

Keysight Technologies
Основы измерения
коэффициента шума
в радиочастотном и
микроволновом диапазонах

Заметки по
применению

Содержание

1. Что такое коэффициент шума?	3
Введение	3
Важное значение шума в системах связи	4
Источники шума.....	5
Понятие коэффициента шума	6
Коэффициент шума и шумовая температура	7
2. Шумовые характеристики двухпортовых цепей	8
Коэффициент шума многокаскадных систем.....	8
Коэффициент передачи и рассогласование	9
Шумовые параметры.....	9
Влияние ширины полосы	10
3. Измерение коэффициента шума	11
Линейность мощности шума.....	11
Источники шума.....	11
Метод Y фактора	12
Метод генератора сигналов с удвоением мощности	13
Метод прямого измерения шума.....	13
Коррекция коэффициента шума и коэффициента передачи	14
Флуктуации.....	14
Преобразователи частоты.....	15
Потери	15
Шумы гетеродина	15
Просачивание сигнала гетеродина.....	15
Нежелательные отклики	15
Приборы для измерения коэффициента шума	16
Анализаторы коэффициента шума.....	16
Анализаторы сигналов/спектра	16
Анализаторы цепей	17
Установки для измерения шумовых параметров	17
Измерители мощности и вольтметры истинного среднеквадратического значения	17
4. Глоссарий	18
5. Литераура	28
6. Дополнительные ресурсы, литература и програмные средства, предоставляемые компанией Keysight	30

Раздел 1.

Что такое коэффициент шума?

Введение

Современные радиоприёмные системы часто должны обрабатывать очень слабые сигналы, однако шумы, вносимые компонентами системы, стремятся замаскировать эти слабые сигналы. Чувствительность, коэффициент битовых ошибок (BER) и коэффициент шума представляют параметры системы, которые характеризуют её способность обрабатывать сигналы низкого уровня. Среди этих параметров коэффициент шума является уникальным, поскольку он позволяет характеризовать не только систему в целом, но и её компоненты, такие как предусилитель, смеситель и усилитель ПЧ. Управляя коэффициентом шума и коэффициентом передачи компонентов системы, разработчик тем самым непосредственно управляет коэффициентом шума всей системы. Когда коэффициент шума известен, зная полосу пропускания, легко оценить чувствительность системы. Коэффициент шума часто является ключевым параметром, который отличает одну систему от другой, один усилитель от другого и один транзистор от другого. Такое широко распространённое применение характеристик коэффициента шума означает, что во взаимоотношениях между поставщиком и покупателем изделий очень важны измерения с высокой точностью и повторяемостью.

Измерение шумовых свойств цепей необходимо для того, чтобы минимизировать проблему шума в приёмных системах. Один из способов преодоления этой проблемы сделать слабый сигнал сильным. Это можно выполнить путём увеличения мощности сигнала, передаваемого в направлении приёмника, или путём увеличения уровня мощности, захватываемого приёмной антенной, например, увеличением апертуры антенны. Увеличение коэффициента усиления антенны, что обычно связано с увеличением её размеров, и увеличение мощности передатчика в конечном счёте ограничиваются правительственными регламентами, техническими или экономическими соображениями. Другой способ состоит в снижении уровня шума, создаваемого внутри узлов приёмника. Измерение уровня шума является ключом, дающим уверенность в том, что добавочный шум минимален. Когда шум соединяется с сигналом, компоненты приёмника уже не могут отделить шум в полосе частот сигнала от его полезной части. Сигнал и шум подвергаются обработке вместе. Последующее увеличение уровня сигнала, например, с помощью усиления, настолько же увеличит и уровень шума.

Данные заметки по применению являются частью серии статей, посвящённых измерению шума. Многие из того, что здесь обсуждается, представляет либо материал общего характера для большинства измерений коэффициента шума, либо учебный материал. Он должен оказаться полезным в качестве учебного пособия по измерениям коэффициента шума. Необходимость в точных, с высокой повторяемостью, и содержательных измерениях шума без сложных ручных измерений и вычислений привело к разработке приборов для измерения коэффициента шума с простым интерфейсом пользователя. Пользование этими приборами не требует высокой квалификации в области теории шума. Однако небольшой уровень подготовки может оказаться полезным для формирования уверенности и правильного понимания более сложной картины шумов в радиочастотных и микроволновых системах. Другая литература, содержащая дополнительные сведения об измерении коэффициента шума, указана в тексте этой брошюры номерами в квадратных скобках [], которые соответствуют номерам списка литературы, приведённым в разделе "Литература". Литература компании Keysight по этому вопросу и интернет ресурсы приведены далее в этих заметках по применению.



Анализатор шумов (NFA) упрощает измерение коэффициента шума

Важное значение шума в системах связи

Отношение сигнал/шум (S/N) на выходе приёмной системы является очень важным критерием в системах связи. Трудность опознавания или прослушивания радиосигналов в присутствии шумов обычно познаётся на опыте. Возможность интерпретации звуковой информации связана с трудностью количественной оценки, поскольку это зависит от таких человеческих факторов как хорошее знание языка, усталость, натренированность, опыт и характер сообщения. Коэффициент шума и чувствительность могут быть измерены и иметь объективную количественную оценку. Коэффициент шума и чувствительность тесно связаны (см. термин "Чувствительность" в глоссарии). Для цифровых систем связи в качестве количественной меры надёжности часто используется коэффициент битовых ошибок (BER) или вероятность появления битовой ошибки $P(e)$. Коэффициент битовых ошибок нелинейно связан с коэффициентом шума. Например, при постепенном уменьшении отношения сигнал/шум BER резко возрастает вблизи уровня шума, где 1 и 0 приобретают беспорядочный характер. Коэффициент шума характеризует работоспособность системы, тогда как BER показывает, является ли система действующей или неработоспособной. Рисунок 1.1, на котором приведены кривые зависимости вероятности ошибки от отношения несущая/шум для нескольких видов цифровой модуляции, показывает, что BER изменяется на несколько порядков при изменении отношения сигнал/шум всего на несколько децибел

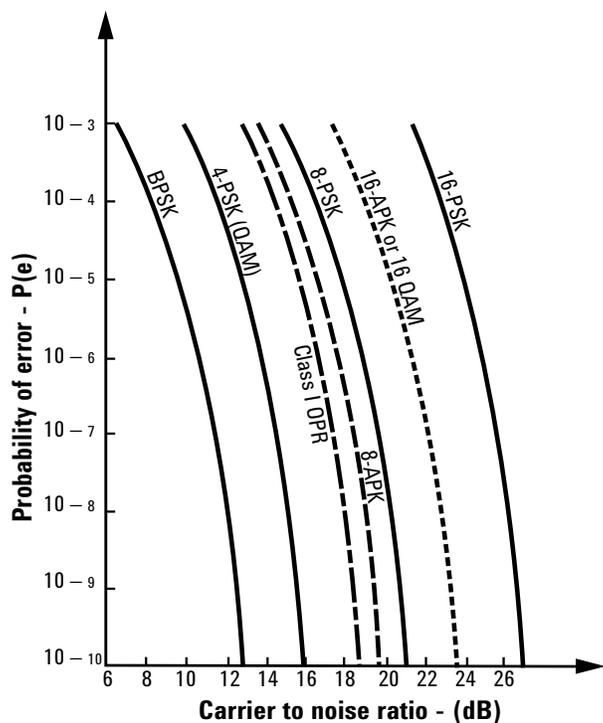


Рисунок 1.1 Вероятность битовой ошибки, $P(e)$, в зависимости от отношения несущая/шум (которое может интерпретироваться как отношение сигнал/шум) для различных видов цифровой модуляции. По данным Kamillo Feher, DIGITAL COMMUNICATIONS: Microwave Application, 1981, стр. 71. С разрешения Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs. NJ

Отношение сигнал/шум на выходе зависит от двух вещей — от отношения сигнал/шум на входе и коэффициента шума данного устройства. В наземных системах отношение сигнал/шум на входе зависит от мощности передатчика, коэффициента усиления передающей антенны, коэффициента передачи атмосферы, температуры атмосферы, коэффициента усиления приёмной антенны и коэффициента шума приёмника. Снижение коэффициента шума приёмника оказывает такое же влияние на отношение сигнал/шум на выходе, как и улучшение любого другого параметра.

В спутниковых системах коэффициент шума может быть особенно важен. Рассмотрим пример снижения коэффициента шума направленного широкополосного спутникового приёмника (DBS). Одним из путей улучшения коэффициента шума приёмника является увеличение мощности передатчика, однако это может оказаться очень дорого. Более приемлемой альтернативой может быть существенное улучшение характеристик малошумящего усилителя приёмника (LNA), Это проще, чем увеличивать мощность передатчика.



Направленный широкополосный спутниковый приёмник

На производственной линии, выпускающей спутниковые приёмники, может оказаться достаточно просто уменьшить коэффициент шума на 1 дБ настройкой импеданса или более тщательным подбором определённых транзисторов. Снижение коэффициента шума на 1 дБ даёт приблизительно такой же эффект, как увеличение диаметра антенны на 40 %. Но увеличение диаметра антенны потребовало бы изменения её конструкции и значительного увеличения стоимости самой антенны и её несущей структуры.

Иногда шум оказывается важным параметром передатчика. Например, если на базовой станции используется линейный широкополосный усилитель мощности, избыточный широкополосный шум может ухудшить отношение сигнал/шум в соседнем канале и ограничить эффективность работы системы. Коэффициент шума усилителя мощности можно измерить, чтобы удостовериться в его качестве, которое обеспечило бы приемлемый уровень шума усилителя, прежде чем устанавливать его в систему.

Источники шума

Шум, уровень которого может быть измерен, порождается спонтанными флуктуациями, вызванными обычным явлением в электрическом оборудовании. Тепловой шум возникает в результате колебаний электронной и дырочной проводимостей из-за их конечной температуры. Некоторые из этих колебаний имеют спектр, лежащий в интересующей полосе частот, и вносят шум в полезные сигналы. Спектр теплового шума приблизительно равномерен в полосе радиочастотного и микроволнового диапазонов. Мощность теплового шума на согласованной нагрузке равна kTB ватт, где k - постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К), T - температура в градусах Кельвина, B - шумовая полоса системы. Доступная (номинальная) мощность не зависит от импеданса источника. Номинальная мощность на согласованной нагрузке прямо пропорциональна ширине полосы, поэтому удвоение ширины полосы приведёт к удвоению мощности, развиваемой на нагрузке (см. термин "Тепловой шум" в глоссарии).

Дробовый шум возникает из-за дискретной природы протекающего тока (см. термин "Дробовый шум" в глоссарии). Другие хаотические явления, связанные с дискретной природой материи, также вызывают шум, подобный дробовому. Примерами таких явлений могут быть генерация и рекомбинация пар дырка/электрон в полупроводниках (G - R шум) и разделение эмиттерного тока между базой и коллектором в транзисторах (шум декомпозиции). Характеристики этих шумов подобны характеристикам тепловых шумов; частотный спектр в основном равномерен, что

создаёт одинаковую спектральную плотность мощности во всём радиочастотном и микроволновом диапазонах.

В электрических устройствах имеется много причин, вызывающих случайные шумы. При определении характеристик шума обычно ссылаются на комбинированное влияние всех причин, связанных с компонентами. Это комбинированное влияние часто относят к тому, как если бы это было вызвано тепловым шумом. Рассмотрение устройства как имеющего определённую шумовую температуру не означает, что такова физическая температура компонент, а просто, что их мощность шума эквивалентна мощности теплового источника с такой температурой. Хотя шумовая температура прямо не связана с физической температурой, зависимость от температуры может иметь место. Некоторые очень малые коэффициенты шума могут быть достигнуты, когда устройство охлаждено до температуры ниже окружающей среды.

Шумы, как они рассматриваются в данных заметках по применению, не учитывают влияния человеческого фактора, хотя такое влияние очень важно учитывать при приёме слабых сигналов. Эти заметки по применению не имеют отношения к шумам от систем зажигания, искр или от нежелательного сбора ложных побочных сигналов. Не касается эта работа и беспорядочных возмущений, подобных электромагнитным бурям в атмосфере. Проблемы таких помех обычно решаются техническими приёмами - изменением местоположения, фильтрацией и надлежащим экранированием. Тем не менее, эти источники помех важны здесь в том смысле, что они мешают измерению спонтанных шумов, которых касается данная работа. У производителей малошумящих усилителей могут возникнуть трудности с измерением коэффициента шума, поскольку обычно вблизи располагается базовая станция, излучающая ВЧ мощность на тех же частотах, которые они используют для своих высокочувствительных измерений. По этой причине точные измерения коэффициента шума часто выполняются в экранированных комнатах.

Понятие коэффициента шума

Наиболее фундаментальное определение коэффициента шума появилось и стало популярным в 1940 году, когда Harold Friis [8] определил коэффициент шума F цепи как отношение относительной мощности сигнал/шум на входе цепи к относительной мощности сигнал/шум на выходе цепи.

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad (1-1)$$

Таким образом, коэффициент шума цепи характеризует уменьшение или ухудшение отношения сигнал/шум при прохождении сигнала через эту цепь. Идеальный усилитель усиливает бы шум на его входе вместе с сигналом, поддерживая одинаковое отношение сигнал/шум на входе и выходе (источником шума на входе часто является тепловой шум, связанный с температурой поверхности земли или с потерями в системе). Однако реальный усилитель вносит некоторый дополнительный шум от его собственных компонентов и ухудшает отношение сигнал/шум. Низкий коэффициент шума означает, что цепь вносит очень небольшой шум. Понятие коэффициента шума подходит только для цепей (имеющих по крайней мере одну входную и одну выходную порты), обрабатывающих сигналы. В этих заметках по применению рассматриваются главным образом двухпортовые цепи; хотя смесители вообще являются трёхпортовыми устройствами, они обычно рассматриваются как двухпортовые с гетеродином, подключенным к третьему порту.

Имеет смысл упомянуть, что не может характеризовать коэффициент шума. Он не является показателем качества цепей с одним портом, оконечных устройств или генераторов. Генераторы имеют свои собственные показатели качества, такие как "отношение несущая/шум" и "фазовый шум". Однако шум приёмного устройства, содержащийся в боковых полосах сигнала гетеродина, возбуждающего смеситель, может быть добавлен смесителем. Этот добавочный шум увеличивает коэффициент шума приёмника.

Модуляция или демодуляция никак не влияет на коэффициент шума. Он не зависит от формата модуляции и от точности работы модуляторов и демодуляторов. Поэтому коэффициент шума представляет более общее понятие, чем подавление шума, используемое как показатель чувствительности ЧМ приёмников, или чем BER в цифровой связи.

Коэффициент шума следует понимать как параметр, отдельный от коэффициента передачи. Когда шум наложен на сигнал, последующий усилитель усиливает сигнал и шум вместе и не изменяет отношение сигнал/шум.

На рисунке 1.2а показана примерная ситуация на входе усилителя. Изображённый сигнал на 40 дБ выше шумового порога. На рисунке 1.2б показана ситуация на выходе усилителя. Коэффициент передачи усилителя повышает уровень сигнала на 20 дБ. Уровень входного шума также увеличивается на 20 дБ, но при этом добавляется собственный шум усилителя. Теперь выходной сигнал только на 30 дБ выше шумового порога. Ухудшение отношения сигнал/шум на 10 дБ означает, что усилитель имеет коэффициент шума 10 дБ.

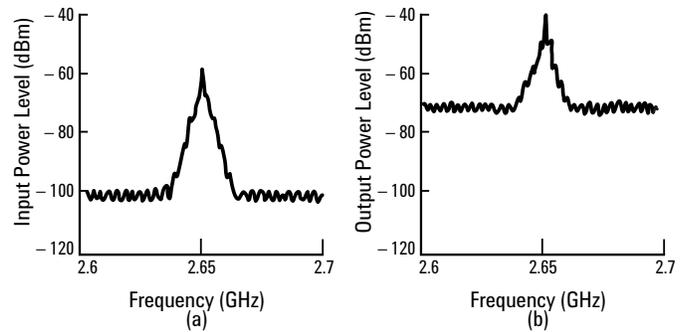


Рисунок 1.2 - Типичные уровни сигнала и шума в зависимости от частоты на входе усилителя (а) и на его выходе (б). Обратите внимание, что уровень шума вырос больше, чем уровень сигнала из-за дополнительного шума от усилителя. Это относительное повышение уровня шума выражается коэффициентом шума усилителя.

Обратите внимание, что если уровень сигнала на входе был бы на 5 дБ ниже (на 35 дБ выше шумового порога), на выходе он был бы тоже на 5 дБ ниже (на 25 дБ выше шумового порога), и коэффициент шума был бы по-прежнему 10 дБ. Таким образом, коэффициент шума не зависит от уровня входного сигнала.

Теперь будет рассмотрен более тонкий эффект. Ухудшение отношения сигнал/шум в цепи зависит от температуры источника, который возбуждает цепь. Это можно доказать с помощью вычисления коэффициента шума F , где S_i и N_i представляют уровни сигнала и шума на входе испытываемого устройства (ИУ), а S_o и N_o - уровни сигнала и шума на выходе; N_a - добавочный шум от ИУ, G - коэффициент передачи ИУ.

$$\begin{aligned} F &= \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \\ &= \frac{S_i/N_i}{GS_i/(N_a + GN_i)} \\ &= \frac{N_a + GN_i}{GN_i} \end{aligned} \quad (1-2)$$

Уравнение (1.2) показывает зависимость коэффициента шума от уровня шума на входе N_i . Уровень шума на входе обычно определяется тепловым шумом источника и равен kT_oB . Friis [8] предложил принять опорную температуру источника равной 290 К (обозначена T_o), которая эквивалентна 16,8 °C и 62,3 °F. Эта температура близка к средней температуре, которую имеет приёмная антенна, направленная через атмосферу на передающую антенну.

Кроме того, спектральная плотность мощности kT_0 равномерна в полосе частот и равна $4,00 \times 10^{-21}$ ватт на герц (-174 дБм/Гц). IRE (предшественник IEEE) выбрал температуру 290 К в качестве стандартной для определения коэффициента шума [7]. Тогда уравнение (1.2) принимает вид:

$$F = \frac{N_a + kT_0BG}{kT_0BG} \quad (1-3)$$

Это является определением коэффициента шума, принятым IRE.

В общем случае коэффициент шума является функцией частоты, но обычно не зависит от ширины полосы (пока полоса измерения достаточно узкая, чтобы обеспечить разрешение вариаций, происходящих при изменении частоты). Каждая из мощностей шума N_a и N_i в уравнении (1.2) пропорциональна ширине полосы. Но ширина полосы в числителе формулы (1.3) сокращается с её значением в знаменателе - в результате коэффициент шума оказывается независимым от ширины полосы.

В итоге, коэффициент шума испытываемого устройства характеризует ухудшение отношения сигнал/шум, когда сигнал проходит через испытываемое устройство. Особый уровень входного шума для определения степени ухудшения отношения сигнал/шум соответствует температуре источника 290 К. Коэффициент шума ИУ не зависит от уровня сигнала, пока ИУ работает в линейном режиме (линейная зависимость мощности на выходе от мощности на входе).

Стандартным определением коэффициента шума по IEEE является уравнение (1.3). Оно устанавливает, что коэффициент шума представляет отношение полной мощности шума на выходе к той его части, которая обусловлена шумом на входе, когда температура источника входного шума 290 К.

Величину F в уравнении (1.3) часто называют "коэффициент шума" (noise figure), но более часто её называют "шум - фактор" (noise factor), или иногда "коэффициент шума в линейных единицах" (noise figure in linear terms). Современное употребление термина "коэффициент шума" обычно резервируется для величины NF , выраженной в децибелах:

$$NF = 10 \log F \quad (1-4)$$

Это условное обозначение используется в остальной части данной работы.

Коэффициент шума и шумовая температура

Иногда для описания шумовых характеристик устройства вместо коэффициента шума (NF) используется "эффективная температура входного шума", T_e . Довольно часто единицы температуры используются для устройств, применяемых в спутниковых приёмниках. T_e эквивалентна температуре импеданса источника в идеальном (безшумовом) устройстве, который создавал бы такой же добавочный шум, N_a . Величина T_e часто определяется формулой:

$$T_e = \frac{N_a}{kGB} \quad (1-5)$$

Она может быть связана с шум-фактором F следующим соотношением:

$$T_e = T_0(F-1), \quad \text{где } T_0 = 290 \text{ К} \quad (1-6)$$

Уровень входного шума, присутствующего в наземных СВЧ и микроволновых системах связи, часто близок к опорной температуре 290 К, используемой при вычислениях коэффициента шума, обусловленного температурой поверхности земли. Когда это имеет место, изменение коэффициента шума на 3 дБ даст в результате изменение на 3 дБ отношения сигнал/шум.

В спутниковых приёмниках уровень шума, приходящего от антенны, может быть значительно меньше, будучи ограничен боковым лепестком излучения и фоновой температурой неба до значений часто ниже 100 К. В этих случаях изменение коэффициента шума приёмника на 3 дБ может дать в результате изменение отношения сигнал/шум много больше чем на 3 дБ. Пока характеристики системы могут быть вычислены с использованием коэффициента шума без каких либо погрешностей (не требуется соответствия опорной температуры 290 К фактической температуре), разработчики системы могут предпочесть использование T_e в качестве параметра системы.

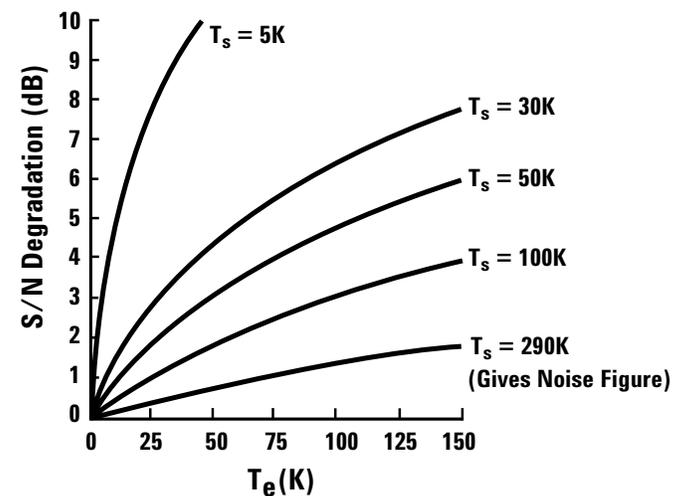


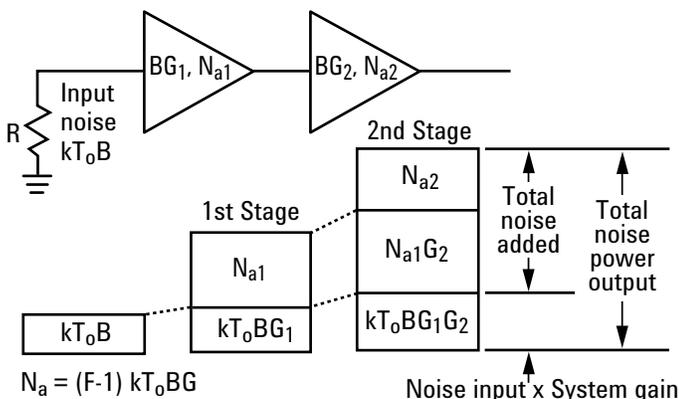
Рисунок 1.3 Ухудшение отношения сигнал/шум устройства в зависимости от T_e для различных значений температуры импеданса источника. Коэффициент шума определяется для температуры источника 290 К.

Раздел 2. Шумовые характеристики двухпортовых цепей

Коэффициент шума многокаскадных систем

Определение коэффициента шума, рассмотренное в разделе 1, может применяться как к отдельным компонентам, таким как одностранзисторный усилитель, так и к системе в целом, такой как приёмник. Общий коэффициент шума системы может быть вычислен, если известны индивидуальные коэффициенты шума и коэффициенты передачи компонентов системы. Чтобы найти коэффициент шума каждого компонента, должен быть найден внутренний шум N_a , добавляемый каждым каскадом. Коэффициент передачи тоже должен быть известен. Практические методы, используемые для определения коэффициента шума и коэффициента передачи, рассмотрены в разделе 3 "Измерение коэффициента шума". Основные соотношения между отдельными компонентами и системой будут обсуждаться в этом разделе.

Рисунок 2.1 - Влияние вклада второго каскада



Для двух каскадов (рисунок 2.1) шум на выходе состоит из шума источника kT_0B , умноженного на общий коэффициент передачи системы G_1G_2 , выходного шума первого усилителя N_{a1} , усиленного вторым каскадом G_2 , и выходного шума второго усилителя N_{a2} . Вклады мощностей шума могут суммироваться, так как они некоррелированы. Используя уравнение (1.3) для выражения индивидуальных шумовых вкладов усилителей, выходной шум можно выразить через их шум факторы F :

$$N_o = kT_0BG_1G_2 \left[F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \right] \quad (2-1)$$

При известном шуме на выходе коэффициент шума комбинации из обоих усилителей может быть вычислен по уравнению (1.1). Это и будет общий коэффициент шума системы для этого примера с двумя каскадами.

$$F_{sys} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \quad (2-2)$$

Член $(F_2 - 1)/G_1$ часто называется вкладом второго каскада. Можно видеть, что при высоком усилении первого каскада шумовой вклад второго каскада мал. По этой причине коэффициент передачи предусилителя является важным параметром приёмника. Если коэффициент передачи и общий шум фактор системы известны, из уравнения (2.2) можно найти F_1 . Это служит основой для правильных измерений шума и обсуждается в следующем разделе. Это вычисление можно распространить на n -каскадное устройство и выразить следующим образом:

$$F_{sys} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (2-3)$$

Уравнение (2.3) часто называют уравнением каскадного шума.

Коэффициент передачи и рассогласование

Коэффициент передачи устройства является важным параметром для вычислений шума. Когда в этих вычислениях используется мощность на входе kT_0B , это есть номинальная мощность, максимум которой может быть получен на согласованной нагрузке. Если устройство имеет по входу большое рассогласование (что не является необычным для малошумящих усилителей), фактическая мощность, поступающая в устройство, будет меньше. Если коэффициент передачи устройства определяется как отношение фактической мощности, поступающей в нагрузку, к максимальной мощности, получаемой от источника, можно не учитывать потери рассогласования, присутствующие на входе устройства, так как они учитываются в определении коэффициента передачи. Такое определение называется коэффициентом передачи преобразователя, G_T . Однако при каскадном включении устройств ошибки рассогласования возрастают, если входной импеданс устройства отличается от импеданса нагрузки. В этом случае общий коэффициент передачи каскадно включённых устройств не равен произведению коэффициентов передачи отдельных каскадов.

Действительный коэффициент передачи, G_A , который часто даётся как параметр транзистора, представляет усиление, получающееся, когда данная проводимость источника, Y_S , возбуждает устройство, а выход согласован с нагрузкой. Это часто используется при проектировании усилителей. Более полное описание различных определений коэффициента передачи приведено в глоссарии.

Для заданной или измеренной оценки коэффициента передачи в 50-омных системах наиболее часто используется вносимое усиление, G_i , или коэффициент прямой передачи, $(S_{21})^2$. Если измерительная система имеет малые коэффициенты отражения, а испытуемое устройство имеет хорошее согласование по выходу, применение уравнения для коэффициента шума каскадного включения (2.3) к реальным системам не даст большой ошибки. Если устройство имеет не очень хорошее согласование по выходу, или измерительная система имеет существенные ошибки рассогласования, между вычисленной характеристикой и характеристикой реальной системы появится расхождение. Например, если выходной импеданс первого каскада отличается от 50-омного импеданса источника, который используется при определении коэффициента шума второго каскада, шум, создаваемый во втором каскаде, может измениться. К счастью шумовой вклад второго каскада уменьшается благодаря усилению первого каскада, поэтому во многих случаях ошибки, обусловленные влиянием второго каскада, минимальны. Когда первый каскад имеет низкое усиление (G^2F_2), ошибки второго каскада могут стать значительными. Полный анализ влияния рассогласования при вычислении коэффициента шума довольно длителен и в общем случае требует понимания зависимости коэффициента шума от импеданса источника. Это влияние в совокупности с влиянием рассогласования коэффициентов передачи будет обсуждаться в следующем подразделе "Шумовые параметры". Следствием этой зависимости коэффициента шума является то, что коррекция S параметра не так полезна для устранения ошибок, связанных с рассогласованием, как кажется [4].

Шумовые параметры

Коэффициент шума является в принципе упрощённой моделью реального шума в системе. Теоретически одиночный элемент шума присутствует в каждом каскаде. Большинство реальных усилительных устройств, таких как транзисторы, могут иметь множественные виды шумов: тепловые, дробовые, шумы декомпозиции. Влияние импеданса источника на генерацию этих шумов может иметь очень сложные взаимосвязи. На результат измерения коэффициента шума влияют согласование источника шума с ИУ и согласование измерительного прибора с ИУ; выходной импеданс источника шума является импедансом источника для ИУ, а выходной импеданс ИУ - импедансом источника для измерительного прибора. Фактические характеристики коэффициента шума устройства, когда оно находится в рабочих условиях, зависят от согласования с другими компонентами системы.

Разработка малошумящих усилителей требует компромиссов между усилением каскада и его коэффициентом шума. Для принятия этих компромиссных решений необходимо знать, как коэффициент передачи активного устройства и его коэффициент шума изменяются в зависимости от импеданса источника или его проводимости. Минимальный коэффициент шума не обязательно получается при импедансе системы, Z_0 , или при сопряжённом согласованном импедансе, при котором достигается максимальное усиление.

Для полного понимания влияния рассогласования в системе необходимы две характеристики испытуемого устройства: одна для коэффициента шума, другая для коэффициента передачи. Тогда как для вычисления номинального коэффициента передачи в идеально согласованной системе может использоваться коррекция S-параметра, она не может быть использована для получения оптимального коэффициента шума. Для оптимизации характеристики шумового параметра используется специальное согласующее устройство, имеющее различные комплексные импедансы для ИУ [29].

Зависимость шум фактора от импеданса источника, представленного согласующим устройством, описывается следующим уравнением:

$$F = F_{\min} + \frac{4R_n}{Z_o} \left(\frac{|\Gamma_{\text{opt}} - \Gamma_s|^2}{|1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)} \right) \quad (2-4)$$

- где Γ - коэффициент отражения источника, имеющий результатом шум-фактор F ;
 F_{\min} - минимальный шум-фактор устройства, который имеет место когда $\Gamma = \Gamma_{\text{opt}}$;
 R_n - шумовое сопротивление (чувствительность коэффициента шума к изменению проводимости источника)

F_{\min} , R_n и Γ_{opt} часто упоминаются как “шумовые параметры”, и это является их определением, которое называется “шумовая характеристика” (noise characterization). На диаграмме Смита коэффициент отражения источника, Γ , для фиксированных значений шум-фактора изображается в виде круговых диаграмм шума (noise circles). Это удобный формат для отображения сложной зависимости между импедансом источника и коэффициентом шума.

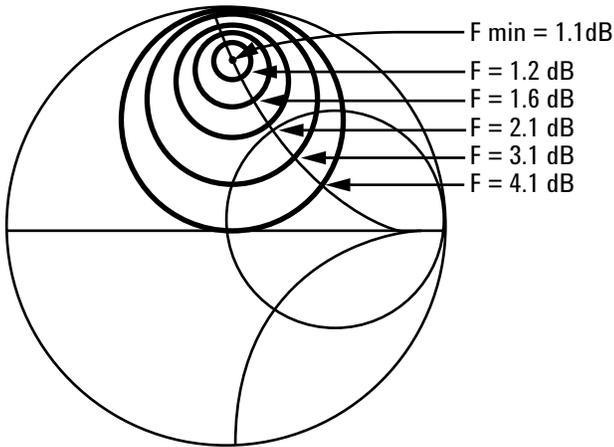


Рисунок 2.2 - Круговые диаграммы шума

Номинальный коэффициент передачи, G_a , обеспечиваемый устройством когда оно возбуждается источником с известным импедансом, можно вычислить, зная S-параметры устройства [35, 40] и коэффициент отражения источника Γ , по формуле (2.5). S-параметры обычно измеряются с помощью анализатора цепей.

$$G_a = \frac{(1 - |\Gamma_s|^2) |S_{21}|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_s|^2 \left(1 - |S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_s}{1 - S_{11}\Gamma_s}|^2 \right)} \quad (2-5)$$

На диаграмме Смита коэффициент отражения источника, Γ_s , для фиксированных значений коэффициента передачи изображается в виде круговых диаграмм коэффициента передачи (gain circles). Это удобный формат отображения зависимости между импедансом источника и коэффициентом передачи.

Влияние ширины полосы

Несмотря на то, что ширина полосы частот является важным параметром многих систем и используется в вычислениях фактического отношения сигнал/шум для демодулированных сигналов, коэффициент шума не зависит от полосы частот устройства. При измерении шумов устройства обычным является допущение о равномерности его амплитудно-частотной характеристики в пределах полосы измерения. Это означает, что ширина полосы измерения шума должна быть меньше ширины полосы устройства. Невыполнение этого условия приводит к ошибке измерения [34]. Более современные анализаторы коэффициента шума серии NFA компании Keysight имеют изменяемые полосы частот, чтобы облегчить измерение узкополосных устройств, а также выполнить измерения на основе анализа спектра. Анализатор спектра серии PSA со специализированной программой измерения коэффициента шума имеет полосу пропускания, которая может быть уменьшена до 1 Гц.

Наиболее часто встречающимся элементом, определяющим ширину полосы системы, такой как приёмник, является тракт ПЧ или детектор. Обычно они имеют полосу пропускания много уже, чем ВЧ схемы. В этом случае коэффициент шума является подходящим параметром для описания шумовых характеристик ВЧ схем. В редком случае, когда ВЧ схемы имеют более узкие полосы, чем тракт ПЧ или детектор, коэффициент шума всё же может использоваться как показатель качества для сравнения, но полный анализ отношения сигнал/шум системы потребует привлечения входной полосы пропускания в качестве параметра.

Раздел 3. Измерение коэффициента шума

Линейность мощности шума

В основе большинства измерений коэффициента шума лежит фундаментальная характеристика линейных двухпортовых устройств - линейность мощности шума. Мощность шума на выходе устройства линейно зависит от мощности шума на входе или от шумовой температуры источника, как показано на рисунке 3.1. Если крутизна этой характеристики и опорная точка известны, может быть найдена выходная мощность, соответствующая входной мощности без шумов, N_a . Зная N_a , можно вычислить коэффициент шума или эффективную шумовую температуру на входе, как описано в разделе 1. Из-за необходимости иметь линейную зависимость при измерениях коэффициента шума схемы автоматической регулировки усиления (APU) должны быть отключены.

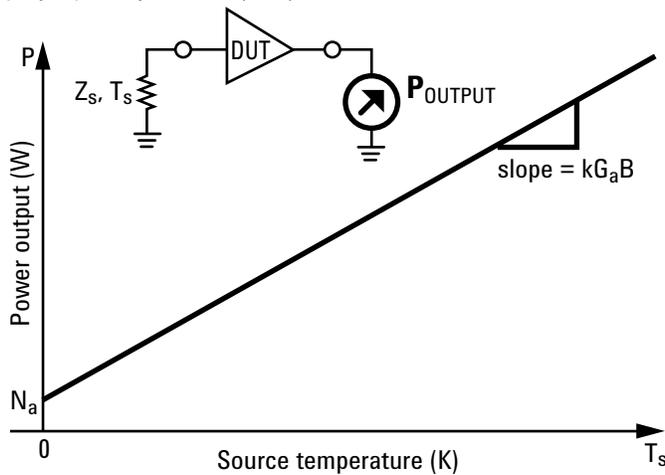


Рисунок 3.1 - Зависимость выходной мощности от температуры источника для линейных двухпортовых устройств отображается прямой линией. Для импеданса источника с температурой абсолютного нуля выходная мощность состоит исключительно из мощности шума N_a , добавленного испытываемым устройством (ИУ). Для других температур источника выходная мощность увеличивается за счёт теплового шума от источника, усиленного в соответствии с коэффициентом передачи ИУ.

Источники шума

Один из способов определения крутизны характеристики шума состоит в подаче на ИУ двух различных уровней входного шума и измерении изменения выходной мощности. Источник шума представляет собой устройство, которое может выдать эти два известных уровня шума. Наиболее популярный источник шума состоит из специального диода с малой ёмкостью, который генерирует шум, когда он смещён в обратном направлении в область лавинного пробоя напряжением постоянного тока [5]. Прецизионные источники шума, такие как Keysight SNS, имеют выходной аттенуатор, обеспечивающий низкий КСВ для уменьшения ошибок рассогласования при измерениях. Если имеется различие импедансов во включенном и выключенном состоянии, может появиться ошибка в измерении коэффициента шума [23]. Для минимизации этого влияния источник шума N4000A имеет большее ослабление.

Когда диод смещён, уровень шума на выходе больше, чем $kT_C B$, благодаря лавинному режиму генерации шума в диоде [11, 12, 13, 15, 20, 21]. Когда диод не смещён, на выходе присутствует тепловой шум с уровнем $kT_C B$, создаваемый в аттенуаторе. Эти уровни шума иногда обозначают T_h и T_c , и называют, соответственно, терминами “hot” (“горячий”) и “cold” (“холодный”). Источник шума N4001A создаёт уровни шума, приблизительно эквивалентные температуре 10000 К, когда он включён, и 290 К, когда выключен. Компания Keysight предоставляет диодные источники шума в диапазоне до 50 ГГц.



Источник шума серии SNS

Для измерения коэффициента шума источник шума должен иметь калиброванный уровень выходного шума, представляемый избыточным коэффициентом шума (ENR). Уникальная калибровочная информация ENR поставляется с источником шума и, в случае серии SNS, хранится во внутреннем электрически перепрограммируемом ПЗУ. Другие источники шума поставляются с данными, содержащимися на дискете или в виде твёрдой копии. ENR_{dB} представляет выраженное в децибелах (дБ) отношение разности между T_h и T_c к $T_0 = 290$ К. Следует отметить, что источник шума с ENR, равным 0 дБ, даёт изменение уровня между включенным (“On”) и выключенным (“Off”) состояниями, соответствующее изменению температуры на 290 К. ENR не представляет уровень шума в состоянии “On” относительно kTB , как это часто ошибочно считают.

$$ENR_{dB} = 10 \log \left(\frac{T_h - T_c}{T_0} \right) \quad (3-1)$$

Предполагается, что когда калибровка выполнена, температура T_s в уравнении (3.1) должна быть 290 К. Когда источник шума используется при различных физических температурах, в результаты должна быть введена компенсационная поправка. Источники шума серии SNS имеют температурный датчик, информация с которого может считываться анализатором NFA компании Keysight. Вопросы температурной компенсации будут рассмотрены в следующем подразделе.

Во многих вычислениях коэффициента шума используются значения ENR в линейных единицах:

$$ENR = 10 \frac{ENR_{dB}}{10} \quad (3-2)$$

Источники шума могут быть откалиброваны по переносному эталонному источнику шума (откалиброванному путём переноса единицы физической величины к высшему уровню лаборатории Национальных Стандартов), или по первичному физическому эталону, такому как "горячая/холодная" нагрузка. Большинство источников шума снабжается значениями ENR в зависимости от частоты.

"Горячая" и "холодная" нагрузки используются в некоторых специальных приложениях, таких как источник шума. В идеальном случае для хорошей прецизионности измерения необходимо каждую из двух нагрузок поддерживать при постоянной температуре. Один из методов состоит в погружении одной из нагрузок в жидкий азот при температуре 77 К, другая может находиться при комнатной температуре или в термостате. Относительно небольшое различие температур по сравнению с диодными источниками шума и потенциально возможные изменения КСВ из-за подключения к нагрузкам различной температуры обычно ограничивают возможности применения этого метода в калибровочных лабораториях и в диапазоне миллиметровых волн.



Волноводные источники шума R/Q 347B

Газоразрядные трубки, встроенные в волноводные структуры, генерируют шум, обусловленный кинетической энергией плазмы. Традиционно они использовались как источники шума в диапазоне миллиметровых волн. Затем они были, по существу, заменены твёрдотельными шумовыми диодами на частотах ниже 50 ГГц. Шумовые диоды проще в использовании и обычно являются более стабильными источниками шума. И хотя шумовые диоды обычно имеют коаксиальную конструкцию, для обеспечения выхода из волновода могут использоваться интегральные прецизионные волноводные адаптеры.

Метод Y-фактора

Метод Y-фактора является основой большинства измерений коэффициента шума, выполняемых внутренними средствами анализатора коэффициента шума как в ручном, так и автоматическом режимах. Используя источник шума, этот метод позволяет определять внутренний шум в ИУ и, следовательно, коэффициент шума или эффективную температуру входного шума.

С помощью источника шума, подключенного к ИУ, может быть измерена выходная мощность, соответствующая включенному ("On") и выключенному ("Off") состояниям источника шума (N_2 и N_1). Отношение этих двух мощностей называется Y-фактором. Детектором мощности, используемым для этого измерения, может быть измеритель мощности, анализатор спектра или специальный внутренний детектор мощности, действующий как измеритель и анализатор коэффициента шума. Здесь важна точность измерения относительного уровня мощности. Одно из преимуществ современных анализаторов коэффициента шума состоит в том, что их внутренний детектор мощности очень линеен и может очень точно измерять изменения уровня. Точность измерения абсолютного уровня мощности измерительным устройством здесь не имеет важного значения, поскольку должно быть измерено отношение мощностей.

$$Y = \frac{N_2}{N_1} \quad (3-3)$$

Иногда это отношение измеряется в децибелах, тогда:

$$Y = 10 \frac{Y_{dB}}{10} \quad (3-4)$$

Y-фактор и ENR могут использоваться для определения крутизны изменения мощности шума ИУ, как показано на рисунке 3.1. Поскольку калиброванный ENR источника шума представляет опорный уровень для входного шума, можно вывести уравнение для вычисления внутреннего шума ИУ, N_a . В современном анализаторе коэффициента шума это делается автоматически путём переключения источника шума между включенным ("On") и выключенным ("Off") состояниями с последующими внутренними вычислениями.

$$N_a = kT_o B G_1 \left(\frac{ENR}{Y - 1} - 1 \right) \quad (3-5)$$

Из этого можно вывести очень простое выражение для шум-фактора. Это выражение представляет полный “шум-фактор системы”, F_{SYS} , включающий шумовой вклад всех её частей. В этом случае шум, создаваемый в измерительном приборе, расценивается как вклад второго каскада. Если ИУ имеет высокий коэффициент передачи ($G_1 \gg F_2$), шумовой вклад этого второго каскада будет малым. Если коэффициент шума второго каскада и коэффициент передачи усиления ИУ известны, вклад второго каскада можно не учитывать при вычислении коэффициента шума. Это будет рассмотрено в подразделе, посвящённом коррекции коэффициента шума и коэффициента передачи. Следует заметить, что коэффициент передачи устройства не требуется для вычисления F_{SYS} .

$$F_{sys} = \frac{ENR}{Y - 1} \quad (3-6)$$

Когда коэффициент шума много выше, чем ENR, шум устройства стремится маскировать выход источника шума. В этом случае Y-фактор будет очень близок к 1. Точное измерение малых значений отношения может быть трудным. Обычно метод Y-фактора не используется когда коэффициент шума более чем на 10 дБ превышает ENR источника шума, зависящего от измерительного прибора.

Уравнение (3.6) может быть модифицировано, чтобы внести поправку на условие, когда “холодная” температура источника шума, T_C , не равна эталонной температуре, T_0 , равной 290 К.

$$F_{sys} = \frac{ENR - Y \left(\frac{T_C}{T_0} - 1 \right)}{Y - 1} \quad (3-7)$$

Это часто используемое уравнение предполагает, что изменения T_C не влияют на T_H , как в случае с “горячей” и “холодной” нагрузками. В случае же с твёрдотельными источниками шума изменения T_C , вероятно, будут влиять на T_H . Поскольку физический источник шума находится при температуре T_C , шум внутреннего аттенюатора, обусловленного T_C , складывается из обоих шумов, соответствующих включенному и выключенному состояниям источника. В этом случае лучше допустить, что изменение уровня шума между включенным и выключенным состояниями остаётся постоянным ($T_H - T_C$). Это различие особенно важно для источников шума с низким ENR, когда T_H меньше чем $10 T_C$. Чтобы внести поправку для этого случая, можно воспользоваться уравнением:

$$F_{sys} = \frac{ENR \left(\frac{T_C}{T_0} \right)}{Y - 1} \quad (3-8)$$

Метод генератора сигналов с удвоением мощности

Этот метод был популярен когда не было источников шума. Он всё ещё остаётся полезным для устройств с высоким коэффициентом шума, где Y-фактор может быть очень малым, и его трудно точно измерить. Сначала измеряется выходная мощность устройства, когда на его входе имеется нагрузка при температуре приблизительно 290 К. Затем подключается генератор сигналов с частотой в пределах полосы измерения. Мощность выходного сигнала генератора устанавливается такой, чтобы мощность на выходе устройства увеличилась на 3 дБ. Если уровень мощности генератора и ширина полосы частот измерения известны, можно вычислить шум-фактор. Коэффициент передачи ИУ при этом знать не требуется.

$$F_{sys} = \frac{P_{gen}}{kT_0 B} \quad (3-9)$$

Имеется несколько факторов, ограничивающих точность этого метода. Шумовая полоса измерителя мощности должна быть известна, что, возможно, потребует анализатора цепей. Шумовая полоса, B , равна ширине полосы эквивалентного фильтра с прямоугольной формой амплитудно-частотной характеристики, с плоской вершиной и таким же значением произведения коэффициента передачи на ширину полосы, как у реального фильтра. Выходная мощность должна измеряться устройством, показывающим истинное значение мощности, поскольку здесь имеет место смесь шума и немодулированного синусоидального сигнала (НГ). Измерители мощности, основанные на тепловом принципе, очень точно измеряют истинную мощность, но могут требовать большого усиления для измерения низкого уровня шума и фильтра с определённой шириной полосы. Анализаторы спектра имеют высокую чувствительность и хорошо определённую полосу пропускания, но их детектор может по разному реагировать на сигналы НГ и шум. Точность измерения абсолютного уровня от детектора мощности здесь не требуется, поскольку измеряется отношение мощностей.

Метод прямого измерения шума

Этот метод тоже полезен для измерения устройств с высоким коэффициентом шума. Выходная мощность устройства измеряется при входной нагрузке, находящейся при температуре приблизительно 290 К. Если коэффициент передачи устройства и шумовая полоса измерительной системы известны, шум-фактор может быть определён по формуле:

$$F_{sys} = \frac{N_0}{kT_0 B G} \quad (3-10)$$

В этом методе также должна быть известна шумовая полоса, B , и устройство, измеряющее мощность, должно иметь очень высокую чувствительность. В отличие от метода удвоения мощности, коэффициент передачи ИУ должен быть известен, а детектор мощности должен обеспечивать точность измерения абсолютного уровня.

Коррекция коэффициента шума и коэффициента передачи

Рассмотренные выше методы используются для измерения полного шум-фактора системы, F_{SYS} , включая измерительную систему. Обычно представляет интерес коэффициент шума ИУ. Из уравнения для коэффициента шума каскадного соединения можно видеть что при большом коэффициенте передачи ИУ измерительная система мало влияет на результат измерения. Коэффициент шума ИУ с высоким коэффициентом передачи может быть непосредственно измерен с помощью рассмотренных выше методов. Когда должно быть измерено ИУ с низким коэффициентом передачи или требуется очень высокая точность измерения, может быть применена коррекция, если известен коэффициент передачи ИУ и коэффициент шума системы. Используя уравнение (2.2) и переписав его относительно F_1 , можно получить уравнение для фактического шум-фактора ИУ:

$$F_1 = F_{sys} - \frac{F_2 - 1}{G_1} \quad (3-11)$$

Коэффициент передачи ИУ и шум-фактор измерительной системы, F_2 , могут быть определены с помощью дополнительного измерения источника шума. Этот шаг называется калибровкой системы. Калибровка обычно выполняется с помощью анализатора коэффициента шума перед подключением ИУ, так что все последующие измерения могут использовать поправки, и на экране может отображаться скорректированный коэффициент шума. Все вычисления, необходимые для определения коэффициента передачи и скорректированного коэффициента шума, выполняются автоматически внутри системы. Если с помощью других приборов измерения выполняются вручную, калиброванные измерения коэффициента шума могут выполняться следующим образом.

1. Подключить источник шума непосредственно к измерительной системе и измерить уровни мощности шума, соответствующие включенному и выключенному состояниям источника шума. Эти уровни, N_2 и N_1 , соответственно, могут затем использоваться для вычисления шум-фактора измерительной системы, F_2 , с помощью метода Y-фактора.
2. Установить ИУ в систему. Уровни шума N_2 и N_1 , измерены когда источник шума включен и выключен. Коэффициент передачи ИУ может быть вычислен с использованием значений уровней шума:

$$G_1 = \frac{N_2' - N_1'}{N_2 - N_1} \quad (3-12)$$

Коэффициент передачи обычно отображается в децибелах: $G_{db} = 10 \log G$

3. Полный шум-фактор системы, F_{SYS} , может быть вычислен применением метода Y-фактора к значениям N_2' и N_1' .
4. Коэффициент шума ИУ, F_1 , может быть вычислен с помощью уравнения (3.11) и представлен в виде $10 \log F_1$.

Флуктуации

Шум может быть представлен как последовательность случайных событий, в данном случае - электрических импульсов. Цель любого измерения шума состоит в нахождении его среднего значения на выходе устройства. Эти значения с соответствующими поправками могут использоваться для вычисления фактического коэффициента шума устройства. Теоретически для нахождения истинного среднего значения шума требуется бесконечно большое время. Практически усреднение шума выполняется за ограниченный интервал времени. Разность между измеренным и истинным средними значениями флуктуирует, что приводит к ухудшению повторяемости.

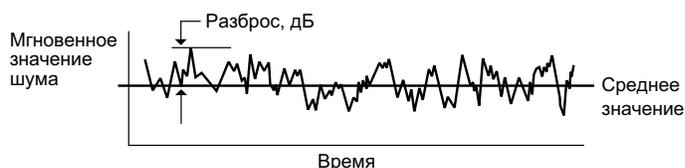


Рисунок 3.2 - Шумовые флуктуации вокруг среднего значения

Для малых значений разброса девиация пропорциональна величине $1/\sqrt{t}$. Поэтому при большем времени усреднения его результат будет лучше, поскольку усреднение включает больше событий, и его результат ближе к истинному среднему значению. Разброс также пропорционален $1/\sqrt{B}$. Более широкая полоса измерения даст лучший результат усреднения, поскольку в широкой полосе содержится больше шумовых событий в единицу времени и, следовательно, больше событий участвует в усреднении. Обычно коэффициент шума следует измерять с возможно более широкой полосой, но не более, чем полоса ИУ.

Преобразователи частоты

Преобразователи частоты, такие как приёмники и смесители, обычно разрабатываются для преобразования частоты из высокочастотного (ВЧ) диапазона на промежуточную частоту (ПЧ). Соотношения для коэффициента шума, обсуждаемые в данной работе, применимы как к преобразователям частоты, так и к устройствам без преобразования; однако имеются некоторые дополнительные особенности этих устройств, которые могут влиять на измерения коэффициента шума. В дополнение к ИУ, которые сами по себе уже являются преобразователями частоты, измерительная система иногда использует смеситель для расширения диапазона частот измерения.

Потери

Усилители обычно имеют собственное им усиление, тогда как пассивные смесители имеют потери. Все уравнения для коэффициента шума остаются применимыми к ним; однако линейные значения коэффициента передачи для них будут меньше единицы. Одно из связанных с этим осложнений можно видеть применяя уравнение коэффициента шума для каскадного включения: здесь шумовой вклад второго каскада может быть основным (уравнение (2.2)). Другое заключается в том, что пассивные смесители, если измерения выполняются методом Y-фактора, могут иметь малый Y-фактор вследствие их высоких коэффициентов шума. Это может увеличить погрешность измерения. Для получения более высокого Y-фактора могут быть использованы источники шума с высоким ENR.

Шумы гетеродина

Приёмники и смесители имеют местный гетеродин (LO), сигнал которого может иметь шумы. Этот шум может преобразовываться в смесителе на промежуточную частоту и давать дополнительный вклад в коэффициент шума системы. Величина этого вклада может варьироваться в широких пределах в зависимости от типа смесителя и уровня шумов гетеродина. В системах с фиксированной частотой гетеродина этот шум можно исключить с помощью полосового фильтра, установленного на гетеродинном входе смесителя. Фильтр, подавляющий помехи на частотах $f_{ГЕТ} \pm f_{ПЧ}$, $f_{ПЧ}$ и $f_{ВЧ}$ и пропускающий сигнал с частотой $f_{ГЕТ}$, исключает этот шум. Могут быть также помехи более высокого порядка преобразования, которые дают свой вклад, если уровень шумов гетеродина очень высок. Для устранения шумов преобразования на гармониках частоты гетеродина может быть использован фильтр низких частот.

Просачивание сигнала гетеродина

Остаточный сигнал гетеродина может присутствовать на выходе ПЧ смесителя или преобразователя. Этот сигнал обычно не имеет отношения к шумовым характеристикам ИУ и может считаться допустимым для предполагаемого применения. Когда выполняются измерения коэффициента шума, сигнал гетеродина может перегружать прибор для измерения шума или создавать другие побочные продукты преобразования. Это вполне вероятно, когда измерительная система имеет на входе широкополосный усилитель или другие не защищённые фильтром цепи. Часто на входе прибора устанавливается фильтр для исключения просачивания сигнала гетеродина в тракт ПЧ.

Нежелательные отклики

Иногда нужная полоса частот ВЧ сигнала не является единственной, которая преобразуется на ПЧ. Преобразование нежелательных частотных полос может происходить, если они присутствуют на ВЧ входе вместе с полезным сигналом. Некоторыми из них могут быть: зеркальные частоты ($f_{ГЕТ} + f_{ПЧ}$ или $f_{ГЕТ} - f_{ПЧ}$, в зависимости от преобразователя), гармоники ($2f_{ГЕТ} \pm f_{ПЧ}$, $3f_{ГЕТ} \pm f_{ПЧ}$ и т.д.), побочные составляющие и сигналы прямого прохождения ПЧ. Часто, особенно в приёмниках, отклики на эти сигналы незначительны благодаря внутренней фильтрации. Во многих других устройствах, особенно в смесителях, один или более откликов на эти сигналы может присутствовать и вносить дополнительные помехи в полосу ПЧ.

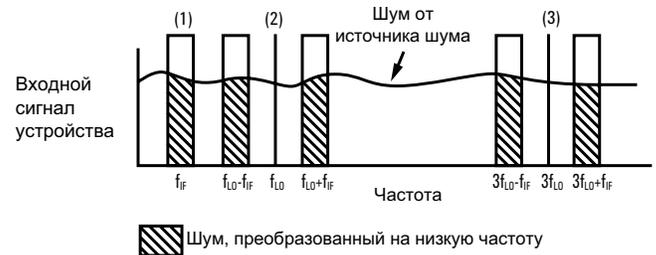


Рисунок 3.3 - Возможные механизмы преобразования шума в смесителях и преобразователях частоты. (1) прямое прохождение сигнала ПЧ; (2) двухполосное преобразование; (3) преобразование на гармониках.

Смесители, имеющие два основных отклика ($f_{ГЕТ} + f_{ПЧ}$ и $f_{ГЕТ} - f_{ПЧ}$), часто называются двухполосными смесителями (ДБП). Полоса $f_{ГЕТ} + f_{ПЧ}$ называется верхней боковой полосой (ВБП), а $f_{ГЕТ} - f_{ПЧ}$ - нижней боковой полосой (НБП). Эти смесители преобразуют шум, содержащийся в обеих частотных полосах в полосу ПЧ. Когда такой смеситель является частью системы измерения шума, второй отклик будет создавать ошибку в измерении коэффициента шума, если не введена коррекция, обычно +3 дБ. В идеальном случае для исключения второго отклика на входе ВЧ используется фильтрация, так чтобы измерения могли быть выполнены с использованием одной боковой полосы (ОБП).

Когда ИУ является двухполосным смесителем, имеется выбор при измерении коэффициента шума. Обычно пользователь хочет измерить эквивалентный коэффициент шума в одной боковой полосе. В пассивных смесителях, не имеющих шума гетеродина, эквивалентный коэффициент шума в ОБП частот близок по величине к потерям преобразования, измеренным с помощью немодулированного сигнала. Имеется два способа выполнить это измерение: использовать входной фильтр или ввести коррекцию на +3 дБ. При использовании этих методов возникают осложнения с точностью, которые должны приниматься во внимание, если нужны точные измерения; входной фильтр вносит потери, которые должны быть скорректированы введением поправки на +3 дБ в предположении, что отклики ВБП и НБП равны.

Преобразователи, используемые в приёмниках шума, таких как радиометры и радиометрические датчики, часто проектируются с целью использования обоих основных откликов; при этом желательно знать коэффициент шума ДБП. В этом случае коррекция или входной фильтр не используются; результат измерения представляет коэффициент шума в ДБП.

Приборы для измерения

коэффициента шума

Анализаторы коэффициента шума представляют самый последний этап в развитии технических решений для измерения коэффициента шума. В своей основной форме анализатор коэффициента шума состоит из приёмника с точным детектором мощности и схемы для питания источника шума. Он имеет вход для ENR и отображает результат измерения коэффициента шума, соответствующий частоте, на которую настроен. Анализатор вычисляет коэффициент шума внутренними средствами, используя метод Y-фактора.

Анализатор позволяет отображать коэффициент шума и коэффициент передачи в режиме свипирования частоты, а также связанные с ними элементы, такие как маркеры и ограничительные линии. Анализаторы коэффициента шума Keysight серии NFA в комбинации с источниками шума серии SNS обеспечивают улучшение точности и скорости измерений, что важно для условий производства. Анализаторы серии NFA специально разработаны и оптимизированы для одной цели - измерения коэффициента шума. Комбинированные приборы, которые должны выполнять и другие измерения, обычно имеют в некоторой степени компромиссные решения, касающиеся точности..



Анализатор коэффициента шума серии NFA

- Особенности:
- Гибкость и интуитивно понятный интерфейс пользователя обеспечивают измерение характеристик усилителей и преобразователей частоты
 - Измерения в диапазоне до 26,5 ГГц в одном приборе исключают необходимость в отдельном понижающем преобразователе
 - Точные и повторяющиеся результаты позволяют устанавливать более жёсткие требования к характеристикам устройства

Анализаторы сигналов/спектра

Анализаторы сигналов/спектра часто используются для измерения коэффициента шума, поскольку они обычно уже присутствуют в испытательной стойке оборудования для производства ВЧ и микроволновых устройств, выполняя различные функции. С помощью программного обеспечения и контроллера они могут применяться для измерения коэффициента шума используя любые методы, рассмотренные в данных заметках по применению. Они особенно полезны для исследования устройств с высоким коэффициентом шума при использовании методов генератора сигналов или непосредственного измерения мощности. Изменяемые полосы пропускания позволяют измерять параметры узкополосных устройств. Прикладные измерения коэффициента шума на анализаторах сигналов серии X обеспечивают набор измерений для коэффициента шума и коэффициента передачи, очень похожий на тот, который имеют анализаторы коэффициента шума серии NFA.



Анализатор сигналов серии X с источником шума серии SNS

Анализатор сигналов серии X с прикладной программой для измерения коэффициента шума N9069A

Одно из преимуществ анализатора коэффициента шума, построенного на основе анализатора сигналов/спектра, состоит в его многофункциональности. Он может, например, измерять искажения в усилителе. Кроме того, он может локализовать побочные и паразитные сигналы, а затем выполнить измерение коэффициента шума устройства на частотах, где эти сигналы не будут создавать помех для измерений шума.

Анализаторы сигналов/спектра, даже с их оптимальным внутренним предусилителем, не имеют такого низкого коэффициента шума, как специализированный NFA. Следовательно, для устройств с очень малым усилением (или с потерями) рекомендуется применять либо NFA, либо использовать дополнительный внешний малошумящий предусилитель для повышения чувствительности анализатора сигналов. Для частот ниже 10 МГц анализаторы сигналов/спектра предпочтительнее чем NFA. Анализатор PXA с прикладной измерительной программой имеет функцию внутренней калибровки (Internal Cal), что обычно существенно повышает удобство работы, позволяя оператору пропускать полную фазу калибровки. В остальном функциональные характеристики анализатора PXA с прикладной программой для измерения коэффициента шума не отличаются от NFA.

Анализаторы цепей

Подобно анализаторам спектра, анализаторы цепей являются широко распространёнными в промышленности многоцелевыми приборами. Имеются приборы, которые предлагают измерения коэффициента шума в дополнение к обычным измерениям параметров цепей. Их преимущество состоит в том, что они могут выполнять и другие измерения, обычно тесно связанные с устройствами, например, коэффициент передачи и согласование. Поскольку измерения параметров цепей обычно выполняются при той же внутренней архитектуре приёмника, могут быть некоторые ограничения характеристик, когда анализатор используется в приложениях, связанных с коэффициентом шума. Часто используется приёмник с двумя боковыми полосами, где коэффициент шума фактически измеряется на двух частотах, и применяется внутренняя коррекция. Когда используется широкая полоса измерения, это может привести к ошибке, если коэффициент шума или коэффициент передачи устройства не постоянны в пределах этой частотной полосы. Когда используется узкая полоса для измерения узкополосных устройств, неиспользуемый частотный спектр между верхней и нижней боковыми полосами не даёт вклада в измерение и для уменьшения флюктуаций (см. “Флюктуации” в этом разделе) требуется более длительное время измерения.

Анализаторы цепей могут измерять S-параметры устройства, как было рассмотрено выше, данные измерения S-параметров могут помочь уменьшить погрешность измерения коэффициента шума, позволяя ввести коррекцию рассогласования. В идеальном случае эта коррекция могла бы обеспечить более точное измерение коэффициента передачи устройства, так что шумовой вклад второго каскада мог быть учтён с более высокой точностью. К сожалению, рассогласование влияет также на уровень шума во втором каскаде, который не может быть скорректирован без знания шумовых параметров устройства. Аналогичная ситуация возникает на входе устройства, когда имеет место рассогласование между источником шума и входом ИУ (см. “Шумовые параметры” в разделе 2) [4]. Анализаторы цепей сами по себе не могут обеспечить измерение шумовых параметров. Это измерение, как правило, требует устройства настройки импеданса и программного обеспечения в дополнение к анализатору. Полученная таким образом измерительная система может оказаться слишком сложной и дорогой. Коррекция ошибки в анализаторе цепей является одним из его основных преимуществ при измерении и вычислении коэффициента передачи.



Измеритель мощности серии EPM

Установки для измерения шумовых параметров

Испытательная установка для измерения шумовых параметров обычно используется совместно с программным обеспечением, векторным анализатором цепей и анализатором шума для выполнения ряда измерений, позволяя определить шумовые параметры устройства [29] (см. “Шумовые параметры” в разделе 2). Шумовые параметры затем могут использоваться для вычисления минимального коэффициента шума, оптимального импеданса источника и влияния импеданса источника на коэффициент шума. Установка имеет регулируемое устройство настройки импеданса для ИУ. Внутренние цепи обеспечивают питание для испытуемых полупроводниковых устройств. Источник шума подключается к установке и позволяет измерять коэффициент шума при различных импедансах источника. Соответствующий импеданс источника измеряется анализатором цепей. На основании этих данных может быть вычислен полный набор шумовых параметров устройства. Обычно измеряется также полный набор S-параметров, так что параметры передачи также определены. Из-за большого числа выполняемых измерений измерение полного набора шумовых параметров устройства проходит много медленнее, чем обычное измерение коэффициента шума, но позволяет определить полезные параметры конструкции. Для малошумящих транзисторов шумовые параметры часто приводятся в их паспортных данных. Для компонентов и узлов, которые предполагается использовать в хорошо согласованных 50- или 75-омных системах, шумовые параметры обычно не измеряются, так как импеданс источника определяется прикладной задачей.

Измерители мощности и вольтметры истинного среднеквадратического значения

Измерители мощности и вольтметры истинного среднеквадратического значения (СКЗ), как базовые приборы для измерения уровня сигнала, могут использоваться для измерения коэффициента шума любым из описанных здесь методов, но с применением ручных или компьютерных вычислений. Поскольку эти приборы являются широкополосными устройствами, требуется фильтр для ограничения их полосы, которая должна быть уже, чем у ИУ. Обычно такие фильтры настраиваются на фиксированную частоту и позволяют проводить измерения только на этой частоте. Измерители мощности наиболее часто используются для измерения коэффициента шума приёмников, поскольку они имеют фиксированную ПЧ и высокое усиление. Чувствительность измерителей мощности и вольтметров обычно не очень высока, но приёмник может обеспечить усиление, достаточное для выполнения измерений. Если для увеличения чувствительности перед измерителем мощности используется дополнительное усиление, следует принять меры, исключающие возможность температурного дрейфа и появления осцилляций.

4. Глоссарий

Символы и аббревиатуры

B	Шумовая полоса
BER	Коэффициент битовой ошибки
$ b_s ^2$	Мощность, передаваемая генератором к неотражающей нагрузке
C/N	Отношение несущая/шум
DBS	Система спутникового вещания
DSB (ДБП)	Две боковые полосы
DUT (ИУ)	Испытуемое устройство
ENR (ИКШ)	Избыточный коэффициент шума, дБ
EUT (ИО)	Испытуемое оборудование
F	Шум-фактор
F_1	Шум-фактор первого каскада
FM (ЧМ)	Частотная модуляция
F_{min}	Минимальный шум-фактор
F_{sys}	Шум-фактор системы
1/f	Фликкер-шум
G_p	Коэффициент передачи мощности
G_{ass}	Связанный коэффициент передачи
G_a	Номинальный коэффициент передачи
G_i	Внесенный коэффициент передачи
G_t	Коэффициент передачи преобразователя
G/T	Отношение коэффициента передачи к температуре
IEEE	Институт инженеров по электротехнике и электронике
IF (ПЧ)	Промежуточная частота
IRE	Институт радиоинженеров
K	Кельвин (единица температуры по шкале Кельвина)
k	Постоянная Больцмана
LNA (МШУ)	Малошумящий усилитель
LSB (НБП)	Нижняя боковая полоса
M	Мера шума
M_u	Погрешность рассогласования
N_a	Добавочный шум
NF	Коэффициент шума
N_{off}	То же, что N_1 (см. Y-фактор)
N_{on}	То же, что N_2 (см. Y-фактор)
N_1	N_{out} для T_c (см. Y-фактор)
N_2	N_{out} для T_h (см. Y-фактор)
N_i	Мощность шума на входе
N_o	Мощность шума на выходе
RF (ВЧ)	Высокая частота (радиочастота)
RMS (СКЗ)	Среднеквадратическое значение
R_n	Эквивалентное шумовое сопротивление
r_n	Нормализ. эквивалентное шумовое сопротивление
RSS	Корень из суммы квадратов (средняя квадратическая величина)
S/N (С/Ш)	Отношение сигнал/шум
SSB (ОБП)	Одна боковая полоса
$ S_{21} ^2$	Коэффициент прямой передачи
S_i	Мощность сигнала на входе
S_o	Мощность сигнала на выходе
T_a	Шумовая температура
T_c, T_c	"Холодная" температура (см. T_c)
T_h, T_h	"Горячая" температура (см. T_h)
T_{ne}	Эффективная шумовая температура

T_{off}	Температура выключенного состояния
T_{on}	Температура включенного состояния
T_{op}	Рабочая шумовая температура
T_o	Стандартная шумовая температура (290 К)
T_s	Эффективная температура источника шума
USB (ВБП)	Верхняя боковая полоса
Γ_{opt}	Оптимальный коэффициент отражения источника
Γ	Коэффициент отражения источника
Γ_L	Коэффициент отражения нагрузки

Глоссарий терминов

Связанный коэффициент передачи (G_{ass}). Номинальный коэффициент передачи устройства, когда коэффициент отражения источника имеет оптимальное значение Γ_{opt} соответствующее F_{min} .

Номинальный коэффициент передачи (G_a). [2, 35, 40]. Отношение на определенной частоте мощности на выходе цепи, P_{ao} к мощности получаемой от источника P_{as} .

$$G_a = \frac{P_{ao}}{P_{as}} \quad (1)$$

Для источника с выходной мощностью $|b_s|^2$ и коэффициентом отражения

$$P_{as} = \frac{|b_s|^2}{1 - |\Gamma_s|^2} \quad (2)$$

$$P_{ao} = \frac{|b_s|^2 |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_2|^2)}{|(1 - \Gamma_s S_{11})(1 - \Gamma_2^* S_{22}) - \Gamma_s \Gamma_2^* S_{12} S_{21}|^2} \quad (3)$$

где

$$T_2 = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_s}{1 - S_{11} \Gamma_s} \quad (4)$$

Другое выражение для номинальной выходной мощности имеет вид:

$$P_{ao} = \frac{|b_s|^2 |S_{21}|^2}{|1 - \Gamma_s S_{11}|^2 (1 - |\Gamma_2|^2)} \quad (5)$$

Это приводит к двум выражениям для G_a

$$G_a = |S_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_s|^2) (1 - |\Gamma_2|^2)}{|(1 - \Gamma_s S_{11})(1 - \Gamma_2^* S_{22}) - \Gamma_s \Gamma_2^* S_{12} S_{21}|^2} \quad (6)$$

$$G_a = |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_s|^2}{|1 - \Gamma_s S_{11}|^2 (1 - |\Gamma_2|^2)} \quad (7)$$

ПРИМЕЧАНИЕ: G_a является функцией параметров цепи и коэффициента отражения источника Γ . G_a не зависит от коэффициента отражения нагрузки Γ_L . Часто G_a выражается в децибелах:

$$G_a(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{ao}}{P_{as}} \quad (8)$$

Полоса (В). См. “Шумовая полоса”.

Постоянная Больцмана (к). $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К.

Каскадный эффект. [8] Отношение шумовых характеристик (F или T и G_a) каждой отдельной цепи, когда несколько цепей соединены каскадно, к шумовым характеристикам полной или комбинированной цепи. Если F_1, F_2, \dots, F_n (в линейных единицах, не в дБ) представляют индивидуальные коэффициенты шума каскадов, а $G_{a1}, G_{a2}, \dots, G_{an}$ (в линейных единицах) индивидуальные номинальные коэффициенты передачи, коэффициент шума комбинированной цепи определяется следующим выражением:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{a1}} + \frac{F_3 - 1}{G_{a1}G_{a2}} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_{a1}G_{a2} \dots G_{a(n-1)}} \quad (1)$$

Номинальный коэффициент передачи комбинированной цепи:

$$G_a = G_{a1}G_{a2} \dots G_{an} \quad (2)$$

Общая эффективная шумовая температура на входе каскадной цепи может быть выражена через индивидуальные эффективные шумовые температуры на входах каскадов $T_{e1}, T_{e2}, \dots, T_{en}$ следующим образом:

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_{a1}} + \frac{T_{e2}}{G_{a1}G_{a2}} + \dots + \frac{T_{en}}{G_{a1}G_{a2} \dots G_{a(n-1)}} \quad (3)$$

ПРИМЕЧАНИЕ: Каждая из упомянутых выше характеристик F_i, T_{ei} и G_{ai} относится к величине импеданса источника, который соответствует выходному импедансу предыдущего каскада.

Диодный источник шума. [11, 12, 13, 15, 20, 21]

Источник шума, в котором шум генерируется твердотельным диодом, смещенным в обратном направлении в область лавинного пробоя. Избыточные коэффициенты шума хорошо согласованных устройств обычно около 15 дБ ($T_{ne} = 10000$ К). Более высокие избыточные коэффициенты шума можно получить, пожертвовав согласованием импеданса

Две боковые полосы (DSB, ДБП). См. “Одна боковая полоса (SSB, ОБП)”.

Эфф. шумовая температура на входе (T_e). [17] Шумовая температура, приписываемая импедансу

на входе ИУ, который будучи подключен к бесшумовому эквиваленту ИУ, создает такую же мощность на выходе, как и реальное ИУ, когда оно подключено к бесшумовому входному импедансу. Такая же температура распространяется одновременно на весь набор частот, которые образуют спектр выходного сигнала. Если имеется несколько входных портов и каждый имеет свой собственный импеданс, такая же температура распространяется одновременно на все порты. С целью определения T_e все порты, за исключением выходного, рассматриваются как входные. Для двухпортового преобразователя с одним входом и одной выходной частотой, T_e связана с коэффициентом шума F следующим соотношением:

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

Эффективная шумовая температура

(T_{ne}). [1] (Это свойство однопортового устройства, например, источника шума). Температура, которая создаёт мощность шума, выходящую с выходного порта источника шума, когда он подключен к неотражающей и не создающей сигналов нагрузке. Соотношение между шумовой температурой, T_a и эффективной шумовой температурой T_{ne} определяется выражением:

$$T_{ne} = T_a(1 - \Gamma^2) \quad (1)$$

где Γ - коэффициент отражения источника шума.

Если коэффициент пропорциональности для выходящей мощности k_B , тогда

$$T_{ne} = \frac{P_e}{k_B} \quad (2)$$

где P_e - выходящая мощность;

k - постоянная Больцмана;

B - полоса измерения мощности.

Спектральная плотность мощности в полосе измерения предполагается постоянной.

Эквивалентное шумовое сопротивление (r_n и R_n). См. “Круговые диаграммы коэффициента шума”.

Избыточный коэффициент шума (ENR).

Свойство генератора шума, вычисляемое по данным “горячей” и “холодной” температур (T_h и T_c) с использованием уравнения:

$$ENR_{dB} = 10 \log \frac{T_h - T_c}{T_o} \quad (1)$$

где T_o - стандартная шумовая температура 290 К. Шумовые температуры T_h и T_c должны быть “эффективными” шумовыми температурами. См. “Эффективная шумовая температура”, [25]. Калибровка ENR диодного источника шума предполагает, что $T_c = T_o$.

Несколько полезных примеров соотношения между ENR и T_h . ENR = 0 дБ соответствует $T_h = 580$ К. $T_h = 100$ °С (373 К) соответствует ENR = -5,43 дБ. $T_h = 290$ К соответствует ENR = $-\infty$ дБ.

Фликкер шум и шум вида 1/f. [33, 39] Это любой шум, у которого спектральная плотность мощности обратно пропорциональна частоте. Это особенно важно на звуковых частотах или для арсенид галлиевых полевых транзисторов с каналом n-типа (GASFET) на частотах ниже 100 МГц.

Кэффициент прямой передачи (S_{21})².

Отношение, на определенной частоте, мощности, получаемой с выхода цепи, к мощности, поступающей на вход цепи, когда цепь имеет неотражающую нагрузку и возбуждается неотражающим генератором.

Величина этого параметра часто даётся в децибелах:

$$|S_{21}|^2 \text{ (dB)} = 10 \log |S_{21}|^2 \quad (1)$$

Отношение коэффициента передачи к температуре (G/T).

[32, 41] Показатель качества спутниковой или радиоастрономической приемной системы включающей антенну, который характеризует работу всей системы. Числитель в этом показателе представляет коэффициент усиления антенны, а знаменатель - рабочую шумовую температуру приёмника. Это отношение обычно выражается в децибелах. Например, $10\log(G/T)$. Отношение G/T часто измеряется путем сравнения отклика приемника, когда вход антенны является "горячим" источником астрономического шума, с откликом, когда на входе присутствует фоновый шум излучения пространства (3 K).

Газоразрядный источник шума.

[[25, 26] Источник, в котором шум определяется температурой ионизированного инертного газа. Этот тип источника шума обычно требует напряжения в несколько тысяч вольт для того, чтобы начался газовый разряд, и только около ста вольт для поддержания разряда. Компоненты с высоким напряжением включения иногда имеют прямое соединение с выходом источника, что может повредить некоторые небольшие, хрупкие, малошумящие, твердотельные устройства. Газоразрядный источник шума в большинстве применений был заменен источником шума на лавинном диоде. Однако газоразрядные трубки все ещё используются в диапазоне миллиметровых волн. Избыточный коэффициент шума (ENR) для аргоновых трубок около 15,5 дБ (10000 K).

Гауссов шум.[6] Шум, имеющий нормальный (гауссов) закон распределения вероятностей или гауссову функцию плотности вероятности:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

где σ - стандартное отклонение.

Если шум имеет установившийся или стационарный характер и является суммой большого числа малых независимых событий, то в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей его распределение вероятностей стремится к нормальному (гауссову) закону. Тепловой и дробовый шумы являются гауссовыми.

Горячий/холодный источник шума.

Большинство измерений коэффициента шума основываются на измерении мощности шума при двух температурах источника - "горячей" и "холодной". Однако выражение "горячий/холодный" (Hot/Cold), часто относится к измерениям, выполняемым с "холодной" нагрузкой, находящейся при температуре жидкого азота (77 K) или даже жидкого гелия (4 K), и с "горячей" нагрузкой при температуре 373 K (100 °C). Такие нагрузки иногда используются в качестве первичных эталонов и для высокоточной калибровки при лабораторных испытаниях.

Внесенный коэффициент передачи (G_i).

Коэффициент передачи, который измеряется при установке ИУ между генератором и нагрузкой. Числитель в формуле для G_i представляет мощность в нагрузке, P_d , при установленном ИУ, а знаменатель - опорную мощность P_r , которая представляет мощность в нагрузке, когда источник непосредственно подключен к ней. Измерение опорной мощности P_r можно назвать шагом калибровки.

$$G_i = \frac{P_d}{P_r} \quad (1)$$

Мощность в нагрузке, когда источник непосредственно подключен к ней, определяется выражением:

$$P_r = |b_r|^2 \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_s|^2} \quad (2)$$

Здесь индекс "r" означает характеристики источника при определении опорной мощности, то есть, в процессе калибровки. Мощность в нагрузке при подключении ИУ определяется выражением:

$$P_d = |b_d|^2 |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|(1 - \Gamma_{sd} S_{11})(1 - \Gamma_1 S_{22}) - \Gamma_1 S_{12} S_{21}|^2} \quad (3)$$

или

$$P_d = |b_d|^2 |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|1 - \Gamma_{sd} S_{11}|^2 |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|^2} \quad (4)$$

$$T_2 = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_{sd}}{1 - \Gamma_{sd} S_{11}} \quad (5)$$

В формулах (3), (4) и (5) индекс "d" обозначает характеристики источника при установленном ИУ. S-параметры относятся к ИУ. Характеристики источника в процессе калибровки и при установленном ИУ в некоторых случаях различны. Рассмотрим случай, когда ИУ является, например, микроволновым приемником с волноводным входом и выходом ПЧ 70 МГц. В процессе калибровки источник имеет коаксиальный выход на частоте 70 МГц, но когда подключен ИУ, источник будет иметь волноводный выход с частотой микроволнового диапазона. Используя приведенные выше формулы можно определить коэффициент передачи при подключенном ИУ:

$$G_i = IS_{21}^2 \frac{|b_d|^2}{|b_r|^2} \frac{|1 - \Gamma_1 \Gamma_{sr}|^2}{|1 - \Gamma_{sd} S_{11}|^2 |1 - \Gamma_1 S_{22}|^2 - \Gamma_1 \Gamma_{sd} S_{12} S_{21}|^2} \quad (6)$$

или

$$G_i = IS_{21}^2 \frac{|b_d|^2}{|b_r|^2} \frac{|1 - \Gamma_1 \Gamma_{sr}|^2}{|1 - \Gamma_{sd} S_{11}|^2 |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|^2} \quad (7)$$

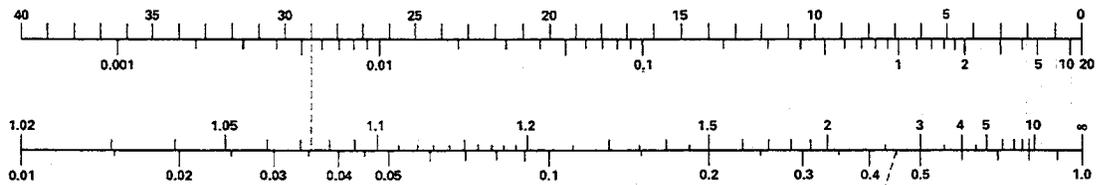
В ситуациях, где тот же источник и на той же частоте используется и в процессе калибровки и при подключенном ИУ, $|b_d|^2 = |b_r|^2$ и $G_{sr} = G_{sd}$. Это обычно бывает при измерении характеристик усилителей.

Погрешность измерительного прибора.

Погрешность, возникающая вследствие отклонения от нормы какой-либо из влияющих величин в схемах электронного прибора. Для анализаторов/измерителей коэффициентов шума это могут быть отклонения в схемах детектора, АЦП, погрешности округления при математических операциях, нелинейности смесителя, эффекты насыщения и нестабильность усиления в процессе измерения. Эта погрешность часто ошибочно принимается за полную погрешность измерения, поскольку она может быть легко найдена в технических данных прибора. Однако в современной технике это редко бывает наиболее существенной причиной погрешности.

Возвратные потери:
дБ = $20 \log \rho$
Потери рассогласования:
дБ = $10 \log(1 + \rho^2)$
КСВ: $\sigma = (1 + \rho)/(1 - \rho)$

Коэффициент отражения: ρ



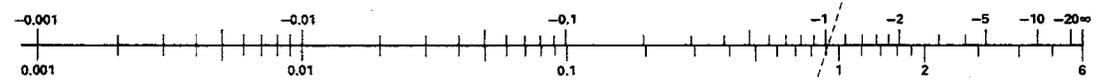
Пример: возвратные потери 29 дБ соответствуют потерям рассогласования 0,0055 дБ, КСВ 1,074 и коэффициенту отражения 0,035.

Пределы погрешности рассогласования

дБ = $20 \log(1 + \rho_1 \rho_2^2)$
дБ = $20 \log(1 + \rho_1 \rho_2)$

Коэффициент отражения: ρ

КСВ: $\sigma = (1 + \rho)/(1 - \rho)$



Пример: рассмотрим нагрузку с $\rho = 0,25$ и генератор с $\rho = 0,45$. Мощность, поступающая в нагрузку Z_0 могла быть на 1,03 дБ ниже, затем до 0,93 дБ выше, чем для ρ нагрузки, равного 0,25

Рисунок 4.1 - Номограмма, позволяющая определить предельное влияние переотражений, когда известны только модули коэффициентов отражения. Погрешность рассогласования ограничивает применение этой номограммы для точных измерений коэффициента шума устройств, которые имеют на входе изолятор.

Шум Джонсона. [19] То же, что и тепловой шум.

Минимальный шум+фактор (F_{min}). См. "Круговые диаграммы коэффициента шума".

Погрешность рассогласования (M_u).

Погрешность рассогласования обусловлена переотражениями между одним устройством (источником) и следующим за ним устройством (нагрузкой). Переотражения вызывают отклонение мощности, выдаваемой источником и поступающей к нагрузке, от её значения при неотражающей нагрузке.

Выражение для мощности, поступающей в нагрузку, с учетом эффектов переотражений имеет вид:

$$P_i = \frac{|b_s|^2}{|1 - \Gamma_s \Gamma_l|^2} \quad (1)$$

где $|b_s|^2$ - мощность, которую источник передает к неотражающей нагрузке;

Γ_s - коэффициент отражения источника;

Γ_l - коэффициент отражения нагрузки.

Если нужна точная оценка мощности поступающей в нагрузку, когда известно $|b_s|^2$, или наоборот, необходимо знать модуль и фазу Γ_s и Γ_l ; для этого, вероятно, потребуется векторный анализатор цепей.

Если фазы коэффициентов отражения неизвестны, предельные значения знаменателя $|1 - \Gamma_s \Gamma_l|^2$ могут быть вычислены по их модулям, например, P_s и P_l . Предельные значения $|1 - \Gamma_s \Gamma_l|^2$ в децибелах могут быть найдены по номограмме, приведенной на рисунке 4.1.

$$M_u = 20 \log(1 \pm P_s P_l)$$

Влияние рассогласования на измерения коэффициента шума проанализировать чрезвычайно сложно. Рассмотрим, например, источник шума, импеданс которого не точно равен 50 Ом.

Источник принимает участие в переотражении его собственного шума, но он также отражает шум, возникающий в ИУ и поступающий со входа ИУ (шум, добавляемый ИУ, в конечном счете зависит от импеданса источника). Изменённый импеданс источника вызывает изменение номинального коэффициента передачи ИУ (следует вспомнить, что номинальный коэффициент передачи тоже является функцией импеданса источника). Ситуация может усложняться и дальше, поскольку импеданс источника может изменяться между “горячим” и “холодным” состояниями [23]. Было предпринято много попыток установить простое эмпирическое правило для оценки влияния рассогласования, но все они имели ограниченный успех. Strid [36] проанализировал один очень важный случай с целью получения особенно простого результата. Strid рассматривал ИУ с включенным на входе изолятором, обеспечивающим достаточно высокую изоляцию для предотвращения взаимодействия последующих устройств с источником шума. Влияние шума, поступающего с входного изолятора, и переотражений между изолятором и источником шума учитывалось в конечном результате. В результате выражение для ошибки коэффициента шума имеет вид:

$$\Delta F(\text{дБ}) = F_{\text{act}}(\log) - F_{\text{ind}}(\text{дБ}) \quad (2)$$

$$= 10 \log \frac{1}{|1 - S_{11} \Gamma_{\text{sh}}|^2} \quad (3)$$

где F_{act} - коэффициент шума неотражающего источника;
 F_{ind} - измеренный коэффициент шума;
 S_{11} - коэффициент отражения в сторону ИУ, например, в сторону входного изолятора;
 Γ_{sh} - коэффициент отражения назад в сторону источника шума, когда он в “горячем” (или включенном) состоянии.

Strid также предположил, что температуры изолятора и T_{cold} равны 290 К. Следует заметить, что результат не зависит от коэффициента шума ИУ, Y-фактора и коэффициента отражения источника шума для T_{cold} .

Погрешность рассогласования может также возникать когда характеризуется шумовой вклад измерительной системы, а также на выходе ИУ при измерении коэффициента передачи. Влияние рассогласования при измерении коэффициента передачи может быть рассчитано путем оценки разности между номинальным и внесённым коэффициентами передачи.

Погрешность рассогласования часто является наиболее существенной при измерениях коэффициента шума. Для коррекции обычно требуется полная характеристика шума (см. “Круговые диаграммы коэффициента шума”) и измерение фаз и амплитуд коэффициентов отражения

N_1	См. “Y-фактор”.
N_2	См. “Y-фактор”
N_{off}	То же, что N_1 . См. “Y-фактор”
N_{on}	То же, что N_2 . См. “Y-фактор”

Добавочный шум (N_a). Часть мощности выходного шума, которая создается источниками внутри испытываемой цепи. Эта часть выходного шума обычно отделяется от той, которая является результатом усиления шума, берущего начало во входном источнике цепи. Иногда этот добавочный шум относят к входному порту, тогда его уровень будет равен добавочной мощности шума на выходе, деленной на коэффициент передачи G .

Шумовая полоса (B). [18, 26] Ширина полосы пропускания эквивалентного фильтра с прямоугольной формой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), которая пропускает такую же величину мощности шума как реальная рассматриваемая система. Уровень вершины полосы пропускания равен коэффициенту передачи мощности преобразователя на некоторой опорной частоте. Опорная частота обычно выбирается либо в середине полосы, либо в точке максимального усиления. Площадь под кривой зависимости коэффициента передачи эквивалентной (прямоугольной) АЧХ от частоты равна площади под кривой зависимости реального коэффициента передачи от частоты. Шумовая полоса определяется следующим уравнением:

$$B = \int_0^{\infty} \frac{G(f)df}{G_0} \quad (1)$$

где G_0 - коэффициент передачи на опорной частоте. Для многокаскадной системы шумовая полоса приблизительно равна ширине полосы на уровне минус 3 дБ.

Коэффициент шума и шум-фактор (NF и F). [7]

На определённой входной частоте шум-фактор есть отношение (1) полной выходной мощности шума на герц на соответствующей выходной частоте, присутствующей на выходном порте, когда шумовая температура входной нагрузки равна стандартной (290 К) на всех частотах, к (2) той части выходной мощности, которая обусловлена входной нагрузкой.

Выходная мощность часто рассматривается как состоящая из двух частей - добавочного шума от устройства, N_a , и усиленного входного шума, например, шума от входной нагрузки, усиленного ИУ, kT_0BG . Тогда коэффициент шума может быть записан следующим образом:

$$F = \frac{N_a + kT_0BG}{kT_0BG} \quad (1)$$

ПРИМЕЧАНИЕ: Характеризовать систему коэффициентом шума имеет смысл, только если указан импеданс (или его эквивалент) входной нагрузки.

Иногда устанавливается различие между коэффициентом шума (NF) и шум-фактором (F) [31]:

$$\text{Коэфф. шума} = 10 \log (\text{шум-фактор}) \quad (2)$$

В этом случае коэффициент шума выражается в децибелах, а шум-фактор в линейных единицах. В других случаях эти величины могут быть взаимозаменяемы. Это не должно вызвать путаницы, поскольку когда принято выражение $10 \log$ (NF) всегда используется символ “дБ” или “dB”. Отсутствие этого символа подразумевает, что имеются в виду линейные единицы

Круговые диаграммы коэффициента

шума. [9, 18] Это относится к линиям постоянного значения коэффициента шума цепи, когда они вычерчиваются на комплексной плоскости импеданса источника, проводимости или коэффициента отражения, принадлежащих этой цепи. Общее выражение для коэффициента шума цепи как функции коэффициента отражения источника, Γ_s имеет вид:

$$F = F_{\min} + \frac{4R_n}{Z_o} \cdot \frac{|\Gamma_{\text{opt}} - \Gamma_s|^2}{|1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2 S (1 - |\Gamma_s|^2)} \quad (1)$$

где Γ_{opt} - коэффициент отражения источника, при котором обеспечивается мин. коэффициент шума цепи, F_{\min} ;
 Z_o - опорн. импеданс для определения Γ_s (обычно 50 Ом);
 R_n - эквивалентное шумовое сопротивление.

Иногда R_n/Z_o задается как одиночный параметр r_n , называемый нормализованным эквивалентным шумовым сопротивлением. Годограф постоянных значений F , вычерченный на комплексной плоскости как функция от Γ_s , имеет форму окружности (круговой диаграммы). Круговые диаграммы коэффициента шума вместе с круговыми диаграммами номинального коэффициента передачи очень полезны разработчикам схем, поскольку позволяют глубже проникнуть в суть оптимизации полной цепи с целью получения низкого коэффициента шума и равномерного коэффициента передачи.

Мера шума (M). [14] Показатель качества, включающий такие параметры, как коэффициент шума и коэффициент передачи цепи, и представляемый выражением:

$$M = \frac{(F - 1)}{1 - \frac{1}{G}} \quad (1)$$

Если два усилителя с различными коэффициентами шума и коэффициентами передачи включаются каскадно, усилитель с самым низким M следует использовать на входе, чтобы получить самый низкий суммарный коэффициент шума. Подобно коэффициенту шума и номинальному коэффициенту передачи мощности, мера шума цепи обычно изменяется при изменении импеданса [9]. Чтобы решить какой усилитель установить первым, следует иметь в виду, что импедансы источников должны быть такими, чтобы F и G для каждого усилителя не зависели от порядка каскадирования. Мера шума используется также для выражения суммарного коэффициента шума каскадного соединения неограниченного количества идентичных цепей. Уравнение для суммарного коэффициента шума, F_{tot} , имеет вид:

$$F_{\text{tot}} = F + \frac{F - 1}{G_a} + \frac{F - 1}{G_a^2} + \frac{F - 1}{G_a^3} + \dots \quad (2)$$

$$F_{\text{tot}} = 1 + \frac{F - 1}{1 - \frac{1}{G_a}} \quad (3)$$

$$F_{\text{tot}} = 1 + M \quad (4)$$

Иногда F_{tot} в уравнении(2) называется мерой шума вместо M в уравнении (1). Следует внимательно отнестись к тому, какое определение используется, поскольку они отличаются на 1.

Шумовая температура (T_a). [1] Температура источника, которая создает номинальную спектральную плотность мощности. Это достигается, когда соответствующие коэффициенты отражения генератора и нагрузки являются комплексно-сопряженными. Соотношение между T_a и минимальной мощностью, P_a , имеет вид:

$$T_a = \frac{P_a}{kB} \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана;
 B - полоса измерения шума

Спектральная плотность мощности в пределах полосы измерения должна быть постоянной. См. также "Эффективная шумовая температура (T_{ne}).

Эквивалентно шумовая температура может быть определена [26] как температура пассивного резистивного источника, создающего такую же номинальную спектральную плотность мощности, как реальный источник.

Теорема Найквиста. См. "Тепловой шум".

Рабочая шумовая температура (T_{op}). [7]

Температура в градусах Кельвина, представляемая выражением:

$$T_a = \frac{P_a}{kB} \quad (1)$$

где N_o - выходная мощность шума/герц от ИУ на определенной частоте, отдаваемая в выходную цепь в рабочих условиях;

k - постоянная Больцмана;
 G - коэффициент передачи мощности преобразователя для сигнала.

ПРИМЕЧАНИЕ: в линейном двухпортовом преобразователе с одной частотой на входе и выходе T_{op} связана с шумовой температурой входной нагрузки T_a и эффективной шумовой температурой на входе T_e следующим соотношением:

$$T_{\text{op}} = T_a + T_e \quad (2)$$

Оптимальный коэффициент отражения (Γ_{opt}). См. "Круговые диаграммы коэффициента шума".

Шум декомпозиции. [26, 39] Отчетливо различимый дополнительный шум, обусловленный беспорядочным перераспределением тока между различными электродами или элементами устройства.

Коэффициент передачи мощности (G_p).

[2, 35, 40] Отношение, на определённой частоте, мощности, отдаваемой цепью в произвольно выбранную нагрузку, P_l к мощности, отдаваемой источником в цепь, P_s .

$$G_p = \frac{P_l}{P_s} \quad (1)$$

Термин “коэффициент передачи мощности” и символ G часто используется, когда это относится к шуму, но, вероятно, под этим подразумевается “номинальный коэффициент передачи мощности (G_a)” или “коэффициент передачи мощности преобразователя (G_t)” или “вносимый коэффициент передачи мощности (G_i)”. Для произвольно выбранных источника и нагрузки коэффициент передачи мощности в цепи определяется уравнением:

$$G_p = |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_l|^2}{|1 - \Gamma_1 S_{22}|^2 (1 - |\Gamma_1|^2)} \quad (2)$$

где

$$\Gamma_1 = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_l}{1 - \Gamma_l S_{22}} \quad (3)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1: G_p является функцией коэффициента отражения нагрузки и разброса параметров цепи, но не зависит от коэффициента отражения источника.

ПРИМЕЧАНИЕ 2: выражение для G_p имеет такой же вид, как для G_a , если Γ_s заменить на Γ_l и S_{11} на S_{22} . G_p часто выражается в децибелах:

$$G_p(\text{дБ}) = 10 \log \frac{P_l}{P_s} \quad (4)$$

Корень из суммы квадратов (RSS)

Метод объединения нескольких индивидуальных погрешностей с известными пределами с целью определения суммарной погрешности. Если некоторое измерение имеет отдельные составляющие погрешности $\pm A$, $\pm B$, $\pm C$ и т.д., то средняя квадратическая погрешность находится по формуле:

$$U_{\text{RSS}} = (A^2 + B^2 + C^2 + \dots)^{1/2} \quad (1)$$

Определение средней квадратической погрешности основывается на том факте, что большинство составляющих погрешности измерения, хотя и систематических и не случайных, являются взаимно независимыми. Поэтому они могут считаться случайными по отношению друг к другу и комбинироваться как случайные переменные.

Эффект второго каскада. Ссылка на эффект каскадного соединения в измерительной ситуации, где ИУ является первым каскадом, а измерительное оборудование - вторым. Измеренный коэффициент шума представляет комбинированную величину, обусловленную каскадным соединением ИУ и измерительного оборудования. Если F_2 шум-фактор собственно измерительной системы, а F_{sys} -комбинированный шум-фактор ИУ и системы, то выражение для шум-фактора ИУ, F_1 , имеет вид:

$$F_1 = F_{\text{sys}} - \frac{F_2 - 1}{G} \quad (1)$$

где G коэффициент передачи ИУ.

ПРИМЕЧАНИЕ: Величина F_2 в уравнении (1) представляет шум-фактор измерительной системы для импеданса источника, соответствующего выходному импедансу ИУ.

Пороговая чувствительность. Самый слабый сигнал, который цепь может надёжно обнаружить. Пороговая чувствительность определяет уровень самого слабого сигнала на входе цепи, который создает на выходе мощность в M раз выше мощности шума, где M должно быть указано. Очень популярным является случай, когда $M = 1$. Для температуры источника 290 К соотношение пороговой чувствительности и коэффициента шума имеет вид:

$$S_i = MkT_0 BF \quad (1)$$

или в децибелах:

$$S_i(\text{дВм}) = -174 \text{ дВм} + F(\text{дБ}) + 10 \log B + 10 \log M \quad (2)$$

Таким образом, в наземных системах, ширина полосы которых известна, пороговая чувствительность зависит только от коэффициента шума.

Дробовой шум. [6, 39] Шум, обусловленный дискретной и хаотической природой электрического тока. Ток не является непрерывным, но квантованным с величиной кванта, ограниченной самой малой единицей заряда ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ Кулон). Кроме того, заряженные частицы движутся хаотически. Приход одной заряженной частицы на некоторую границу не зависит от того, когда пришла предыдущая или когда придут последующие заряженные частицы. При протекании постоянного тока его среднее значение I_0 , но это ничего не говорит о его случайных вариациях и с какими частотами они происходят. Статистический анализ случайного характера потока заряженных частиц приводит к выводу, что средний квадрат вариаций тока имеет равномерное распределение по частоте до её значения, обратно пропорционального времени прихода носителей через устройство. Подобно тепловому шуму, мощность шума создаваемая на сопротивлении нагрузки шумами тока, прямо пропорциональна ширине полосы:

$$i_n^2(f) = 2eI_0 A^2/\text{Hz} \quad (2)$$

Эта формула справедлива для частот, соответствующих периодам, много меньшим времени прохода носителей через устройство. Шумовой ток, протекающий через сопротивление нагрузки, создает вариации мощности, известные как дробовой шум.

Одна боковая полоса (SSB, ОБП). Это понятие указывает на использование только одной из двух основных частотных полос, которые образуются при преобразовании на ПЧ. При обсуждении вопросов, связанных с коэффициентом шума, понятие одной боковой полосы возникло из соображений, связанных с модуляцией в системах связи, где энергия с одной стороны несущей подавляется для более оптимального использования радиочастотного спектра. Многие измерения коэффициента шума выполняются в системах, содержащих понижающее преобразование частоты, использующих смеситель и гетеродин, работающий на частоте $f_{ГЕТ}$, чтобы получить промежуточную частоту $f_{ПЧ}$. Выходная мощность смесителя на ПЧ обычно усиливается усилителем, имеющим ширину полосы В. Некоторые из понижающих преобразователей реагируют только на сигналы, лежащие в полосе В, центрированной на частоте $f_{ГЕТ} + f_{ПЧ}$. Это однополосные измерения в верхней боковой полосе (ВБП). Другие преобразователи реагируют только на сигналы в полосе В, центрированной на частоте $f_{ГЕТ} - f_{ПЧ}$. Это однополосные измерения в нижней боковой полосе (НБП). Есть преобразователи, которые реагируют на сигналы в обеих боковых полосах. Такие измерения называются двухполосными (ДБП). Однополосные системы обычно используют преселекторную фильтрацию или подавление зеркального канала для исключения ненужной боковой полосы.

Часто возникает некорректная ситуация, когда результаты двухполосного измерения коэффициента шума должны быть интерпретированы для однополосных приложений. Причина этого в том, что определение коэффициента шума (см. приложения к термину “Коэффициент шума” в глоссарии) устанавливает, что числитель должен включать шум от всех частот преобразования, включая зеркальные частоты и другие побочные отклики, но знаменатель должен включать только принципиально нужное частотное преобразование. Для систем, которые одинаково реагируют на верхнюю и нижнюю боковые полосы, но где предусмотренное преобразование частоты должно быть только для одной боковой полосы, мощность шума в знаменателе формулы определения должна быть равна половине полной измеренной выходной мощности, обусловленной шумом на входе (в предположении, что коэффициент передачи и ширина полосы одинаковы для обеих боковых полос). Двухполосные измерения коэффициента шума нормально ничем не отличаются. Поскольку источник шума содержит шум на всех частотах, все частотные преобразования дают вклад как в числитель, так и в знаменатель. Таким образом, если в конечном счёте измеряемая цепь имеет полезные сигналы только в одной боковой полосе, но реагирует на шум в обеих боковых полосах, знаменатель в формуле двухполосных измерений становится слишком большим, а измеренный коэффициент шума - слишком малым, обычно в два раза (на 3 дБ) меньше.

Имеются случаи, когда обе боковые полосы содержат полезную информацию, подлежащую обработке. В этих случаях двухполосное измерение коэффициента шума даёт правильный результат и никакой коррекции не требуется. Многие из таких применений связаны с измерением сигналов

излучения, поэтому такой приемник называется радиометром. Радиометры используются в радиоастрономии.

Точечные коэффициент шума и шум-фактор. Эти термины используются, когда нужно подчеркнуть, что коэффициент шума или шум-фактор относится к одной частоте в отличие от того случая, когда он усредняется в широкой полосе частот.

Стандартная шумовая температура (T_0). [7] Стандартная эталонная температура для измерений коэффициента шума; по определению равна 290 К.

T_C , T_c , или T_{cold} . Более “холодная” из двух температур источника шума, обычно в градусах Кельвина, используемая при измерении шумовых характеристик цепей.

T_H , T_h , или T_{hot} . Более “горячая” из двух температур источника шума, обычно в градусах Кельвина, используемая при измерении шумовых характеристик цепей.

T_{off} . Температура, обычно в градусах Кельвина, источника шума, когда он находится в выключенном состоянии (“Off”). Соответствует T_{cold} .

T_{on} . Температура, обычно в градусах Кельвина, источника шума, когда он находится во включенном состоянии (“On”). Соответствует T_{hot} .

Тепловой шум. [19, 26, 30] Тепловой шум обусловлен кинетической энергией частиц тела как результат их конечной температуры. Если некоторые частицы заряжены (ионизированы), кинетическая энергия их колебаний может электрически передаваться другому устройству, если существует подходящий путь передачи. Распределение вероятностей мгновенных значений напряжения соответствует гауссовому закону со средним квадратом напряжения:

$$\overline{e_n^2} = 4 kT \int_{f_1}^{f_2} R(f)p(f)df \quad (1)$$

$$p(f) = \frac{hf}{kT} (e^{\frac{hf}{kT}} - 1)^{-1} \quad (2)$$

≈ 1

- где k - постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);
- T - абсолютная температура в градусах Кельвина;
- R - сопротивление, Ом;
- F - частота, Гц;
- f_1, f_2 - частоты, определяющие полосу, в пределах которой наблюдается напряжение;
- h - постоянная Планка ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Для частот ниже 100 Гц и для $T = 290 \text{ K}$, $| > p(f) > 0,992$;
при $p(f) = 1$ уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \overline{e_n^2} &= 4 kTR(f_2 - f_1) \\ &= 4 kTRB \end{aligned} \quad (3)$$

Номинальная мощность - мощность, передаваемая в комплексно сопряженную нагрузку при абсолютном нуле равна:

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{\overline{e_n^2}}{4R} \\ &= kT (f_2 - f_1) \\ &= kTB \end{aligned} \quad (4)$$

Величина kTB обычно выражается в единицах Дж/с; это то же самое, что Ватт.

Спектральная плотность номинальной мощности kT Вт/Гц. Хотя это понятие появилось для вывода уравнения (3), более фундаментального, чем (4), Найквист [30] впервые пришёл к понятию спектральной плотности мощности (уравнение (4)) и затем вычислил напряжение и ток (уравнение(3)).

Выражение для генератора напряжения имеет вид:

$$e_n^2 df = 4 RkT df \quad (5)$$

Уравнение (5) часто упоминается как теорема Найквиста. Это не следует путать с работой Найквиста в области теории дискретизации и критерия устойчивости, где под теоремой Найквиста понимаются совершенно другие отношения. Когда T равна стандартной температуре T_0 (290K), $kT_0 = 4 \times 10^{-21} \text{ W/Hz} = -174 \text{ dBm/Hz}$.

Краткое исследование выражения kTB показывает, что каждый из его сомножителей имеет свой смысл. Постоянная Больцмана определяет среднюю механическую энергию одной частицы на градус температуры, которая может быть выведена наружу электрическими средствами. Постоянная Больцмана является, таким образом, постоянной преобразования между двумя формами энергии - в форме абсолютной температуры и в джоулях.

Номинальная мощность непосредственно зависит от температуры. Чем выше температура или интенсивнее колебания (выше энергия), тем больше энергии можно вывести в секунду..

Очевидно, что ширина полосы должна быть частью этого выражения. Рассмотрим пример, когда полоса передачи энергии ограничена значениями от 10 до 11 Гц. В этом случае только небольшая часть колебательной энергии, заключенная в этой полосе, может быть выведена наружу. Такая же энергия заключена и в полосе от 11 до 12 Гц (поскольку энергия равномерно распределена по частотному спектру). Если, однако, полоса будет от 10 до 12 Гц, то суммарная энергия в полосе шириной 2 Гц, которая может быть выведена наружу, будет в два раза больше. Поэтому присутствие ширины полосы в выражении для номинальной мощности в полосе оправдано.

Следует подчеркнуть, что выражение kTB представляет мощность, получаемую от устройства. Эта мощность может быть выведена только на оптимальную нагрузку, комплексно - сопряженный импеданс, который находится при температуре абсолютного нуля, и который поэтому не отражает никакой энергии.

Могло показаться, что номинальная мощность должна зависеть от физического размера тела или от числа заряженных носителей и, следовательно, от сопротивления. Могло бы показаться, что тело большего размера, содержащее больше суммарной энергии на градус и больше заряженных частиц, может обеспечить больше путей для передачи энергии. Но не трудно показать на примере, что номинальная мощность не зависит от размера или сопротивления. Рассмотрим систему, состоящую из крупного объекта при определенной температуре, электрически соединенного с малым объектом при такой же температуре. Если бы существовал чистый поток мощности от крупного объекта к малому, то крупный объект стал бы холоднее, а малый объект - теплее. Но это противоречит опыту и второму закону термодинамики. Это означает, что мощность от крупного объекта должна быть такой же как от малого. Аналогичное соображение применимо и к комбинации большого и малого сопротивлений, представляющих крупный и малый объекты.

Это означает, что если источник шума излучает энергию, он должен охлаждаться. Обычно так и происходит, но что касается электрического оборудования, любая энергия, уносимая передачей мощности шума настолько мала, что она быстро пополняется из окружающей среды с той же скоростью. Это происходит потому, что источники шума находятся в тепловом равновесии с внешней средой.

Коэффициент передачи преобразователя по мощности (G_t). [2, 35, 40] Отношение, на определенной частоте, мощности отдаваемой цепью в произвольную нагрузку, P_1 к мощности, получаемой от источника, P_{as}

$$G_t = \frac{P_1}{P_{as}} \quad (1)$$

Для источника с интенсивностью $|b_s|^2$ и с коэффициентом отражения Γ_s , и для коэффициента отражения нагрузки Γ_1 .

$$P_{as} = \frac{|b_s|^2}{1 - |\Gamma_s|^2} \quad (2)$$

$$P_1 = \frac{|b_s|^2 |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_1|^2)}{|(1 - \Gamma_s S_{11})(1 - \Gamma_1 S_{22}) - \Gamma_1 \Gamma_s S_{12} S_{21}|^2} \quad (3)$$

где S-параметры относятся к ИУ. Эквивалентное выражение для P_1 имеет вид:

$$P_1 = \frac{|b_s|^2 |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_1|^2)}{|1 - \Gamma_s S_{11}|^2 |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|^2} \quad (4)$$

где

$$\Gamma_2 = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_s}{1 - \Gamma_s S_{11}} \quad (5)$$

Тогда коэффициент передачи преобразователя:

$$G_t = |S_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_s|^2) (1 - |\Gamma_1|^2)}{|(1 - \Gamma_s S_{11})(1 - \Gamma_1 S_{22}) - \Gamma_1 \Gamma_s S_{12} S_{21}|^2} \quad (6)$$

$$G_t = |S_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_s|^2) (1 - |\Gamma_1|^2)}{|1 - \Gamma_s S_{11}|^2 |1 - \Gamma_1 \Gamma_2|^2} \quad (7)$$

Коэффициент передачи преобразователя является функцией коэффициентов отражения источника и нагрузки, а также параметров цепи.

Термин "преобразователь" появляется потому, что здесь оценивается результат сравнения мощности поступающей от произвольного генератора через ИУ на произвольную нагрузку с мощностью поступающей на нагрузку через преобразователь без потерь, который передает в нагрузку всю имеющуюся мощность генератора.

Коэффициент передачи преобразователя часто измеряется в децибелах:

$$G_t(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_1}{P_{as}} \quad (8)$$

Белый шум. Шум, у которого спектральная плотность мощности (Вт/Гц) постоянна в пределах интересующего диапазона частот. Термин "белый" заимствован из бытового понятия белого цвета, являющегося композицией всех цветов, и, следовательно, содержащего все частоты.

Худший случай погрешности. Метод определения погрешности с большим запасом. Основан на комбинировании нескольких индивидуальных погрешностей измерения с известными пределами для формирования суммарной погрешности измерения. Каждая индивидуальная погрешность предполагается равной своему пределу в направлении, которое позволяет комбинировать их с другими индивидуальными погрешностями так, чтобы получить их максимальный вклад в погрешность результата измерения.

Y+фактор. Отношение мощности N_2 к N_1 при измерениях коэффициента шума, где N_2 - измеренная мощность шума на выходе испытываемой цепи, когда импеданс источника включен или находится при его "горячей" температуре, а N_1 - измеренная мощность шума на выходе цепи, когда импеданс источника выключен или находится при его "холодной" температуре.

5. References

- [1] **Accuracy Information Sheet**, United States National Bureau of Standards (NBS), enclosure returned with noise sources sent to NBS for calibration.
- [2] Anderson, R.W. **S-Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design**, Hewlett-Packard Application Note 95-1.
- [3] Beatty, Robert W. **Insertion Loss Concepts**, Proc. of the IEEE, June, 1964, pp. 663-671.
- [4] Boyd, Duncan **Calculate the Uncertainty of NF Measurements**. "Microwaves and RF", October, 1999, p.93.
- [5] Chambers, D. R. **A Noise Source for Noise Figure Measurements**, Hewlett-Packard Journal, April, 1983, pp. 26-27.
- [6] Davenport, Wilbur B. Jr. and William L. Root. **An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise**, McGraw-Hill Book Co., Inc, New York, Toronto, London, 1958.
- [7] **Description of the Noise Performance of Amplifiers and Receiving Systems**, Sponsored by IRE subcommittee 7.9 on Noise, Proc. of the IEEE, March, 1963, pp. 436-442.
- [8] Friis, **H.T. Noise Figures of Radio Receivers**, Proc. of the IRE, July, 1944, pp. 419-422.
- [9] Fukui, H. **Available Power Gain, Noise Figure and Noise Measure of Two-Ports and Their Graphical Representations**, IEEE Trans. on Circuit Theory, June, 1966, pp. 137-143.
- [10] Fukui, H. (editor) **Low Noise Microwave Transistors and Amplifiers**, IEEE Press and John Wiley & Sons, New York, 1981. (This book of reprints contains many of the articles referenced here.)
- [11] Gupta, M-S. **Noise in Avalanche Transit-Time Devices**, Proc. of the IEEE, December, 1971, pp. 1674-1687.
- [12] Haitz, R.H. and F.W. Voltmer. **Noise Studies in Uniform Avalanche Diodes**, *Appl. Phys. Lett.*, 15 November, 1966, pp. 381-383.
- [13] Haitz, R.H. and F.W. Voltmer. **Noise of a Self Sustaining Avalanche Discharge in Silicon: Studies at Microwave Frequencies**, *J. Appl. Phys.*, June 1968, pp. 3379-3384.
- [14] Haus, H.A. and R.B. Adler. **Optimum Noise Performance of Linear Amplifiers**, Proc. of the IRE, August, 1958, pp. 1517-1533.
- [15] Hines, M.E. **Noise Theory for the Read Type Avalanche Diode**, IEEE Trans. on Electron devices, January, 1966, pp. 158-163.
- [16] **IRE Standards on Electron Tubes. Part 9, Noise in Linear Two-Ports**, IRE subcommittee 7.9, Noise, 1957.
- [17] **IRE Standards on Electron Tubes: Definitions of Terms, 1962 (62 IRE 7.52)**, Proc. of the IEEE, March, 1963, pp. 434-435
- [18] **IRE Standards on Methods of Measuring Noise in Linear Twoports, 1959**, IRE Subcommittee on Noise, Proc. of the IRE, January, 1960, pp. 60-68. See also **Representation of Noise in Linear Twoports**, Proc. of the IRE, January, 1960, pp. 69-74.
- [19] Johnson, J.B. **Thermal Agitation of Electricity in Conductors**, Physical Review, July, 1928, pp. 97-109.
- [20] Kanda, M. **A Statistical Measure for the Stability of Solid State Noise Sources**, IEEE Trans. on Micro. Th. and Tech, August, 1977, pp. 676-682.
- [21] Kanda, M. **An Improved Solid-State Noise Source**, IEEE Trans. on Micro. Th. and Tech, December, 1976, pp. 990-995.
- [22] Kuhn, N.J. **Simplified Signal Flow Graph Analysis**, "Microwave Journal", November 1963, pp. 59-66.
- [23] Kuhn, N.J. **Curing a Subtle but Significant Cause of Noise Figure Error**, "Microwave Journal", June, 1984, p. 85.
- [24] **Maximizing Accuracy in Noise Figure Measurements**, Hewlett Packard Product Note 85719A-1, July 1992, (5091-4801E).
- [25] Mumford, W.W. **A Broadband Microwave Noise Source**, Bell Syst. Tech. J., October, 1949, pp.608-618.
- [26] Mumford, W.W. and Elmer H. Scheibe. **Noise Performance Factors in Communication Systems**, Horizon House-Microwave, Inc., Dedham, Massachusetts, 1968.

- [27] NBS Monograph 142, **The Measurement of Noise Performance Factors: A Metrology Guide**, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1974.
- [28] NBS Technical Note 640, **Considerations for the Precise Measurement of Amplifier Noise**, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1973.
- [29] **Noise Parameter Measurement Using the HP 8970B Noise Figure Meter and the ATN NP4 Noise Parameter Test Set**, Hewlett Packard Product Note HP 8970B/S-3, December, 1998, (5952-6639).
- [30] Nyquist, H. **Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors**, Physical Review, July, 1928, pp. 110-113.
- [31] Oliver, B.M. **Noise Figure and Its Measurement**, Hewlett-Packard Journal, Vol. 9, No. 5 (January, 1958), pp. 3-5.
- [32] Saam, Thomas J. **Small Computers Revolutionize G/T Tests**, "Microwaves", August, 1980, p. 37.
- [33] Schwartz, Mischa. **Information Transmission, Modulation and Noise**, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, Toronto, London, 1959.
- [34] Slater, Carla **Spectrum-Analyzer-Based System Simplifies Noise Figure Measurement**, "RF Design", December, 1993, p. 24.
- [35] **S-Parameter Design**, Hewlett Packard Application Note 154, March, 1990, (5952-1087).
- [36] **Strid, E. Noise Measurements For Low-Noise GaA FET Amplifiers**, Microwave Systems News, November 1981, pp. 62-70.
- [37] Strid, E. **Noise Measurement Checklist Eliminates Costly Errors**, "Microwave Systems News", December, 1981, pp. 88-107.
- [38] Swain, H. L. and R. M. Cox **Noise Figure Meter Sets Record for Accuracy, Repeatability, and Convenience**, Hewlett-Packard J., April, 1983, pp. 23-32.
- [39] van der Ziel, Aldert. **Noise: Sources, Characterization, Measurement**, Pentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.
- [40] Vendelin, George D., **Design of Amplifiers and Oscillators by the S-Parameter Method**, Wiley-Interscience, 1982.
- [41] Wait, D.F., **Satellite Earth Terminal G/T Measurements**, "Microwave Journal", April, 1977, p. 49.

6. Дополнительные ресурсы, литература и программные средства, предоставляемые компанией Keysight

10 Hints for Making Successful Noise Figure Measurements,

Application Note 1341,
literature number 5980-0288E

Noise Figure Measurement Accuracy,

Application Note 57-2, literature number 5952-3706

Calculate the Uncertainty of NF Measurements

Software and web-based tool available at:
www.keysight.com/find/nfu

User guides for Keysight noise figure products
available at: **www.keysight.com/find/nf**

Component Test web site:
www.keysight.com/find/component_test

Spectrum analysis web sites:
www.keysight.com/find/psa_personalities
www.keysight.com/find/esa_solutions



[myKeysight](#)

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированное отображение интересующей вас информации

[www.lxistandard.org](#)

LXI является преемником шины GPIB. Построенная на базе стандарта локальной сети (LAN), LXI обеспечивает более высокое быстродействие и более эффективные возможности подключения. Компания Keysight является членом учредителем консорциума LXI..



Три Года Стандартной Заводской Гарантии

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

Keysight обеспечивает высочайшее качество продукции и снижение общей стоимости владения. Единственный производитель контрольно-измерительного оборудования, который предлагает стандартную трехлетнюю гарантию на все свое оборудование.



Keysight Планы Технической Поддержки

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/quality

Keysight Electronic Measurement Group
KEMA Certified ISO 9001:2008
Quality Management System

Торговые партнёры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

По этому адресу пользователь может получить лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерительной техники и широкая номенклатура выпускаемой продукции компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнёрами.

Российское отделение Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб.,
52,

стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973952

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: russia.ssu@keysight.com

Ранее этот документ назывался
Рекомендациями по применению 57-1