Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновом диапазонах
Часть 2

Максим Соковишин, Keysight Technologies

В статье разбираются основные понятия, которые используются при измерении и вычислении шумовых характеристик радиоэлектронных устройств и их компонентов. Во второй части статьи делается акцент на методах и инструментах для измерения коэффициента шума.

Измерение коэффициента шума

Линейность мощности шума

В основе большинства измерений коэффициента шума лежит фундаментальная характеристика линейных двухпортовых устройств – линейная зависимость мощности шума на выходе устройства от мощности шума на входе, или шумовой температуры источника. При импедансе источника с температурой абсолютного нуля выходная мощность шума состоит исключительно из мощности N_a, добавленной тестируемым устройством. Для других температур источника выходная мощность шума складывается из теплового шума от источника, усиленного в соответствии с коэффициентом передачи тестируемого устройства. Если угол наклона прямой (см. рис. 5) и опорная точка известны, можно найти выходную мощность, соответствующую величине N_a. Зная N_a, можно вычислить коэффициент шума, или эффективную шумовую температуру на входе (см. первую часть статьи). Чтобы получить линейную зависимость при измерениях коэффициента шума, схему автоматической регулировки усиления нужно отключить.

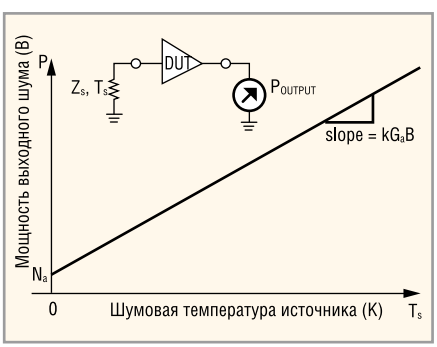


Рис. 5. Зависимость выходной мощности шума линейных двухпортовых устройств от температуры источника

Рис. 6. Источник шума серии SNS

Источники шума

Один из способов определения угла наклона графика шума заключается в подаче на тестируемое устройство двух различных уровней входного шума и замерах изменения выходной мощности. Источник шума представляет собой устройство, которое может выдать эти два заранее известных уровня шума. Наиболее популярный источник шума состоит из специального диода с малой ёмкостью, который генерирует шум, будучи обратно смещённым в область лавинного пробоя напряжением постоянного тока. Прецизионные источники шума, такие как Keysight SNS (см. рис. 6), имеют выходной аттенюатор, обеспечивающий низкий КСВ для уменьшения ошибок рассогласования при измерениях. Если имеется разница импедансов во включённом и выключенном состоянии, может появиться ошибка в измерении коэффициента шума. Для минимизации этого эффекта источник шума N4000A обеспечивает большее ослабление. Когда диод смещён, уровень шума на выходе больше величины kT_cB – из-за лавинного режима генерации шума в диоде. Когда диод не смещён, на выходе присутствует тепловой шум, создаваемый в аттенюаторе, равный kT_cB. Эти уровни шума называют Hot («горячий») и Cold («холодный») и обозначают как T_h и T_c соответственно. Источник шума N4001A создаёт уровни шума, приблизительно эквивалентные температуре 10 000 K во включённом состоянии и 290 K в выключенном. Компания Keysight поставляет диодные источники шума в диапазонах до 50 ГГц.

Для измерения коэффициента шума источник шума должен иметь калиброванный уровень выходного шума, представленный избыточным коэффициентом шума (Excess Noise Ratio, ENR). Калибровочная информация ENR для источника шума поставляется производителем. В случае приборов серии SNS она хранится во внутреннем электрически перепрограммируемом ПЗУ. Другие источники шума поставляются с данными, содержащимися на дискете или в виде твёрдой копии.

Коэффициент ENR_{db}, выраженный в децибелах (дБ), равен отношению $(T_h - T_c) / T_o$, где $T_o = 290$ K. Следует отметить, что источник шума с ENR, равным 0 дБ, создаёт разницу температуры в 290 K между включённым (On) и выключенным (Off) состояниями. Вопреки распространённому мнению, ENR не отражает уровень шума в состоянии On относительно kTB.

$$ENR_{dB} = 10\log\left(\frac{T_h - T_c}{T_0}\right). \qquad (3.1)$$

Предполагается, что когда калибровка выполнена, температура T_c в уравнении (3.1) равна 290 K. Когда источник шума используется при различных физических температурах, в результаты измерений должна вноситься компенсационная поправка. Источник шума серии SNS имеет температурный датчик, информация с которого может считываться анализатором NFA компании Keysight.

Источники шума могут быть откалиброваны по переносному эталонному источнику шума (в соответствии со стандартом NSTL) или по первичному физическому эталону, такому как «горячая/холодная» нагрузка. Большинство источников шума снабжаются информацией об ENR в зависимости от частот.

Газоразрядные трубки, встроенные в волноводные структуры, генерируют шум, обусловленный кинетической энергией плазмы. Традиционно они использовались как источники шума в диапазоне миллиметровых волн. Позднее они стали заменяться твёрдотельными шумовыми диодами на частотах ниже 50 ГГц. Шумовые диоды проще в эксплуатации и обычно являются более стабильными источниками шума. Шумовые диоды чаще имеют коаксиальную конструкцию, но на выходе из волновода могут применяться интегральные прецизионные волноводные адаптеры (см. рис. 7).

Метод Y-фактора

Метод Y-фактора лежит в основе большинства измерений коэффициента шума, выполняемых внутренними средствами анализатора коэффициента шума как в ручном, так и автоматическом режимах. При использовании источника шума этот метод позволяет определять внутренний шум в тестируемом устройстве и, следовательно, коэффициент шума или эффективную температуру входного шума.

С помощью источника шума, подключённого к тестируемому устройству, можно измерить выходную мощность, соответствующую On- и Off-состояниям источника шума (N_2 и N_1 соответственно). Отношение этих двух мощностей называется Y-фактором. Детектором мощности в данных измерениях может служить 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 – линейный и способен очень точно фиксировать изменения уровня мощности. Точность измерения абсолютного уровня мощности в данном случае не имеет большого значения, поскольку измеряться должно отношение мощностей:

$$Y = \frac{N_2}{N_1} \quad . (3.3)$$

Иногда это отношение измеряется в децибелах. В этом случае:

$$Y = 10^{\frac{Y_{db}}{10}}. \quad (3.4)$$

Y-фактор и ENR могут использоваться для определения крутизны графика изменения мощности шума тестируемого устройства (как показано на рисунке 5). Поскольку калиброванный ENR-источник шума представляет собой опорный уровень входного шума, можно вывести уравнение для вычисления внутреннего шума тестируемого устройства (N_a). В современном анализаторе шума это делается автоматически, путём переключения источника шума между состояниями On и Off и выполнения соответствующих вычислений.

$$N_a = kT_0BG_1\left(\frac{ENR}{Y-1} - 1\right). \quad (3.5)$$

Отсюда можно вывести очень простое выражение для шум-фактора, которое отражает полный шум-фактор системы (F_{sys}), включающий шумовой вклад всех её компонентов. В этом случае шум, создаваемый в измерительном приборе, расценивается как вклад второго каскада. Если тестируемое устройство имеет высокий коэффициент передачи ($G_1 >> F_2$), шумовой вклад второго каскада будет малым. Когда коэффициент шума второго каскада и коэффициент передачи тестируемого устройства известны, вклад второго каскада можно не учитывать. Обратите внимание, что коэффициент передачи устройства не требуется для вычисления F_{sys}.

$$F_{sys} = \frac{ENR}{Y-1}. \quad (3.6)$$

Уравнение (3.6) можно модифицировать для условия, когда «холодная» температура источника шума (T_c) не равна эталонной температуре T_0 (290 K):

$$F_{sys} = \frac{ENR - Y\left(\frac{T_c}{T_0} - 1\right)}{Y-1}. \quad (3.7)$$

Метод генератора сигналов с удвоением мощности

Этот метод был популярен до появления источников шума. Сегодня он остаётся полезным для устройств с высоким коэффициентом шума, где Y-фактор может быть настолько мал, что его трудно точно измерить. Сперва измеряется выходная мощность устройства, когда на его входе имеется нагрузка с температурой приблизительно 290 K. Затем подключается генератор сигналов с частотой в пределах полосы измерения. Мощность выходного сигнала генератора устанавливается с таким расчётом, 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 тестируемого устройства при этом знать не нужно.

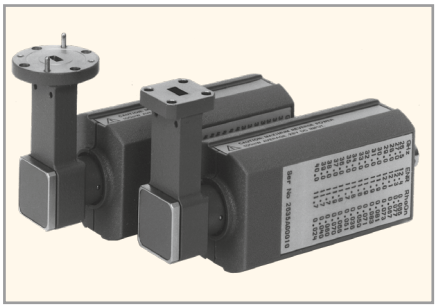


Рис. 7. Волноводные источники шума R/Q 347B

$$F_{sys} = \frac{P_{gen}}{kT_0B}. \quad (3.8)$$

Метод прямого измерения шума

Этот метод также полезен для тестирования устройств с высоким коэффициентом шума. Выходная мощность устройства измеряется при входной нагрузке с температурой около 290 K. Если коэффициент передачи устройства и шумовая полоса измерительной системы известны, шум-фактор можно рассчитать по формуле:

$$F_{sys} = \frac{N_0}{kT_0BG}. \quad (3.9)$$

При использовании этого метода должна быть известна шумовая полоса (B), а устройство измерения мощности должно быть высокочувствительным и обеспечивать точность измерения. В отличие от метода удвоения мощности, в данном случае коэффициент передачи тестируемого устройства должен быть известен.

Коррекция коэффициента шума и коэффициента передачи

Переписав приведённое в первой части статьи уравнение (2.2) для F_1, можно найти фактический шум-фактор тестируемого устройства:

$$F_1 = F_{sys} - \frac{F_2 - 1}{G_1}. \quad (3.10)$$

Коэффициент передачи тестируемого устройства и шум-фактор измерительной системы (F_2) можно определить путём дополнительного измерения источника шума. Этот шаг называется калибровкой системы. Калибровка обычно выполняется с помощью анализатора коэффициента шума перед подключением тестируемого устрой-

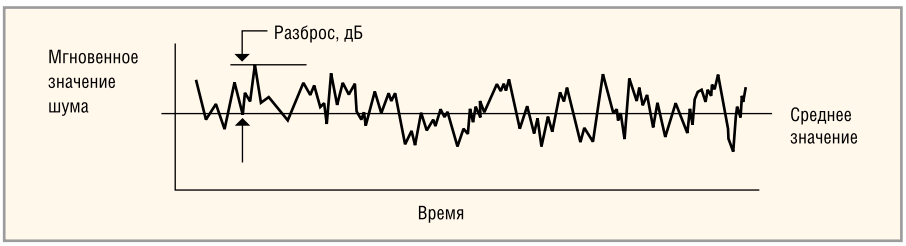


Рис. 8. Шумовые флуктуации вокруг среднего значения

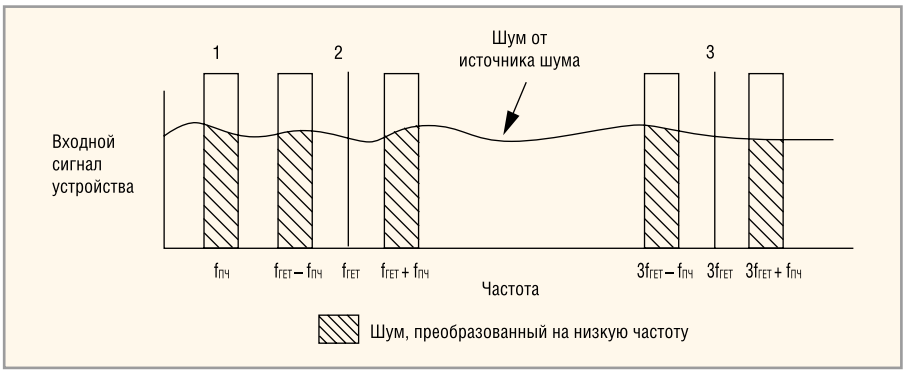


Рис. 9. Механизмы преобразования шума в смесителях и преобразователях частоты:
1 – прямое прохождение сигнала ПЧ; 2 – двухполосное преобразование; 3 – преобразование на гармониках

ства, поэтому внесённые поправки могут использоваться во всех последующих измерениях, а на дисплее будет отображаться скорректированное значение коэффициента шума. Все вычисления, необходимые для определения коэффициента передачи и скорректированного коэффициента шума, выполняются автоматически внутри системы.

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. Это значение с соответствующими поправками можно использовать для вычисления фактического коэффициента шума устройства. Теоретически определение истинного среднего значения шума требует бесконечно долгих измерений, на практике оно выполняется в ограниченном интервале времени (см. рис. 8). Разница между измеренным и истинным средними значениями флуктуирует, что приводит к ухудшению повторяемости результатов.

Для малых значений разброса девиация пропорциональна величине $1/\sqrt{t}$. Поэтому при большем времени измерения результат будет лучше – при усреднении учитывается большее количество событий, и его результат оказывается 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 на единицу времени. Коэффициент шума рекомендуется измерять в максимально широкой полосе, которая, однако, должна быть уже, чем шумовая полоса тестируемого устройства.

Преобразователи частоты

Преобразователи частоты, такие как приёмники и смесители, обычно разрабатываются для преобразования частоты из высокочастотного (ВЧ) диапазона в диапазон промежуточных частот (ПЧ). Соотношения для коэффициента шума, обсуждаемые в данной статье, применимы как к преобразователям частоты, так и к устройствам без преобразования. Однако у этих устройств есть ряд дополнительных особенностей, которые могут влиять на измерения коэффициента шума. В дополнение к тестируемому устройству, которое само по себе является преобразователем частоты, измерительная система иногда использует смеситель для расширения диапазона частот измерения.

Потери

Усилители дают свойственное им усиление, тогда как пассивные смесители дают потери. Все уравнения для коэффициента шума к ним применимы, однако линейные значения коэффициента передачи будут меньше единицы. Одно из связанных с этим осложнений возникает при использовании уравнения коэффициента шума для каскадного включения: шумовой вклад второго каскада может быть основным (см. уравнение 2.2 в первой части статьи). Другое осложнение возникает при использовании метода Y-фактора: пассивные смесители могут иметь малый Y-фактор вследствие высоких коэффициентов шума. Это может увеличить погрешность измерения. Для получения более высокого Y-фактора можно использовать источники шума с высоким ENR.

Шумы гетеродина

Приёмники и смесители имеют локальный гетеродин (ГЕТ), сигнал которого может содержать шум. Преобразовываясь в смесителе на промежуточную частоту, этот шум может вносить дополнительный вклад в коэффициент шума системы. Величина такого 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 также возникать помехи более высокого порядка преобразования, вносящие свой вклад, если уровень шумов гетеродина очень высок. Для устранения шумов преобразования на гармониках частоты гетеродина можно использовать 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 тестируемого устройства и может считаться допустимым для конкретного случая. Когда измеряется коэффициент шума, сигнал гетеродина может перегружать измерительный прибор или создавать другие побочные продукты преобразования. Такое возможно, когда измерительная система имеет на входе широкополосный усилитель или другие не защищённые фильтром цепи. Часто на входе прибора устанавливают фильтр для исключения просачивания сигнала гетеродина.

Нежелательные отклики

Иногда целевая полоса частот ВЧ-сигнала является не единственной, которая преобразуется в ПЧ. Преобразование нежелательных частотных полос может происходить, если они присутствуют на ВЧ-входе вместе с полезным сигналом. В числе таких нежелательных полос:

- 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 так далее);
- побочные составляющие и сигналы прямого прохождения ПЧ (см. рис. 9).

Обычно, особенно в приёмниках, отклики на эти сигналы незначительны благодаря внутренней фильтрации. Но во многих других устройствах, особенно в смесителях, один или более откликов на такие сигналы могут присутствовать и вносить дополнительные помехи в полосу ПЧ.

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

Приборы для измерения коэффициента шума

Анализаторы коэффициента шума

Анализаторы коэффициента шума – новейший этап развития технических решений для измерения коэффициента шума. В базовой конфигурации 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, используя метод Y-фактора.

Анализатор отображает на дисплее коэффициент шума и коэффициент передачи в режиме свипирования частоты сигнала, а также связанные элементы, такие как маркеры и ограничительные линии. Анализаторы коэффициента шума Keysight серии NFA (см. рис. 10) в комбинации с источниками шума серии SNS обеспечивают повышенные точность и скорость измерений, что важно в условиях производства. Анализаторы серии NFA специально разработаны и оптимизированы для конкретной цели – измерения коэффициента шума. У комбинированных приборов, предназначенных для выполнения и других измерений, точность, как правило, ниже.

Анализаторы сигналов/спектра

Анализаторы сигналов/спектра часто используются для измерения коэффициента шума, поскольку, как правило, они уже присутствуют в испытательной стойке для ВЧ- и микроволновых устройств различного назначения. При наличии соответствующего программного обеспечения и контроллера, они могут применяться для измерения коэффициента шума любым из вышеперечисленных методов. Эти анализаторы особенно полезны для испытания устройств с высоким коэффициентом шума при использовании метода генератора сигналов или метода непосредственного измерения шума.

Изменяемые полосы пропускания позволяют измерять параметры узкополосных устройств. Приложение для измерения коэффициента шума на анализаторах сигналов серии X (см. рис. 11) обеспечивает измерения коэффициента шума и коэффициента передачи, сопоставимые с таковыми на анализаторе коэффициента шума серии NFA.

Анализатор сигналов PXA с программой для измерения коэффициента шума N9069A

Одно из преимуществ анализатора коэффициента шума на базе 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 измерить коэффициент шума устройства на частотах, где эти сигналы не будут создавать помех.

Анализаторы сигналов/спектра, даже с внутренним предусилителем, не могут находить столь низкие коэффициенты шума, как специализированный прибор NFA. Поэтому для устройств с низким коэффициентом передачи (или большими потерями) рекомендуется применять либо NFA, либо дополнительный внешний малошумящий предусилитель, чтобы повысить чувствительность анализатора сигналов. Для частот ниже 10 МГц анализаторы сигналов/спектра предпочтительнее, чем NFA. Анализатор X-серии PXA с прикладной измерительной программой имеет функцию внутренней калибровки (Internal Cal), что существенно повышает удобство работы оператора, избавляя от необходимости полностью проходить этап калибровки. В остальном функциональные характеристики анализатора PXA с программой для измерения коэффициента шума такие же, как у NFA.

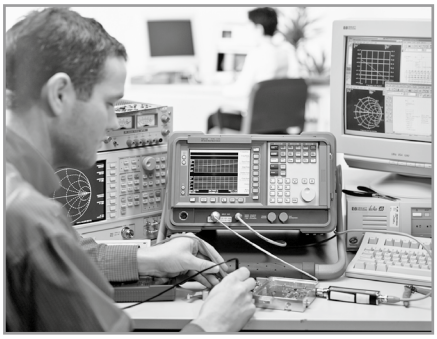


Рис. 10. Анализатор коэффициента шума серии NFA

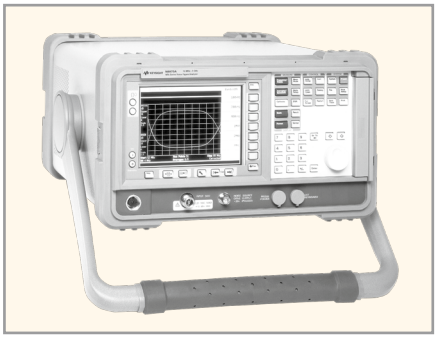


Рис. 11. Анализатор сигналов серии X с источником шума серии SNS

Анализаторы цепей

Как и анализаторы спектра, анализаторы цепей являются широко распространёнными в индустрии многоцелевыми приборами. Есть приборы, которые предлагают измерение коэффициента шума в дополнение к обычным измерениям параметров цепей. Их преимущество – в возможности измерять и другие характеристики устройств, например, коэффициенты передачи и согласования. Но поскольку измерения параметров цепей обычно выполняются при одной и той же внутренней архитектуре приёмника, в слу-

чае использования их для измерения коэффициента шума могут возникать некоторые ограничения.

Анализаторы цепей могут измерять S-параметры устройства, а данные этих измерений могут помочь уменьшить погрешность измерения коэффициента шума за счёт коррекции рассогласования. В идеальном случае коррекция могла бы обеспечить более точное измерение коэффициента передачи устройства и точнее учесть шумовой вклад второго каскада. На практике измерение шумовых параметров требует, в дополнение к анализатору, использования устройства настройки импеданса и программного обеспечения. Коррекция ошибки в анализаторе цепей в основном является его преимуществом при измерении и вычислении коэффициента передачи.

Установки для измерения шумовых параметров

Испытательная установка для измерения шумовых параметров устройств обычно применяется совместно с программным обеспечением, векторным анализатором цепей и анализатором шума. Полученные шумовые параметры могут использоваться для вычисления минимального коэффициента шума, оптимального импеданса источника и влияния импеданса источника на коэффициент шума. Установка имеет тюнер импеданса для тестируемого устройства. Внутренние цепи обеспечивают питание тестируемых полупроводниковых устройств. Источник шума подключается к установке и позволяет измерять коэффициент шума при различных импедансах источника. Импеданс источника измеряется анализатором цепей. На основании этих данных можно получить полный набор шумовых параметров устройства. Как правило, измеряется также полный набор S-параметров, так что параметры передачи устройства также известны.

Поскольку количество выполняемых измерений велико, получение полного набора шумовых параметров устройства проходит намного медленнее, чем в случае обычного измерения коэффициента шума. Однако оно позволяет определить многие полезные параметры конструкции. Для малошумящих транзисторов шумовые параметры обычно указываются в их паспортных данных. В случае компонентов и узлов, которые предполагается использовать в хорошо согласованных 50- или 75-омных системах, шумовые параметры обычно не измеряются, поскольку импеданс источника зависит от прикладной задачи.

Измерители мощности и вольтметры истинного среднеквадратического значения

Измерители мощности и вольтметры истинного среднеквадратического значения могут использоваться как базовые приборы для измерения уровня сигнала, измерения коэффициента шума любым из описанных методов, но с применением дополнительных ручных или компьютерных вычислений. Поскольку эти приборы являются широкополосными устройствами, требуется фильтр для ограничения их полосы, которая должна быть у́же, чем у тестируемого устройства. Обычно такие фильтры настраиваются на фиксированную частоту и позволяют проводить измерения только на ней.

Литература

1. 10 Hints for Making Successful Noise Figure Measurements. Application Note 1341. Literature number 5980-0288E.
2. Noise Figure Measurement Accuracy. Application Note 57-1. Literature number 5952-8255.
3. Noise Figure Measurement Accuracy. Application Note 57-2. Literature number 5952-3706.
4. Calculate the Uncertainty of NF Measurements (Software and Web-Based Tool). www.keysight.com/find/nfu.
5. User Guides for Keysight Noise Figure Products. www.keysight.com/find/nf.
6. Component Test. www.keysight.com/find/component_test.
7. Spectrum analysis. www.keysight.com/find/psa_personalities. www.keysight.com/find/esa_solutions.

Новости мира News of the World Новости мира

Система для исследования облика будущей связи 5G

13 мая 2015 г. в рамках выставки «Связь-Экспокомм 2015» компания Keysight Technologies провела семинар, посвящённый системам беспроводной связи 5G. Несмотря на то, что сейчас стандарта сетей 5G ещё нет, а только наметились общие направления исследований в этой сфере, семинар вызвал огромный интерес у аудитории, количество участников превысило 50 человек.

Поколения систем сотовой связи (стандарты, определяющие работу этих систем) обновляются примерно раз в десять лет. Системы 3G (IMT-2000) работают по всей стране более 10 лет, с 2014 г. идёт активное внедрение систем 4G (IMT-Advanced). Однако потребности в скорости передачи данных растут опережающими темпами, поэтому разработчики в разных странах уже приступили к экспериментам по созданию нового стандарта для мобильных сетей – 5G (IMT-2020). Россия может стать первой в мире страной, где будет полноценно протестирована сеть 5G: уже объявлено о совместных работах российского оператора мобильной связи по запуску сети 5G к Чемпионату мира по футболу, который пройдёт в России летом 2018 г.

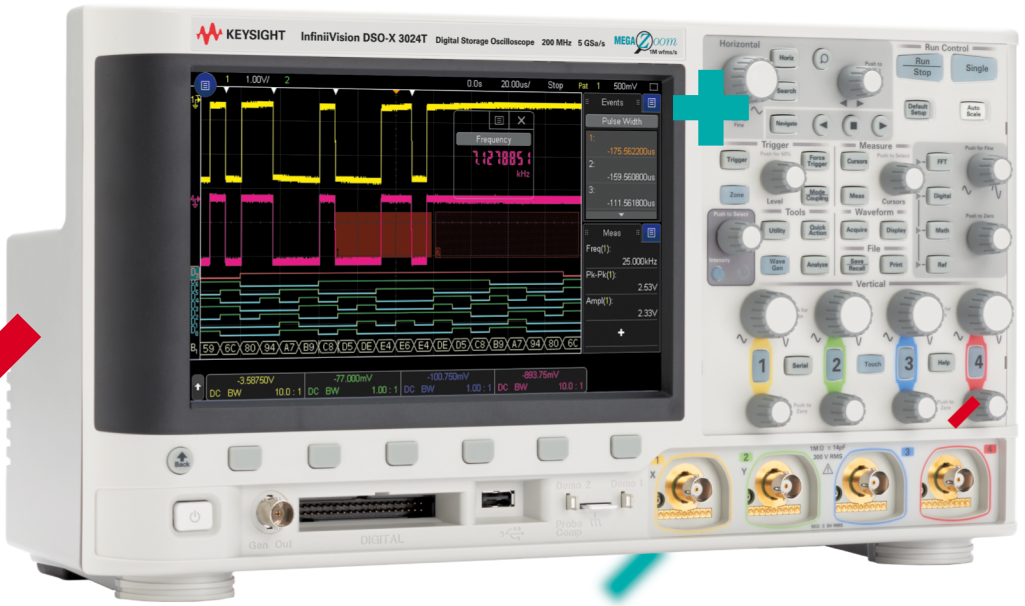
Компания Keysight Technologies представила слушателям семинара свой обширный опыт в создании фундаментальных решений для измерений как на уровне программного обеспечения, так и в области оборудования.

Ключевые технологии, которые будут определять облик систем 5G – это микроэлектронные технологии цифровых интегральных схем, технологии обеспечения энергетической и спектральной эффективности, технологии передачи в миллиметровом диапазоне, волоконно-оптические технологии.

В ходе семинара были представлены решения для измерений параметров каналов мм-диапазона, в том числе – для MIMO-систем. Данный измерительный комплекс за счёт программных и аппаратных решений позволяет проводить измерения в реальном времени, получать мгновенные значения сигнала, величины доплеровских сдвигов частот, генерировать разнообразные широкополосные сигналы, псевдослучайные импульсные последовательности. Зная параметры переданного и принятого сигналов, можно очень точно рассчитать импульсный отклик канала – основу для математической модели, на базе которой можно проектировать телекоммуникационные системы и оборудование для сетей 5G. Ещё одно решение в области систем 5G – гибкая тестовая система для исследований не только в миллиметровом диапазоне, но и в полосах ниже 6 ГГц.

Keysight Technologies

диполь



Новые осциллографы Keysight Technologies InfiniiVision 3000T серии X

Производительность старших серий осциллографов теперь доступна в сегменте среднего класса!
Революционная технология сенсорного запуска InfiniiScan Zone Trigger, емкостный сенсорный экран, специально разработанный пользовательский интерфейс, функциональность нескольких приборов в одном – и все это в сочетании с бескомпромиссной скоростью обновления более 1 млн. осциллограмм в секунду.

- Функциональность «6 приборов в 1»: осциллограф, частотомер, вольтметр, генератор, логический анализатор и анализатор протоколов
- Полоса пропускания до 1 ГГц
- Скорость обновления осциллограмм на экране – 1 млн. осцилл./с
- Аппаратное декодирование протоколов и тестирование по маске
- Расширенный математический анализ в базовой конфигурации, 38 автоматических измерений

Реклама

Инновационные решения для электронной промышленности

Санкт-Петербург / Москва / Нижний Новгород
www.dipaul.ru / info@dipaul.ru