

Keysight Technologies

Оптимизация измерений коэффициента шума
на пластине в диапазоне частот до 67 ГГц

Рекомендации по
применению

Введение

Измерения коэффициента шума часто являются существенной частью определения параметров устройства на этапе НИОКР и контроля производства. Не всегда бывает просто получить точные результаты измерения коэффициента шума на пластине: результат зависит от методики измерения и конфигурации измерительного оборудования.

Для измерения коэффициента шума в большинстве случаев используются два метода: метод Y-фактора и метод холодного источника. Метод Y-фактора или метод горячего/ холодного источника наиболее часто реализуется в анализаторах коэффициента шума и технических решениях на базе анализаторов спектра. Метод холодного источника обычно реализуется с использованием векторных анализаторов цепей, которые обеспечивают данные и по амплитуде, и по фазе. В результате метод холодного источника при измерениях коэффициента шума позволяет достичь значительно более высокой точности.

Данные рекомендации по применению описывают техническое решение, использующее метод холодного источника, на базе анализатора цепей серии PNA-X компании Keysight, работающего в микроволновом диапазоне. Снабженный опцией измерения коэффициента шума с полной коррекцией (опция 029), анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает исключительную точность. Обновлённые аппаратные средства прибора обеспечивают удобство измерений в диапазоне частот до 50 ГГц. Теперь дополнительные внешние аппаратные средства требуются только при проведении измерений в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц. Анализатор цепей серии PNA-X также позволяет сэкономить время, поскольку обеспечивает возможность проведения комплекса измерений (коэффициент шума, S-параметры, компрессия коэффициента усиления и интермодуляционные искажения), используя только один набор подключений к испытываемому устройству (ИУ).

Обзор: коэффициент шума

Фактор шума, измеряемый в линейных единицах, и коэффициент шума, измеряемый в логарифмических единицах, являются очень полезными и широко признанными показателями качества, которые характеризуют, сколько шума усилитель или преобразователь частоты добавляют к сигналам, которые проходят через них. Определение каждого из этих двух терминов является простым и наглядным. Например, фактор шума (F) какой-либо цепи определяется как отношение сигнал/шум на входе цепи к отношению сигнал/шум на выходе цепи:

$$F = (S_i/N_i)/(S_o/N_o)$$

Коэффициент шума (NF) - это фактор шума, выраженный в децибелах:

$$NF = 10 \times \log(F)$$

В идеальном усилителе уровень шума на выходе будет равен уровню шума на входе, умноженному на коэффициент усиления усилителя. Следствием этого является одно и то же значение отношения сигнал/шум как на входе, так и на выходе усилителя. Однако в реальном мире уровень шума на выходе больше, чем уровень шума на входе, умноженный на коэффициент усиления, поскольку усилитель добавляет свой собственный шум. В результате отношение сигнал/шум на выходе будет меньше, чем на входе. Это приводит к тому, что фактор шума (F) обычно больше единицы, а коэффициент шума (NF) - больше 0 дБ.

Измерение коэффициента шума

Для измерения коэффициента шума в большинстве случаев используются два метода: метод Y-фактора и метод холодного источника. Метод Y-фактора или метод горячего/холодного источника использует калиброванный источник шума, который состоит из оптимизированного по шуму лавинного диода, который может быть включён или выключен, и следующего за ним аттенюатора для обеспечения хорошего согласования по выходу.

Когда диод находится в выключенном состоянии (то есть, ток смещения отсутствует), источник шума генерирует такой же уровень шума, как согласованная нагрузка при комнатной температуре. Когда к диоду прикладывается напряжение обратного смещения, он переходит в состояние лавинного пробоя, в результате чего создаётся значительный уровень электрического шума вдобавок к уровню шума, формируемому согласованной нагрузкой при комнатной температуре. Этот уровень дополнительного шума определяется как "избыточный коэффициент шума" или ИКШ. Типовыми значениями ИКШ являются 5 или 15 дБ. Коэффициент передачи и коэффициент шума ИУ можно определить по результатам отдельных измерений уровня выходной мощности при "холодной" и "горячей" согласованной нагрузке на входе.

Метод холодного источника, который также иногда называют методом прямого измерения шума, основывается на использовании только одной "холодной" (обычно при комнатной температуре) согласованной нагрузки на входе ИУ. При реализации

Измерение коэффициента шума (продолжение)

с векторными анализаторами цепей этот метод имеет важное преимущество, позволяющее экономить время, поскольку обеспечивает возможность проведения комплекса измерений (коэффициент шума и S-параметры), используя только один набор подключений к ИУ. Это особенно важно при тестировании устройств на пластине, поскольку повторяющиеся контактные измерения могут повредить тестируемый элемент.

Кроме того, векторный анализатор цепей способен обеспечить измерение амплитудных и фазовых характеристик как измерительной системы, так и ИУ, следствием чего является исключительно высокая точность в сравнении с другими методами измерений. Эти преимущества распространяются на широкий диапазон ИУ: усилители, преобразователи частоты и многие другие.

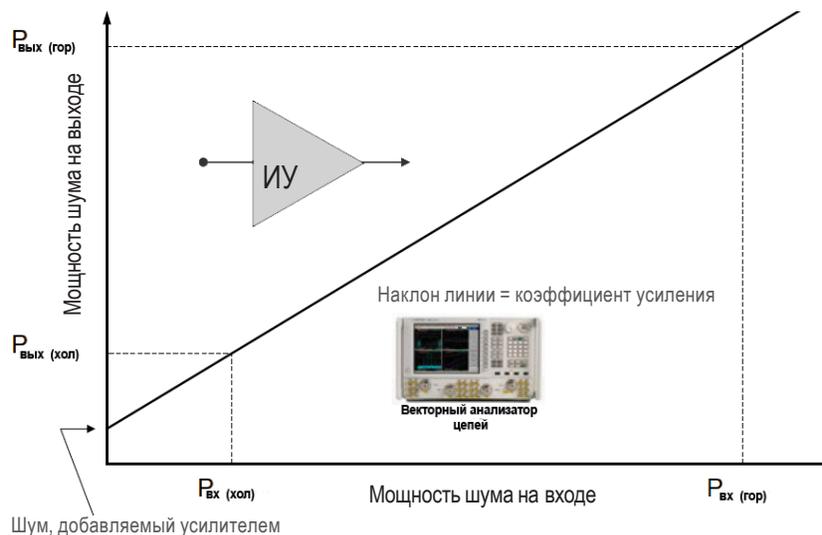


Рисунок 1 - График зависимости мощности шума на выходе от мощности шума на входе отображает информацию о коэффициенте усиления, линейности характеристики и внутреннем шуме усилителя.

Пока усилитель находится в линейном режиме, график зависимости мощности шума на выходе от мощности шума на входе будет представлять прямую линию (рисунок 1). Линейность характеристики является хорошим допущением для малошумящих усилителей (МШУ), поскольку их назначением является усиление сигналов низкого уровня, которые находятся далеко от области компрессии усилителя.

Даже если источник шума на входе отсутствует, всё равно будет присутствовать некоторый уровень шума на выходе усилителя вследствие процессов генерации шума активными цепями усилителя. Это тот шум, характеристики которого мы определяем при измерении коэффициента шума.

Графически легко продемонстрировать, почему два измерения мощности шума на выходе можно использовать для определения как коэффициента усиления (наклон линии), так и коэффициента шума (получаемого из точки пересечения с осью Y). С другой стороны, если коэффициент усиления (наклон линии) можно определить, используя другие методы, например, посредством возбуждения синусоидальным сигналом и измерений, обеспечиваемых векторным анализатором цепей, то потребуется только одно измерение мощности шума для вычисления точки пересечения с осью Y и, соответственно, коэффициента шума ИУ.¹

1. Это является основой метода холодного источника

Проблема: ухудшение точности измерений

Одно из основных допущений, лежащих в основе метода Y-фактора, заключается в том, что источник шума представляет для ИУ стабильное 50-омное согласование. Любое отклонение от значения 50 Ом может существенно ухудшить точность измерения. Степень ухудшения зависит от сценария измерения. Например, если источник шума подключён непосредственно ко входу тестируемого усилителя, точность измерения коэффициента шума будет достаточно хорошей. Это особенно справедливо в случае использования источников шума с низким ИКШ, которые обычно обеспечивают лучшее согласование, чем источники шума с большим ИКШ.

При измерениях на пластине (рисунок 2), между источником шума и ИУ имеются различные электрические цепи, вызывающие снижение точности измерений из-за ухудшения согласования в источнике. Это остаётся справедливым, даже в случае полной компенсации потерь, вносимых кабелями, переключателями и пробниками зондовых станций. Причина заключается в том, что компенсация потерь не может устранить ни эффекты рассогласования, ни эффекты, вносимые шумовыми параметрами. Эти эффекты добавляют пульсации и неопределённость в результаты измерения коэффициента шума.



Рисунок 2 - Чем больше оборудования добавляется к конфигурации испытательной системы, тем в большей степени может пострадать точность измерения с использованием метода Y-фактора из-за ухудшения согласования в источнике.

Общее решение: измерение с помощью анализатора цепей серии PNA-X

Сам по себе анализатор цепей серии PNA-X СВЧ-диапазона позволяет при одном подключении измерять S-параметры, компрессию коэффициента усиления и фазы, гармоники и интермодуляционные искажения. Опция 029, обеспечивающая измерение коэффициента шума с коррекцией неполного согласования в источнике, включает измерения коэффициента шума в список возможных измерений путём добавления аппаратных средств и встроенного программного обеспечения к PNA-X.

Что касается аппаратных средств, данная опция добавляет малошумящие приёмники с тем же диапазоном частот, в котором работает и сам прибор, но с ограничением до 50 ГГц. Измерения коэффициента шума могут быть расширены до 67 ГГц с использованием одного из стандартных приёмников PNA-X, часто с добавлением внешнего предусилителя и фильтра для удаления внеполосного шума. Данная опция также расширяет встроенное программное обеспечение прибора возможностями реализации специализированных измерений и алгоритмов калибровки.

Полная векторная коррекция ошибок может быть достигнута при использовании встроенного тюнера импеданса, который доступен в моделях с диапазоном частот до 43,5, 50 и 67 ГГц, или внешнего модуля электронной калибровки (ECal) с диапазоном частот до 13,5 или 26,5 ГГц, сконфигурированного в качестве тюнера импеданса. В сочетании со стандартными измерениями коэффициента усиления (передачи) и параметров согласования с использованием векторной коррекции ошибок, тюнер импеданса помогает устранить эффекты, связанные с неполным согласованием в источнике системы, что значительно повышает точность измерения.

Метод коррекции согласования в источнике является уникальным для PNA-X. Диаграмма Смита, показанная на рисунке 3, иллюстрирует реализацию этого метода. Квадрат в центре диаграммы указывает точку, в которой мы хотели бы измерить коэффициент шума ИУ. Это соответствует идеальному 50-омному согласованию в источнике. С другой стороны, нам известно, что испытательная система не обеспечивает идеальное согласование во всём диапазоне частот.

Для устранения этого недостатка анализатор цепей серии PNA-X с опцией 029 использует от четырёх до семи прецизионных импедансов, которые отличаются от значения 50 Ом. Они указаны в виде четырёх кружков на рисунке 3. При каждом значении импеданса PNA-X измеряет мощность шума, поступающего от ИУ. Значения импедансов этих четырёх состояний измеряются во время калибровки системы, а значения мощности шума

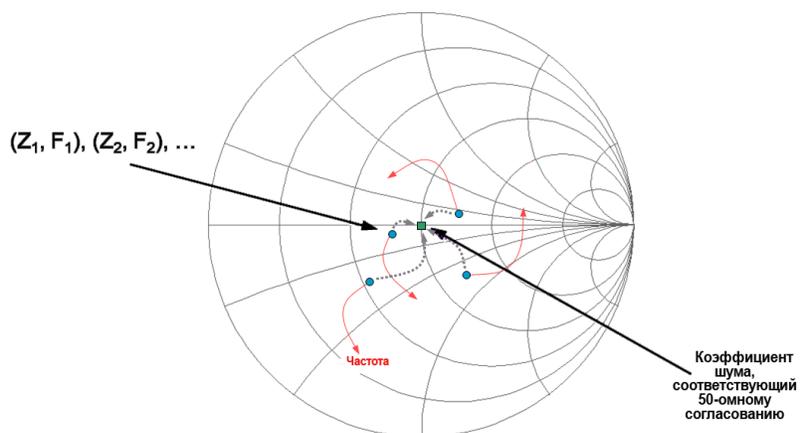


Рисунок 3 - Анализатор цепей серии PNA-X может использовать от четырёх до семи состояний импеданса, которые отличаются от 50 Ом, чтобы обеспечить точное вычисление коэффициента шума, соответствующего 50-омному согласованию в источнике, для ИУ.

Общее решение: измерение с помощью анализатора цепей серии PNA-X (продолжение)

измеряются с ИУ, установленным на своём месте. Пары значений импеданс/мощность шума затем используются для решения уравнения шумовых параметров, что, в свою очередь, обеспечивает очень точное вычисление коэффициента шума, соответствующего 50-омному согласованию в источнике (квадрату в центре).

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 ИУ проводится свипирование частоты для каждого состояния импеданса. Это более эффективно, чем изменение импеданса в каждой частотной точке. Помимо четырёх, пяти или семи циклов свипирования, необходимых для измерения мощности шума, также выполняются два традиционных цикла свипирования для измерения S-параметров (в прямом и обратном направлениях) с использованием стандартных приёмников. Два цикла свипирования выполняются для обеспечения точного измерения коэффициента усиления усилителя и четыре цикла свипирования используются для измерения усиления (преобразования) преобразователя частоты.

На рисунке 4 показан пример сравнения методов Y-фактора и PNA-X. В обоих случаях были проведены широкополосные измерения коэффициента шума несогласованного малошумящего транзистора в корпусе, использующие 401 точку. Для метода Y-фактора использовался источник шума 346С компании Keysight с ИКШ = 14 дБ.

График результатов измерения PNA-X имеет гладкий характер 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 15 ГГц метод Y-фактора может представить рабочие характеристики МШУ либо гораздо лучше, либо гораздо хуже, чем на самом деле.

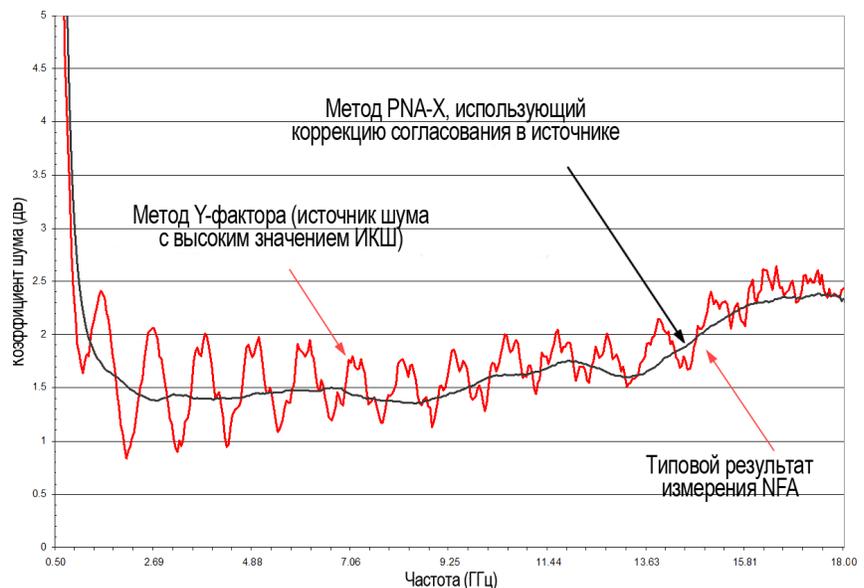


Рисунок 4 - Используя метод коррекции согласования в источнике, анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает более точное представление коэффициента шума ИУ по сравнению с использованием типового метод Y-фактора и анализатора коэффициента шума серии NFA.

2. Пользователь выбирает количество значений импеданса для использования.

Общее решение: измерение с помощью анализатора цепей серии PNA-X (продолжение)

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 по частоте или с наложением мешающего сигнала, как показано пунктирной линией на рисунке 4. В этом случае было только 11 точек измерения. Это значение обычно используется в специализированных анализаторах коэффициента шума серии NFA.

Очевидно, что при измерении, использующем 401 точку, анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает меньший уровень пульсаций и за счёт этого - более высокую точность измерений и более достоверное отображение коэффициента шума ИУ.

Общее решение: определение характеристик приёмника шума

Измерение коэффициента шума любого ИУ с коррекцией на пластине и в других случаях требует, чтобы мы определили мощность шума, вносимую внутренними приёмниками шума измерительного прибора, и вычли её из необработанного (нескорректированного) результата измерения. На результат измерения мощности шума влияет коэффициент усиления, полоса пропускания и коэффициент шума приёмника. Например, чем больше коэффициент усиления, тем выше измеренный уровень мощности. Мощность шума приёмника зависит также от его полосы пропускания. Таким образом, общая мощность шума, вносимая приёмниками шума, пропорциональна произведению коэффициента усиления и полосы пропускания приёмника (рисунок 5).

Коэффициент усиления и полосу пропускания можно измерить отдельно или вместе в виде одного произведения. Для таких методов, как метод Y-фактора, который использует источник шума, характеристики приёмника шума определяются посредством измерения произведения коэффициента усиления и полосы пропускания при непосредственной подаче известной величины избыточного шума.

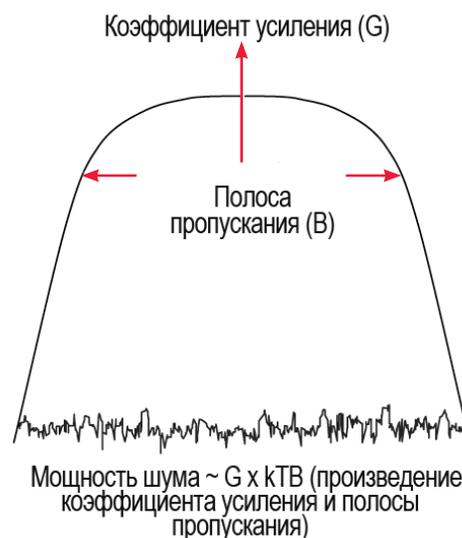


Рисунок 5. Определение произведения коэффициента усиления и полосы пропускания приёмника шума помогает измерить мощность шума, вносимую внутренними приёмниками шума, которая используется в качестве поправочного коэффициента для обеспечения калиброванных измерений.

Общее решение: определение характеристик приёмника шума (продолжение)

Анализатор цепей серии PNA-X предлагает альтернативный подход, который использует измеритель мощности и преобразователь мощности в качестве калибровочной меры вместо источника шума. Этот метод основан на отдельных измерениях коэффициента усиления и полосы пропускания. Одним из преимуществ этого подхода является практичность: в диапазоне частот до 50 ГГц преобразователи мощности более распространены, чем источники шума.

Этот подход включает три шага. Сначала измеритель и преобразователь мощности используются для калибровки РЧ-источника анализатора цепей серии PNA-X в заданном диапазоне частот. Откалиброванный источник затем используется для калибровки коэффициента усиления приёмника шума. Затем посредством свипирования фильтра шумовой полосы пропускания измеряется АЧХ фильтра ПЧ приёмника шума в каждой частотной точке в пределах требуемого измерения. АЧХ фильтра ПЧ затем интегрируется для вычисления эффективной полосы пропускания шума приёмника шума. Значения коэффициента усиления и полосы пропускания комбинируются в каждой частотной точке для получения характеристики произведения коэффициента усиления и полосы пропускания приёмника.

Подход с использованием измерителя мощности имеет еще одно преимущество: в данном случае не происходит ухудшения джиттера измерения на частотах выше 45 ГГц из-за типового спада АЧХ избыточного коэффициента шума (ИКШ) источника шума. В результате погрешность измерения в случае подхода с измерителем мощности будет, вероятно, немного лучше по сравнению с погрешностью, полученной при использовании стандартного источника шума.

Конкретное техническое решение и результаты: распространение точности измерений до окончечников пробников

При проведении измерений коэффициента шума на пластине с использованием анализатора цепей серии PNA-X хорошие результаты гарантируют два типа калибровки: можно использовать мастер калибровки Calibration Wizard или Cal All Wizard, который включает 2-портовую калибровку на пластине, либо можно использовать коаксиальные калибровочные меры и исключение цепей пробников (зондов) зондовой станции, используя данные их S-параметров. Хотя оба этих подхода обеспечивают превосходную точность измерений, ограничивающим фактором, которому часто не придаётся должное значение, является качество кабелей, используемых в испытательной установке. Рассмотрим подробнее каждый из этих факторов.

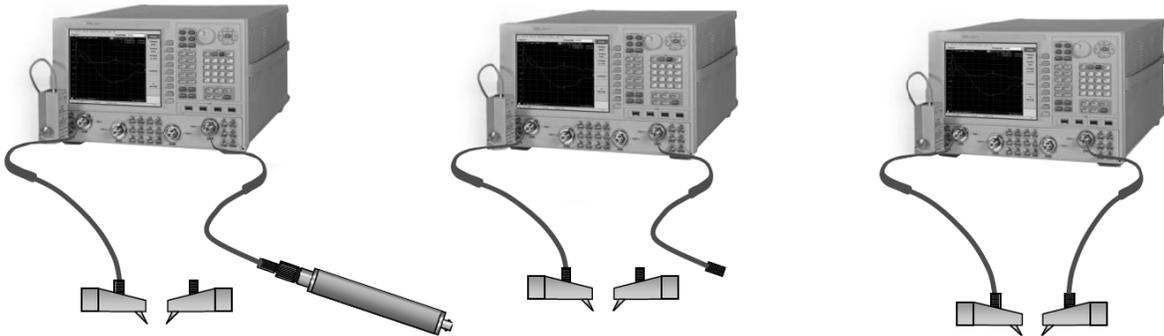
Использование мастера калибровки Cal Wizard

При работе с любым мастером калибровки, Cal Wizard или Cal All Wizard, используется комбинация шагов калибровки коаксиального тракта и на пластине. В данном примере показана калибровка на пластине с использованием мастера калибровки Cal Wizard.

Этот процесс, включающий три шага, показан на рисунке 6. В данном примере источник

Использование мастера калибровки Cal Wizard (продолжение)

шума подсоединяется к концу кабеля, используемого для подключения измерительного пробника (зонда), а не к измерительному порту 2 анализатора (шаг 1). Хотя лучше подсоединить источник шума непосредственно к порту 2, подключение его к концу кабеля будет более удобным, если анализатор цепей установлен в приборной стойке позади зондовой станции. Если непосредственное подключение невозможно, кабель, подключаемый к порту 2, должен иметь минимально возможные потери. Любые потери вычитаются из ИКШ источника шума, и это приводит к увеличению джиттера. Если потери в кабеле, подключенном к порту 2, слишком большие, это может стать препятствием для использования источника шума из-за отсутствия избыточного шума на частотах выше 45 ГГц. В этом случае следует использовать калибровку на базе измерителя мощности.



Шаг 1: Использовать источник шума или измеритель мощности для калибровки приёмника

Шаг 2: выполнить 1-портовую калибровку (удалить переход после проведения калибровки)

Шаг 3: выполнить 2-портовую TRL-калибровку с дополнительными импедансами

Рисунок 6 - Мастер калибровки коэффициента шума автоматически встраивает потери, вносимые пробником (зондом), в данные шумовых параметров, чтобы переместить опорную плоскость калибровки к опорной плоскости 2-портовой калибровки.

Для подключения источника шума к испытательной системе необходим переход “розетка-розетка”. После завершения измерения шумовых параметров проводится 1-портовая калибровка (переход остаётся на своём месте), чтобы установить опорную плоскость калибровки шума (шаг 2). После завершения 1-портовой калибровки переход должен быть удалён, чтобы снова подсоединить пробник (зонд).

Последним шагом является 2-портовая TRL-калибровка на пластине. Если в шаге 1 был использован измеритель мощности или если в шаге 2 не был использован модуль ECal, то требуются два дополнительных импеданса для точных измерений с изменением импеданса источника на входе приёмника шума в шаге 3. В качестве этих двух дополнительных мер обычно используются короткозамкнутая нагрузка (КЗ) или нагрузка холостого хода (ХХ) и несогласованная линия передачи. При этом необходимо, чтобы ни одна из этих мер не была частью TRL-калибровки. По окончании выполнения всех трёх шагов встроенное программное обеспечение калибровки шума использует корректное математическое встраивание цепей для перемещения опорной плоскости калибровки шума к опорной плоскости 2-портовой калибровки (даже если переход “розетка - розетка” был удалён).

В случае использования анализатора цепей серии PNA-X важным шагом при проведении калибровки коэффициента шума является измерение шумовых

Использование мастера калибровки Cal Wizard (продолжение)

параметров малошумящего приёмника. Это гарантирует, что из всех результатов измерений ИУ будет вычитаться правильная величина шума, вносимого приёмником, обеспечивая измерение шума только от ИУ.

Величина шума, добавляемого приёмником, зависит от согласования на выходе (S22) ИУ, которое легко измеряется векторным анализатором цепей. Это согласование для приёмника является согласованием в источнике. В соответствии с теорией шумовых параметров коэффициент шума усилителя или приёмника зависит от согласования в источнике, который подсоединён ко входу. Шумовые параметры приёмника измеряются точно так же, как и шумовые параметры ИУ: для приёмника (на порте 2) воспроизводится набор известных импедансов, и мощность шума измеряется при каждом состоянии импеданса.

Самый быстрый и простой способ сделать это - использовать источник шума и модуль ECal во время калибровки. Изменение импеданса источника (или мощности шума) может быть реализовано как часть шага 2, описанного выше, если 1-портовые параметры измеряются в стандартной плоскости калибровки шума.

Если источник шума используется в качестве калибровочной меры, он всегда подключён к порту 2. Однако если используется преобразователь мощности, он подключается к порту 1, что исключает возможность изменения импеданса на входе приёмника шума на порте 2 с использованием модуля ECal. В таких случаях используются дополнительные меры TRL для завершения измерения шумовых параметров приёмника.

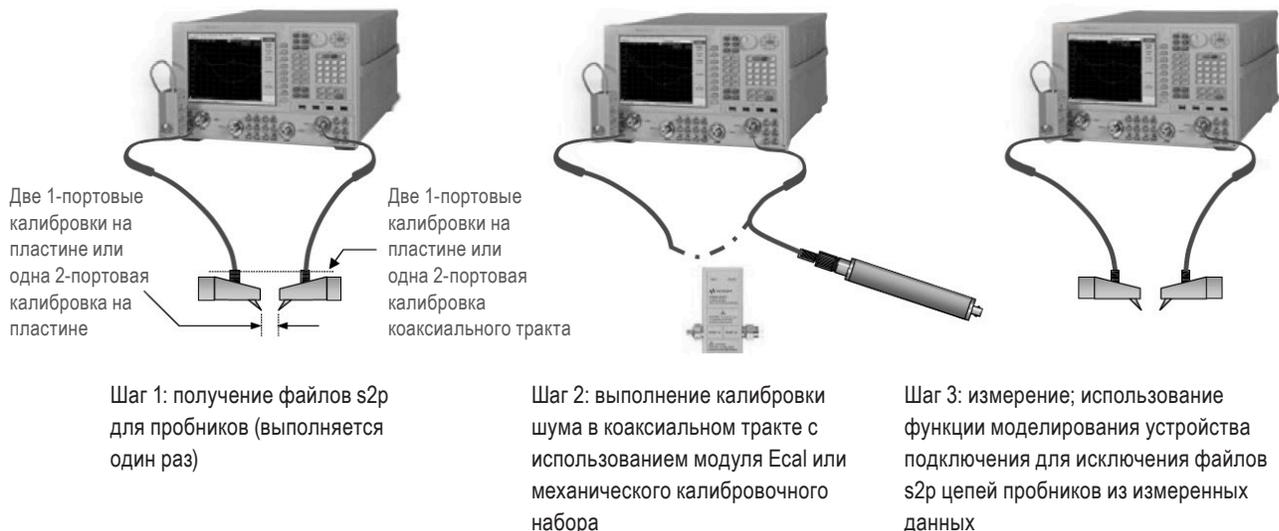


Рисунок 7 - Исключение цепей пробников зондовой станции представляет собой другой способ получения калиброванных результатов измерений.

Использование функции исключения цепей

В данном примере калибровка коэффициента шума производится исключительно с помощью коаксиальных мер, а цепи пробников (зондов) зондовой станции математически исключаются из результатов последующих измерений с использованием функции моделирования устройства подключения анализатора цепей серии PNA-X. На рисунке 7, который иллюстрирует данный процесс, состоящий из трёх шагов, показан источник шума; однако вместо него можно использовать преобразователь мощности.

Шаг 1 данного процесса заключается в получении S-параметров пробников

Использование функции исключения цепей (продолжение)

зондовой станции. Это может сделать, если сначала выполнить калибровку на конце коаксиального кабеля, а затем добавить пробник и выполнить калибровку на пластине. Используя эти два набора калибровочных коэффициентов, можно определить S-параметры пробника. Этот шаг выполняется только один раз для каждого пробника.

Затем выполняется калибровка шума в коаксиальном тракте. Фактическое число шагов зависит от выбранного калибровочного набора и типов соединителей. При измерениях ИУ используется функция моделирования устройства подключения для математического исключения цепей на каждом измерительном порте. Вам потребуется определить файлы s2p, соответствующие пробникам зондовой станции, используемым на каждом порте.

Сравнение реальных результатов, полученных с использованием мастера калибровки Cal Wizard

Два примера, приведённые ниже, покажут, как эти методы улучшают точность измерений на пластине. В первом примере использовался анализатор цепей N5245A серии PNA-X с диапазоном частот до 50 ГГц и автоматическая зондовая станция для измерения параметров одного несогласованного полевого транзистора. На рисунках 8a и 8b показаны два набора графиков: на верхних графиках использовалась скалярная калибровка шума, а на нижних - векторная калибровка шума и встроенный тюнер.

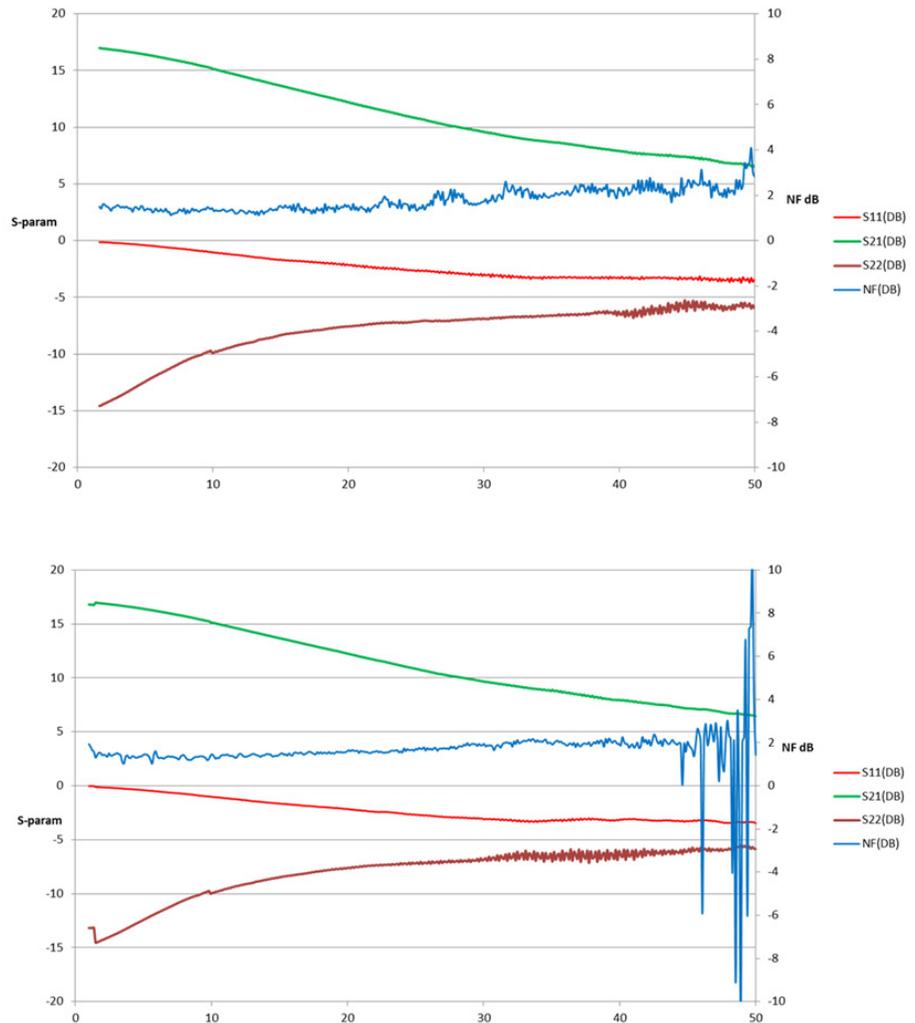


Рисунок 8a и 8b - В сравнении со скалярной калибровкой шума (вверху) векторная калибровка шума снижает неравномерность характеристики, имеющей вид пульсаций, при измерениях коэффициента шума (NF) (графики синего цвета).

Сравнение реальных результатов, полученных с использованием мастера калибровки Cal Wizard (продолжение)

При использовании скалярной калибровки наблюдается некоторая неравномерность измеренной характеристики коэффициента шума, имеющая вид пульсаций, из-за неполного согласования в источнике. При использовании векторной калибровки пульсации снижаются примерно до 45 ГГц, но затем резко увеличиваются в диапазоне частот от 45 до 50 ГГц. В данной конфигурации испытательной системы использовались недорогие кабели, и наиболее вероятно, что именно они привели к тем проблемам, которые проявились в результатах измерения коэффициента шума (NF) (график синего цвета) и параметра S11 (график красного цвета).

Те же самые измерения были сделаны с использованием другой установки зондового

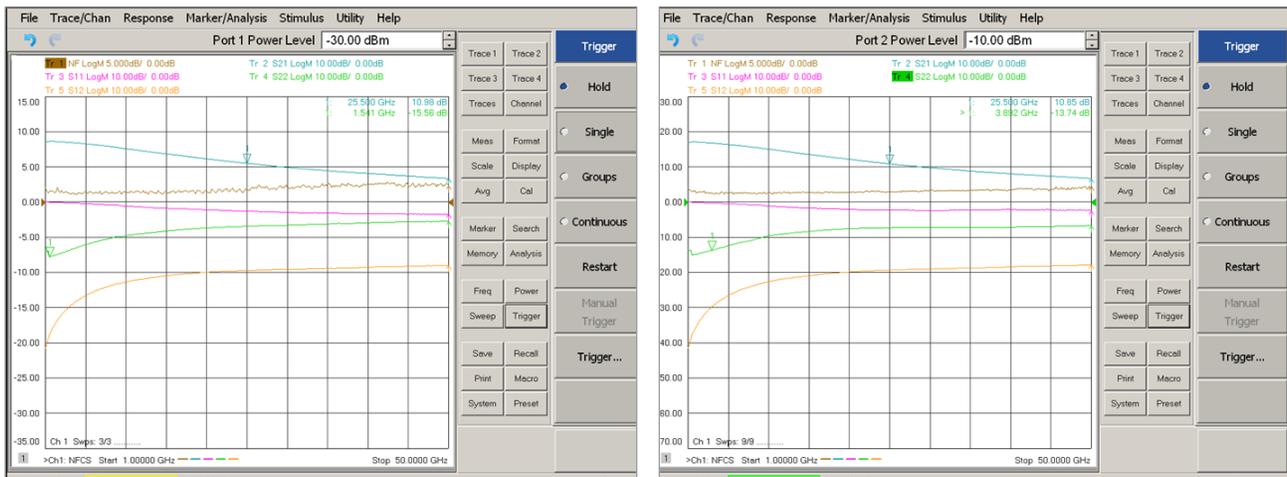


Рисунок 9 - Использование высококачественных кабелей и векторного анализатора цепей с лучшим коэффициентом шума позволяет получить точные, без пульсаций, результаты измерений с помощью векторной калибровки шума (графики, расположенные справа).

контроля, оснащённой анализатором цепей N5247A серии PNA-X с диапазоном частот до 67 ГГц, которая имеет коэффициент шума на частоте 50 ГГц на 2 дБ лучше, чем N5245A. Между анализатором цепей серии PNA-X и пробниками зондовой станции использовались более короткие и качественные кабели. Такое сочетание улучшения коэффициента шума, снижения потерь и повышения стабильности характеристик кабелей приводит к превосходным результатам с использованием векторной калибровки шума и встроенного тюнера, как показано на рисунке 9 справа. Как и в предыдущем случае, левые графики были получены с использованием скалярной калибровки шума, и поэтому график измерения коэффициента шума содержит пульсации; правые графики были получены с использованием векторной калибровки шума, и пульсации были устранены.

Использование внешнего тюнера

Измерения на пластине обычно проводятся на несогласованных устройствах, которые очень чувствительны к согласованию в источнике. Хотя векторная калибровка шума способна преодолеть эту проблему, дополнительные потери, вносимые кабелями и пробниками на порте 1, могут расширить диапазон значений импедансов, воспроизводимых для ИУ. Это может стать причиной выбросов там, где алгоритм векторной калибровки шума не может найти правильное решение для коэффициента шума при 50-омном согласовании. Данную проблему можно исправить путём использования более качественных кабелей на измерительном порте. Если в данной конфигурации уже используются кабели хорошего качества, то для исключения выбросов могут быть использованы более сложные конфигурации установок зондового

Использование внешнего тюнера (продолжение)

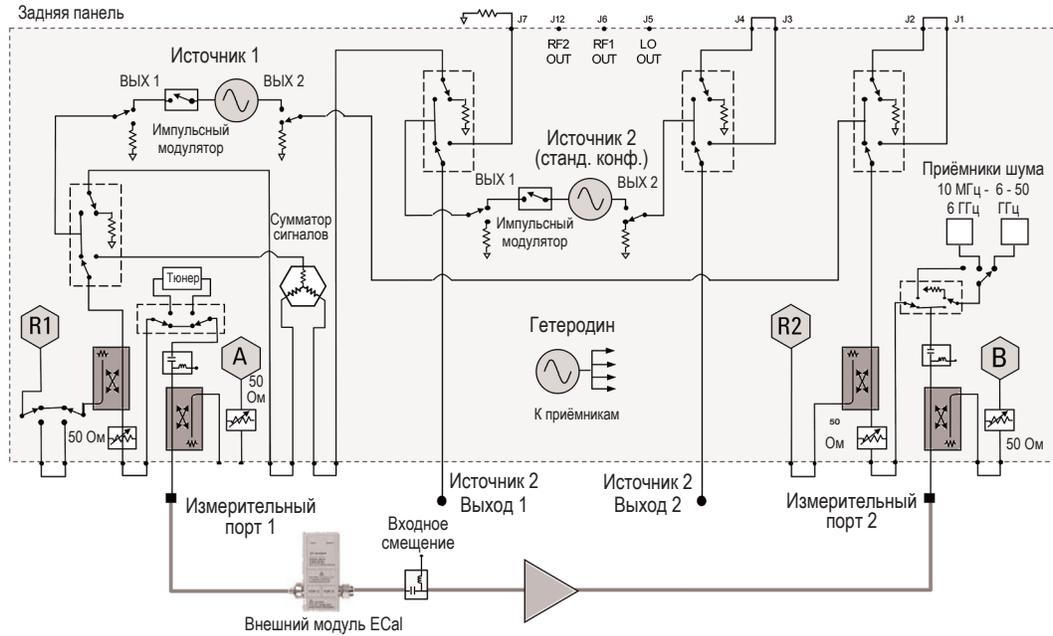


Рисунок 10 - Данная конфигурация с внешним тюнером и цепью подачи смещения помогает решить проблемы, связанные с потерями в кабелях, и позволяет провести более эффективную векторную калибровку шума.

КОНТРОЛЬ.

В установке, приведённой в следующем примере, встроенный тюнер анализатора цепей заменён внешним тюнером. Конфигурация, приведённая на рисунке 10, использует внешние цепи подачи смещения и заменяет встроенный тюнер внешним модулем ECal, который помещается как можно ближе к ИУ, чтобы снизить потери в кабеле. Поскольку данная установка воспроизводит более широкий диапазон значений импедансов для ИУ, она обеспечивает более эффективную векторную калибровку шума; однако потери

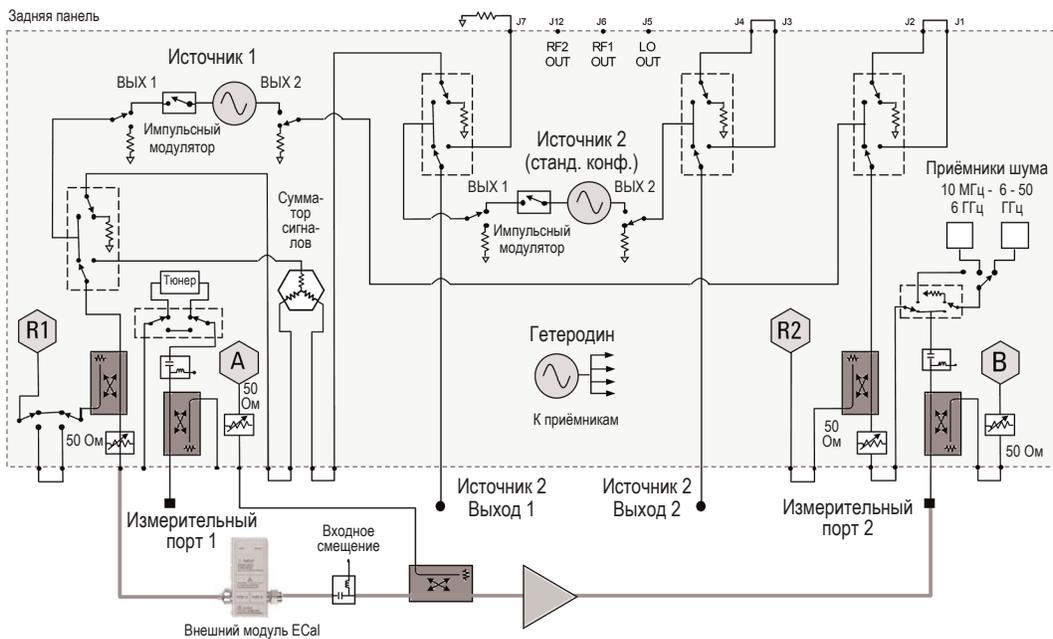


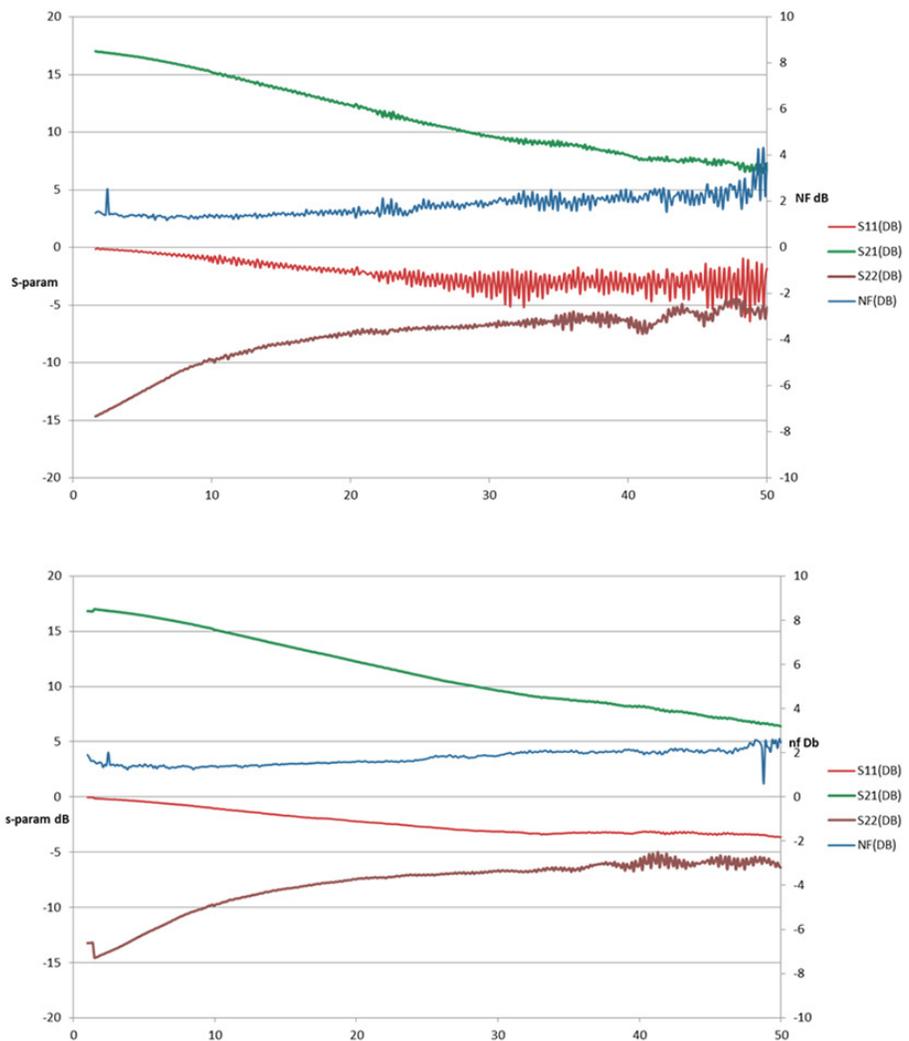
Рисунок 11 - В качестве меры по улучшению использования внешнего модуля ECal для оптимального расширения диапазона импедансов источника можно рассмотреть добавление внешнего направленного ответвителя и расположение его вблизи ИУ, что помогает сохранить нескорректированные характеристики направленности.

в тракте прямой передачи модуля ECal ухудшают нескорректированные характеристики направленности на порте 1 при измерениях S-параметров, делая результаты калибровки менее стабильными с течением времени.

Альтернативный подход представлен на рисунке 11. Помимо внешнего тюнера импеданса (его роль выполняет модуль ECal) и цепи подачи смещения данная установка включает направленный ответвитель, расположенный вблизи ИУ. Эта конфигурация решает проблемы, связанные с потерями в кабелях, и расширяет диапазон значений импедансов, представляемых тюнером, без ухудшения характеристик направленности.

Сравнение реальных результатов, полученных с использованием внешнего тюнера

Два метода для улучшения результатов измерения коэффициента шума, описанные выше, использовались в ранее упомянутых установках зондового контроля. В первой установке



Рисунки 12а и 12b - По сравнению с результатами, приведёнными на рисунке 8b, данные графики, полученные на установке зондового контроля 1, показывают улучшения при измерении S-параметров и коэффициента шума.

добавление внешних компонентов помогло уменьшить, но не исключило полностью выбросы, показанные на рисунке 8b.

Оба набора графиков, показанные на рисунке 12, были получены с использованием векторной калибровки шума. Верхние графики были получены с использованием конфигурации, включающей внешний тюнер и цепь подачи смещения, как показано на рисунке 10; нижние графики были получены с использованием конфигурации, включающей тюнер, цепь подачи смещения и направленный ответвитель, как показано на рисунке 11. Дополнительную выгоду можно было бы получить путём большего усреднения шума, но за счёт увеличения времени измерения. Как и в случае, который обсуждался ранее, более качественные кабели должны ещё в большей степени улучшить результаты.

Для установки зондового контроля 2 эти две конфигурации с внешним тюнером также дают улучшение результатов измерения коэффициента шума (рисунок 13); однако поскольку первоначальные результаты измерений были очень хорошими, эти улучшения не настолько существенны, как в случае с установкой зондового контроля 1. Как показано на рисунке 13, сочетание векторной коррекции шума и одной из конфигураций с внешними компонентами позволяет получить графики с меньшей неравномерностью, чем в случае со встроенным тюнером и скалярной калибровкой шума (график синего цвета) или векторной калибровкой шума (график красного цвета). Результаты, полученные с использованием внешнего направленного ответвителя (график оранжевого цвета), показывают самую меньшую величину джиттера и пульсаций в диапазоне частот от 45 до 50 ГГц.

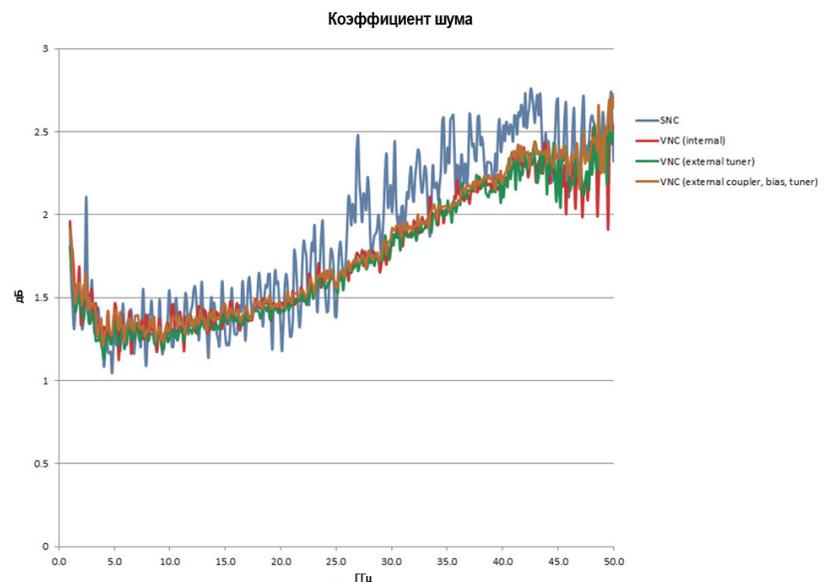


Рисунок 13 - Улучшения очевидны, но они не настолько существенны в случае с установкой зондового контроля 2 отчасти из-за качественных кабелей и хороших характеристик внутреннего тюнера.

Работа в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц

В анализаторах цепей серии PNA-X опциональные малошумящие приёмники и тюнер импеданса работают в диапазоне частот до 50 ГГц. Однако стандартные приёмники, используемые для измерения S-параметров, могут быть использованы для проведения измерений коэффициента шума в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц.

Необходимо сделать два разъяснения, которые мы можем проиллюстрировать, используя структурную схему малошумящего приёмника (рисунок 14). Во-первых, поскольку в стандартных приёмниках отсутствует малошумящий усилитель перед смесителем, характеристики шумовых параметров являются не такими хорошими, как у специализированных малошумящих приёмников. Во-вторых, внеполосный шум может вносить избыточный шум в результаты измерений коэффициента шума, поскольку в стандартных приёмниках также отсутствует блок фильтров перед смесителем.

Работа в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц (продолжение)

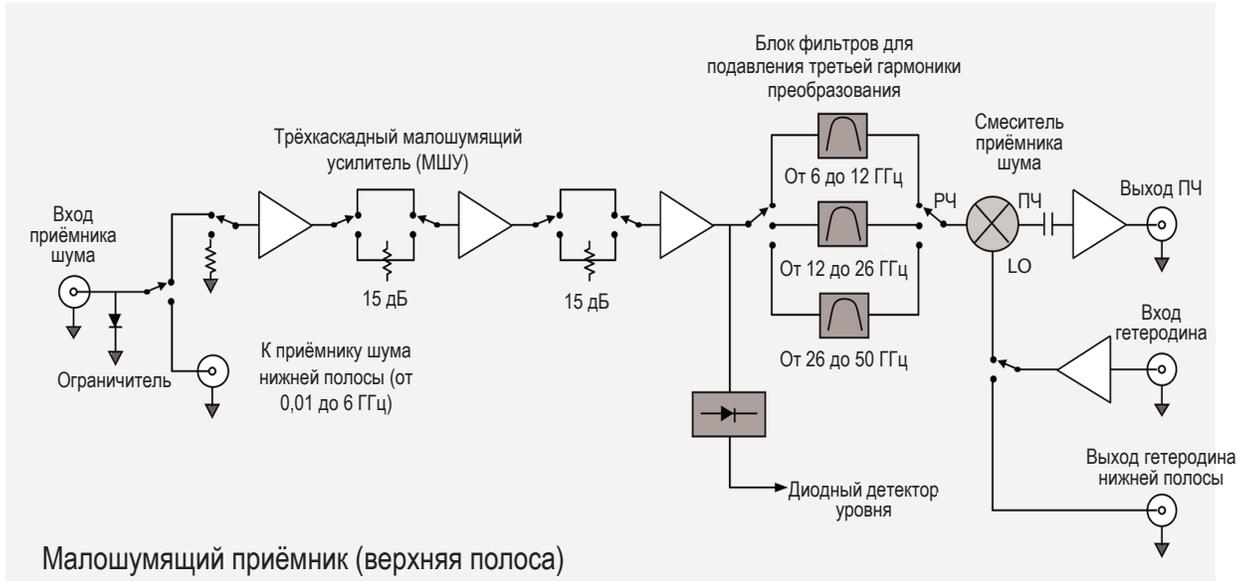


Рисунок 14 - В специализированном малошумящем приёмнике тракт сигнала, ведущий к смесителю, включает малошумящий усилитель блок фильтров.

При использовании стандартного приёмника необходимо также развернуть направленный ответвитель измерительного порта 2 в обратную сторону, при этом прямое плечо и ответвленное плечо меняются местами, за счёт этого чувствительность приёмника увеличивается. Это достигается за счёт снижения мощности порта при измерении обратных S-параметров, но это является хорошим компромиссом для измерений коэффициента шума.

К счастью, эти ограничения можно преодолеть с помощью внешнего оборудования: предусилителя и фильтра. Как показано на рисунке 15, предусилитель и фильтр

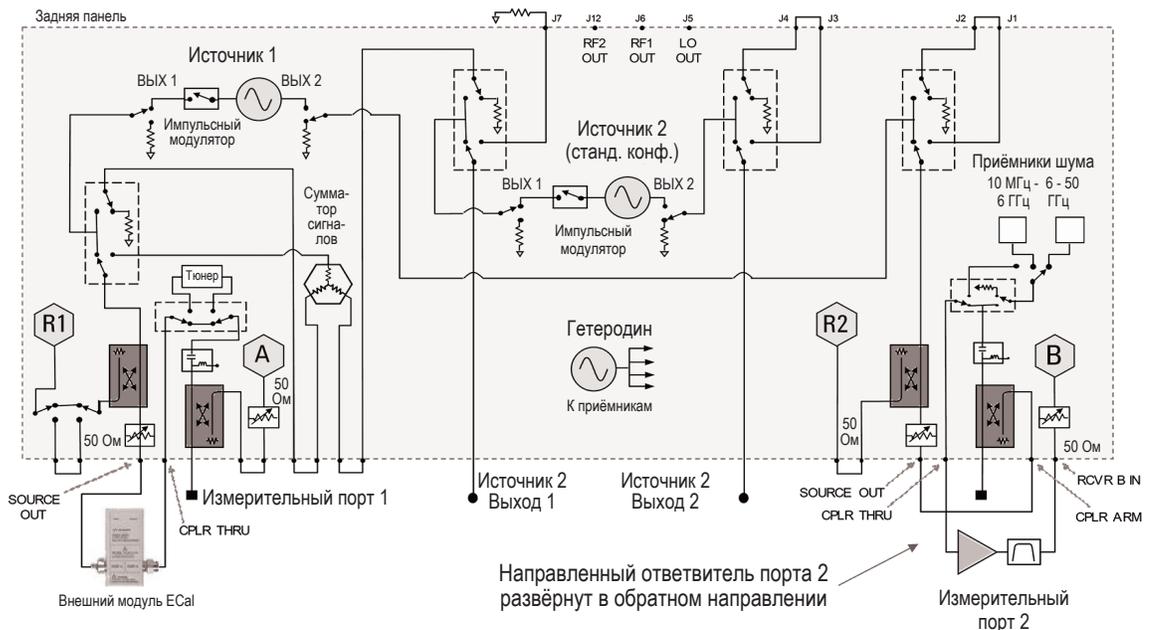


Рисунок 15 - Добавление внешнего предусилителя и фильтра улучшает качество измерений коэффициента шума с использованием стандартных приёмников в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц.

Работа в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц (продолжение)

подключаются к приёмнику напрямую, за счёт чего исключаются потери, которые возникают в направленном ответвителе измерительного порта.

При использовании этой установки заданный уровень мощности сигнала источника, поступающего с выхода измерительного порта 2 будет уменьшен на величину потерь в ответвителе, поскольку теперь сигнал источника проходит через ответвлённое плечо. Заметим также, что сигнал проходит и в обход встроенного тюнера. Для векторной калибровки шума требуется внешний модуль ECal (N4694A), который работает в диапазоне частот до 67 ГГц и имеет соединители 1,85 мм.

Необходимо принять во внимание ещё одно предостережение: высокий коэффициент усиления, обеспечиваемый данной конфигурацией, усложняет калибровку и измерение параметров многих типовых ИУ. С учётом такого большого коэффициента усиления в установке зондового контроля важно предпринять особые меры предосторожности и установить уровни мощности порта достаточно низкими, чтобы предотвратить компрессию предусилителя и приёмника анализатора цепей серии PNA-X во время калибровки и последующих измерений.

Внешний фильтр играет решающую роль в обеспечении хорошего качества измерений коэффициента шума. В анализаторе цепей серии PNA-X для измерений на частотах выше 26,5 ГГц используется смещение на третьей гармонике. Однако преобразование шума происходит также на основной частоте гетеродина, результатом чего является большой вклад внеполосного шума в результаты измерения.

При измерении коэффициента шума с использованием малошумящего приёмника анализатор отфильтровывает шум либо вблизи основной частоты, либо вблизи третьей гармоники, в зависимости от полосы частот. При измерении коэффициента шума с использованием стандартного приёмника внутренняя фильтрация отсутствует. В результате при измерении в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц будет появляться внеполосный шум вблизи основной частоты гетеродина вследствие поступления мощности шума ИУ на исследуемой частоте третьей гармоники, и это будет приводить к нежелательному увеличению величины измеренного коэффициента шума.

При использовании стандартного приёмника в диапазоне частот ниже 26,5 ГГц для подавления шума вблизи третьей гармоники необходим внешний фильтр низких частот или полосовой фильтр. При измерении в диапазоне частот выше 26,5 ГГц для подавления шума вблизи основной частоты гетеродина необходим фильтр верхних частот или полосовой фильтр. При измерениях в полосе частот от 50 до 67 ГГц два коаксиально-волноводных перехода V281A (WR-15) компании подключаются последовательно, образуя превосходный фильтр верхних частот, который подавляет сигналы на частотах ниже 44 ГГц.

Выводы

Не всегда бывает просто получить точные результаты измерения коэффициента шума на пластине: результат зависит от методики измерения и конфигурации измерительного оборудования. Как было указано выше, векторный анализатор цепей способен обеспечить измерение амплитудных и фазовых характеристик как измерительной системы, так и ИУ. Это позволяет достичь высокой точности при использовании метода холодного источника для измерения коэффициента шума усилителей, преобразователей частоты и многих других ИУ.

Снабженный опцией измерения коэффициента шума с полной коррекцией (опция 029), СВЧ-анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает исключительную точность. Ключевым фактором являются методы калибровки, обеспечиваемые СВЧ-анализаторами серии PNA-X. Эти передовые методы позволяют распространить точность измерений вплоть до наконечников пробников (зондов).

Что касается внешнего по отношению к анализатору цепей оборудования, то использование высококачественных кабелей будет способствовать дальнейшему улучшению измерений коэффициента шума. В некоторых случаях, как было проиллюстрировано здесь реальными результатами измерений, использование внешних тюнеров, цепей подачи смещения и ответвителей измерительных портов может в значительной степени снизить джиттер и неравномерность характеристики, имеющей вид пульсаций, при измерениях коэффициента шума на частотах до 50 ГГц.

Для измерений в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц можно использовать стандартные приёмники. Посредством добавления внешнего предусилителя и внешнего фильтра точные результаты могут быть получены во всём диапазоне измерения анализатора цепей серии PNA-X.

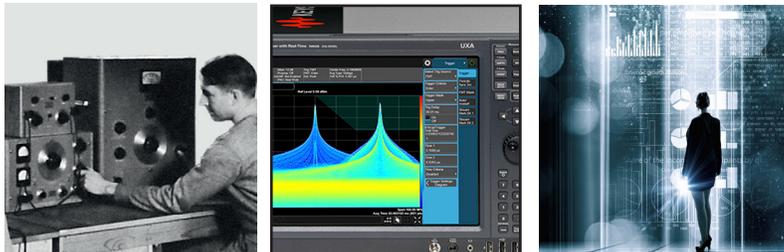
Сопутствующая информация

- Брошюра: Keysight PNA-X Series Microwave Network Analyzers (СВЧ-анализаторы цепей серии PNA-X компании Keysight), номер публикации 5990-4592EN
- Рекомендации по применению 1408-20: High-Accuracy Noise Figure Measurements Using the PNA-X Series Network Analyzer (Высокоточные измерения коэффициента шума с использованием анализаторов цепей серии PNA-X), номер публикации 5990-5800EN
- Руководство по выбору: Noise Figure Selection Guide: Minimizing the Uncertainties (Руководство по выбору анализатора коэффициента шума: минимизация погрешностей измерения), номер публикации 5989-8056EN
- Руководство по конфигурированию: Keysight PNA Family Microwave Network Analyzers (СВЧ-анализаторы цепей семейства PNA компании Keysight), номер публикации 5990-7745EN

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированная подборка только нужной вам информации.

http://www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомлениям о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

www.keysight.com/find/ad

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

(BP-16-10-14)



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.

Сертифицировано DEKRA на соответствие стандарту ISO 9001:2015

Система управления качеством