнал/шум. Для большинства устройств даже если уровень входной мощности должен быть низким, уровень обратной мощности, который не приводит к повреждению устройства, может быть значительно выше. Обычно обратная мощность на порте устанавливается приблизительно на 5 дБ ниже уровня мощности, присутствующей на выходе ТУ, когда происходит измерение коэффициента шума в прямом направлении.

Второе, что можно сделать для повышения точности, заключается в том, чтобы увеличить уровень мощности на порте 1 во время калибровки, а затем уменьшить его во время измерения ТУ. Это означает, что установка аттенюатора источника для порта 1 должна быть минимально возможной, но при этом всё ещё гарантирующей, что уровень мощности на порте может быть снижен до необходимого уровня для измерения. Использование меньшего значения ослабления означает, что уровень мощности на порте может быть увеличен во время калибровки в большей степени, обеспечивая более подходящее отношение сигнал/шум и за счёт этого пониженный уровень шума на графике.

Когда проводятся измерения коэффициента шума с использованием стандартных приёмников и внешнего предусилителя, необходимо учитывать коэффициент усиления предусилителя при установке уровней мощности во время измерения и калибровки, чтобы избежать компрессии измерительного приёмника. Если направленный ответитель измерительного порта включён в обратном направлении, уровень мощности, передаваемой к приёмнику, увеличивается по крайней мере на 15 дБ по сравнению с обычной конфигурацией. Поэтому также следует быть внимательным, чтобы избежать компрессии приёмника. Как правило, для предотвращения компрессии стандартных приёмников уровень мощности, подаваемой на измерительный порт, должен быть меньше, чем +10 дБм, при использовании нормальной конфигурации переключек, либо меньше, чем -5 дБм, если направленный ответитель измерительного порта включён в обратном направлении.

Оптимизация уровня преобразователя мощности во время калибровки

При измерении коэффициента шума преобразователя частоты или в случае использования стандартного приёмника для калибровки приёмников PNA-X во время процесса калибровки применяется преобразователь (датчик) мощности. На рисунке 48 показано, что уровень мощности для этого шага калибровки может быть установлен независимо от уровня мощности канала, который используется для калибровки в части, касающейся S-параметров или измерения. Для достижения наивысшей точности измерения преобразователь мощности должен использоваться при том же уровне мощности, что и при калибровке, который обычно равен 0 дБм. За счёт этого погрешность нелинейности характеристики преобразователя мощности удаляется из суммарной погрешности измерения. Приёмники анализатора цепей серии PNA-X имеют практически линейную характеристику (более линейную, чем преобразователь мощности), поэтому они могут калиброваться при более высоком уровне мощности и при этом обеспечивать высокую точность при измерении низких уровней мощности. В зависимости от установленной величины ослабления и диапазона частот измерения, может оказаться невозможным обеспечить значение 0 дБм во время калибровки. В этом случае следует установить уровень мощности высоким, насколько это возможно, но чтобы он не привёл к выходу источника из режима стабилизации мощности.

При измерении устройств с очень высоким коэффициентом усиления, которые требуют большой величины ослабления уровня мощности источника (для того, чтобы установить уровень мощности при измерении достаточно низкой с целью предотвращения компрессии ТУ), максимально достижимый уровень мощности может оказаться ниже диапазона измерения преобразователя мощности, что приведёт к ошибке калибровки. В этом случае аттенуатор источника может быть установлен на меньшее значение, чтобы обеспечить более высокий уровень мощности во время калибровки, а на входе ТУ может быть помещён внешний аттенуатор для снижения уровня мощности во время измерения коэффициента шума. Влияние аттенуатора на результаты измерения коэффициента шума может быть устранено посредством исключения S-параметров аттенуатора, которые должны быть измерены заранее.



Рисунок 48 - При использовании измерителя мощности во время калибровки уровень мощности может быть оптимизирован независимо от уровня мощности канала.

Уровни компрессии и максимально допустимые уровни

Подобно тому, как это делается для измерений S-параметров, важно принять меры для того, чтобы приёмники, используемые для измерений коэффициента шума, не подвергались компрессии. Это особенно важно при использовании малошумящих приёмников PNA-X, поскольку они имеют значительно более высокий коэффициент усиления, чем стандартные приёмники. При рассмотрении вопросов, связанных с компрессией, в случае измерений коэффициента шума следует учитывать как коэффициент усиления, так и полосу пропускания ТУ. С увеличением коэффициента усиления или полосы пропускания ТУ увеличивается и уровень мощности шума на выходе. При использовании малошумящих приёмников с широкополосными устройствами компрессия, вероятно, должна возникать сначала во входных каскадах усилителей. В случае узкополосных устройств аналого-цифровой преобразователь (АЦП), расположенный ближе к выходу приёмника, вероятно, выйдет за пределы диапазона раньше, чем наступит компрессия во входных каскадах. Малошумящие приёмники PNA-X имеют диодные детекторы во входных каскадах для определения компрессии. Встроенное программное обеспечение прибора будет передавать предупреждения, если возникнет перегрузка входных каскадов или выход за пределы диапазона АЦП. Если такое предупреждение возникает на короткое время во время измерения, оно может быть результатом воздействия электромагнитных помех (ЭМП) (см. следующий раздел), но если это предупреждение отображается непрерывно, то необходимо уменьшить коэффициент усиления либо приёмника шума, либо ТУ. Заметим, что изменение коэффициента усиления приёмника после калибровки не делает недействительными результаты измерения, поскольку во время процесса калибровки измерения проводятся при всех трёх установках коэффициента усиления. Если приёмник уже работает при самой низкой установке коэффициента усиления, то имеется два варианта: использовать аттенюатор на выходе ТУ (который не влияет на измеряемый коэффициент шума ТУ) или использовать стандартный приёмник. В случае использования аттенюатора его цепь может быть математически исключена, так что измеренное значение S_{21} ТУ будет точным. Компрессия, обусловленная шумом, не будет, вероятно, проблемой при использовании стандартных приёмников по причине отсутствия в их входных каскадах усилителей. Однако если направленный ответвитель измерительного порта включён в обратном направлении, то уровень мощности, передаваемой к приёмнику, увеличивается по крайней мере на 15 дБ по сравнению со стандартной конфигурацией. Поэтому также следует проявить осторожность с уровнями мощности для S-параметров, чтобы избежать компрессии приёмника.

При измерении смесителей и преобразователей частоты может оказаться необходимой дополнительная фильтрация на выходе ТУ, чтобы подавить проникновение сигнала гетеродина или других паразитных сигналов, которые в противном случае привели бы к компрессии приёмника.

Уровни компрессии и максимально допустимые уровни (продолжение)

Калькулятор погрешностей коэффициента шума является полезным средством для проверки наличия компрессии. Он считывает данные результатов измерения коэффициента шума и показывает, насколько далеко измеренный уровень мощности шума отстоит от уровня собственных шумов и уровня компрессии приёмника, как показано на рисунке 49.

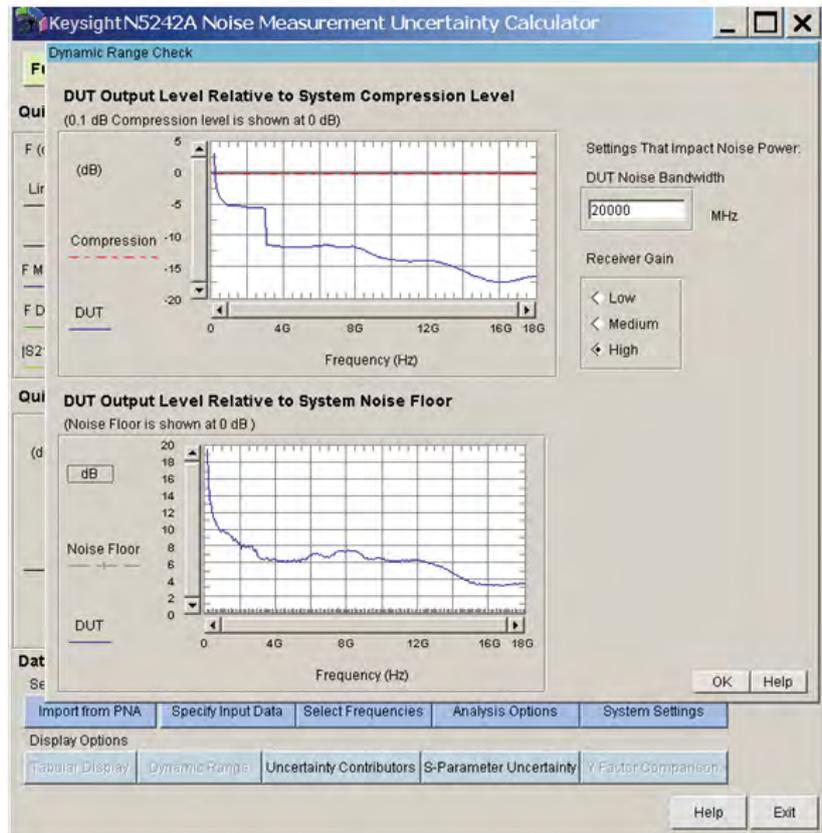


Рисунок 49 - Калькулятор погрешностей коэффициента шума анализатора цепей серии PNA-X компании Keysight показывает, вызывает ли уровень мощности шума ТУ компрессию в приёмнике шума.

При использовании маломощных приёмников максимально допустимый уровень сигнала измерительного порта 2 анализатора цепей серии PNA-X снижается с +30 дБм до +25 дБм. Это уменьшение связано с МШУ приёмников шума, которые более чувствительны, чем смесители, используемые в стандартных приёмниках.

Электромагнитные помехи

При измерении коэффициента шума неэкранированного устройства, такого как усилитель на печатной плате, очень часто захватываются электромагнитные помехи от внешних сигналов, таких как сигналы сотовых/мобильных телефонов, маршрутизаторов или клиентов беспроводных ЛВС или мобильной радиосвязи. Эти помехи проявляются как неповторяющиеся пики в результатах измерения, как показано на рисунке 50. Обычно такие помехи только неблагоприятно влияют на результаты измерения коэффициента шума на частотах, на которых они возникают. Правда, если уровень помехи достаточно большой, и она присутствует всё время, то такая помеха может стать причиной компрессии приёмников, следствием чего являются неточные измерения. Если такое происходит, то одним из способов решения этой проблемы является уменьшение коэффициента усиления приёмников анализатора цепей серии PNA-X, если это возможно. Правда, наилучшим выходом является проведение измерений коэффициента шума в экранированной среде, например, в экранированном помещении.

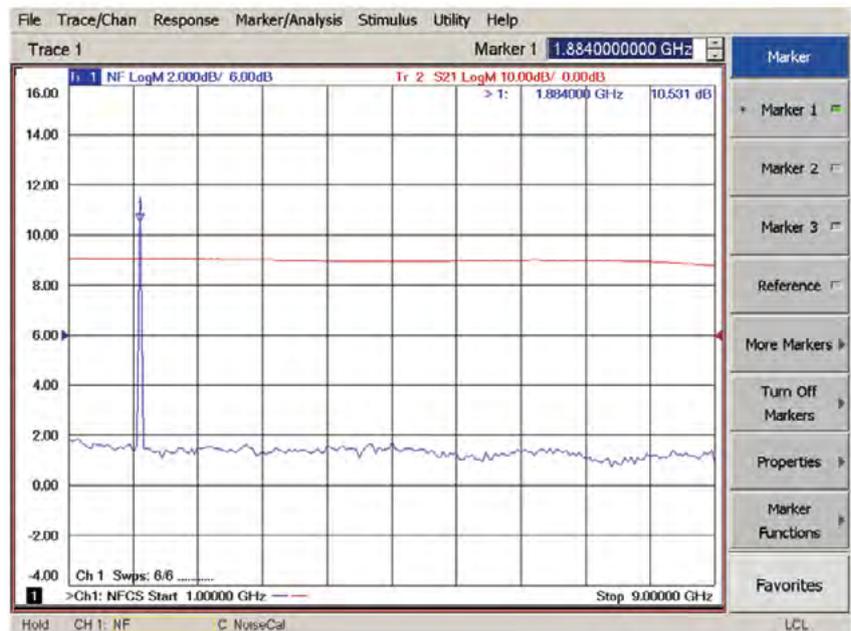


Рисунок 50 - Электромагнитные помехи обычно проявляются в виде пиков, имеющих высокий уровень, в результатах измерения коэффициента шума.

Дополнительные ресурсы

Рекомендации по применению

Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновом диапазонах, номер публикации компании Keysight 5952-8255RURU (прежнее название - Рекомендации по применению 57-1)

Noise Figure Measurement Accuracy – The Y-Factor Method (точность измерения коэффициента шума: метод Y-фактора), номер публикации компании Keysight 5952-3706E (прежнее название - Рекомендации по применению 57-2)

10 Hints for Making Successful Noise Figure Measurements (10 советов для выполнения успешных измерений коэффициента шума), номер публикации компании Keysight 5980-0288EN (прежнее название - Рекомендации по применению 57-3)

Practical Noise-Figure Measurement and Analysis for Low-Noise Amplifier Designs (практическое измерение и анализ коэффициента шума в малошумящих усилителях), номер публикации компании Keysight 5980-1916EN (прежнее название - Рекомендации по применению 1354)

Noise Figure Measurements of Frequency Converting Devices Using the Keysight NFA Series Noise Figure Analyzer (измерение коэффициента шума преобразователей частоты с использованием анализатора коэффициента шума серии NFA компании Keysight), номер публикации компании Keysight 5989-0400EN (прежнее название - Рекомендации по применению 1487)

Журнальные статьи

Ballo, David. "Overcoming Noise Figure Measurement Challenges in Fixtured, On-Wafer and ATE Environments". Microwave Product Digest, May 2008

Gary Simpson and David Ballo. "Ultra-fast, Simpler and More Accurate Noise Parameter Measurements". Microwave Journal, March, 2010 (Vol. 53, No. 3): p. 82+

Научные статьи

James Randa, Ken Wong, and Roger Pollard. "Simulations of Noise-Parameter Verification Using Cascade with Isolator or Mismatched Transmission Line". 70th ARFTG Microwave Measurements Conference Digest, November 2007, pp. 77 – 83

Публикации в интернете

Более подробную информацию об анализаторах цепей PNA-X, включая часто задаваемые вопросы по измерению коэффициента шума с приложением ответов можно найти по ссылке: www.keysight.com/find/pnax

Обзор интерфейса пользователя для опций измерения коэффициента шума анализатора цепей серии PNA-X можно найти в файле справки по ссылке: na.tm.keysight.com/pna/help/index.html

Калькулятор погрешностей коэффициента шума анализатора цепей PNA-X компании Keysight можно загрузить с сайта компании по ссылке: www.keysight.com/find/nfu

 myKeysight
www.keysight.com/find/mykeysight
Персонализированное представление наиболее важной для Вас информации.



www.lxistandard.org
LAN eXtensions for Instruments (расширения LAN для измерительных приборов) добавляет возможности локальной сети Ethernet и Web в измерительные системы. Компания Keysight является членом-учредителем консорциума LXI.



Планы Технической Поддержки Keysight
www.keysight.com/find/AssurancePlans
До пяти лет поддержки без непредвиденных расходов гарантируют, что Ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а Вы будете уверены в точности своих измерений.



www.keysight.com/go/quality
Подразделение электронных измерений компании Keysight Technologies, Inc. сертифицировано компанией DEKRA на соответствие требованиям системы менеджмента качества ISO 9001:2008.

Торговые партнеры компании Keysight
www.keysight.com/find/channelpartners
Получите двойную выгоду: глубокие профессиональные знания в области измерительной техники и широкую номенклатуру выпускаемой продукции компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

www.keysight.com/find/pna

Российское отделение
Keysight Technologies
115054, Москва,
Космодамианская наб., 52, стр. 3
Тел.: +7 (495) 7973954
8 800 500 9286
(звонок по России бесплатный)
Факс: +7 (495) 7973902
e-mail: tmo_russia@keysight.com
www.keysight.ru

**Сервисный Центр
Keysight Technologies в России**
115054, Москва,
Космодамианская наб., 52, стр. 3
Тел.: +7 (495) 7973930
Факс: +7 (495) 7973901
e-mail: tmo_russia@keysight.com

Этот документ был первоначально известен как "Рекомендации по применению 1408-20"