

Окончание. Начало в № 4 `2008

Сергей БЕЛЬЧИКОВ, к. т. н.
ser.beltchicov@elvira.ru

Коэффициент шума. Теория и практика измерений

Практика измерений коэффициента шума

Метод с использованием генератора сигналов

При измерениях коэффициента шума на практике инженеры фактически используют несколько методов. Их различают по степени точности и перечню необходимого оборудования.

Начнем мы с описания самого простого, который называется «метод с использованием генератора сигналов». Это — наиболее старый метод. До того как появились прецизионные источники шума с калиброванным значением ENR, инженерам зачастую приходилось пользоваться источниками шума лишь с одной известной температурой — комнатной, которую принимали за 290 К (что уже само по себе является достаточно грубым допущением). Для измерения коэффициента шума данным способом использовали генератор и ваттметр (либо анализатор спектра). К входу тестируемого устройства подключали генератор, к выходу — детектор мощности (анализатор спектра). Сначала генератор выключали, таким образом получая согласованную нагрузку при 290 К, и измеряли выходную мощность P_1 . Затем генератор включали на заданной частоте и, регулируя выходной сигнал, добивались того, чтобы выходная мощность P_2 стала на 3 дБ выше P_1 . Из уравнения (6) следует, что:

$$P_1 = kT_0BG + N_A$$

Когда мы подаем на вход объекта измерения сигнал с генератора, то на выходе мы имеем усиленный шум, усиленную несущую, а также шум, вносимый объектом измерения:

$$P_2 = 2(kT_0BG + N_A) = P_{ГЕН} + kT_0BG + N_A$$

тогда

$$N_A = P_{ГЕН}G - kT_0BG. \quad (17)$$

Подставляя выражение (17) в уравнение (4), получаем, что:

$$F = P_{ГЕН}/kT_0B. \quad (18)$$

Поскольку мощность генератора $P_{ГЕН}$ и полоса измерения B нам известны, вычислить коэффициент шума не составляет труда. Фактическое усиление тестируемого устройства нам знать необязательно. Однако при исполь-

зовании данного метода нужно учитывать следующие факторы, которые будут влиять на точность измерений. Полоса измерительного устройства, которое детектирует мощность, должна быть известна. Кроме того, следует иметь в виду, что полоса B — это расчетная величина, соответствующая идеальному фильтру строго прямоугольной формы. То есть для реально используемого фильтра нужно вносить определенный поправочный коэффициент, чтобы продукт BG в реальном фильтре был эквивалентен BG в идеальном фильтре. Выходную мощность необходимо измерять при помощи устройства, которое определяет истинную мощность, поскольку на выходе мы имеем комбинацию из шума и несущей. Для этой цели лучше всего подходят измерители мощности, но из-за своей широкополосной природы они могут нуждаться в предварительном усилении и фильтре, ограничивающем полосу. Анализаторы спектра традиционно имеют лучшую чувствительность и фильтрацию, но детектор анализатора спектра может по-разному реагировать на шум и на сигнал несущей. Ну и, наконец, следует помнить, что в комнатных помещениях фактическая температура отнюдь не всегда составляет 290 К, или 16,8 °С. Исходя из изложенных факторов, данный метод может быть рекомендован для тестирования устройств с высоким коэффициентом шума. При этом будет сложно получить абсолютную погрешность менее 2 дБ.

Метод холодного источника (метод прямого измерения шума)

Другой метод, который также широко используют на практике, называется «метод холодного источника» (в некоторых источниках он также фигурирует как «метод прямого измерения шума»). Он основан на определении фактора шума (коэффициента шума) — уравнениях (4) и (5). В логарифмическом виде мы можем переписать выражение (5) следующим образом:

$$NF = P_{OUT, дБм} - (-174 + 10 \log_{10} [B/1 Гц] + G)_{дБм}, \quad (19)$$

где $P_{OUT, дБм}$ — общая мощность на выходе тестируемого устройства в дБ относительно 1 мВт; $B/1 Гц$ — отношение полосы измерения к полосе 1 Гц; $G_{дБ}$ — коэффициент усиления тестируемого устройства в дБ.

Обратите внимание, что для того, чтобы применять «метод холодного источника»,

усиление тестируемого устройства должно быть заранее известно. Усиление можно измерить заранее, например, при помощи векторного анализатора цепей (предпочтительно) или при помощи анализатора спектра со встроенным следящим генератором. После того как определен коэффициент усиления тестируемого устройства, к его входу подключают согласованную нагрузку 50 Ом (при этом предполагается, что при температуре 290 К мощность, генерируемая такой нагрузкой, составит -174 дБм в полосе 1 Гц) и затем измеряют мощность на выходе усилителя при помощи анализатора спектра.

Рассмотрим следующий пример. Предположим, что у нас есть некий усилитель (Hitite НМС313) на диапазон частот от 10 МГц до 6 ГГц. При помощи векторного анализатора цепей мы находим, что его усиление составляет на интересующей нас частоте 4 ГГц 20 дБ. Затем мы подключаем к входу усилителя согласованную нагрузку 50 Ом и сигнал с выхода усилителя подаем на анализатор спектра (Rohde & Schwarz FSU26). На заданной частоте мы детектируем уровень шумов в -117,5 дБм при фильтре ПЧ 1 кГц (видеофильтр сужаем до 10 Гц). Далее производим нехитрые вычисления:

$$NF = -147,5 + 174 - 20 = 6,5 \text{ дБ.}$$

Преимущество данного метода в том, что измерение можно произвести на любой частоте, которая попадает в диапазон частот анализатора спектра и векторного анализатора цепей, которые используются в данном случае. Недостаток этого метода — необходимость знать заранее коэффициент усиления (иметь векторный анализатор цепей или, по крайней мере, трекинг-генератор). Кроме того, существенные ограничения на использование метода накладывают чувствительность анализатора спектра. Нетрудно заметить, что:

$$P_{OUT} = -174 + NF + G. \quad (20)$$

P_{OUT} — это величина, которую должен «уметь» измерить анализатор спектра. Лучшие анализаторы спектра имеют собственный порог шумов в (-150...-155 дБм/Гц) на частотах до 3–6 ГГц. Это означает, что комбинация $(NF+G)$ должна составлять не менее 24 дБ. То есть если усилитель имеет усиление 8,0 дБ и коэффициент шума 1,8 дБ, то при помощи обычного анализатора спектра с высокими характеристиками измерить такой коэффици-

ент шума, пользуясь описанным методом, невозможно: ведь анализатор спектра должен будет измерить шум на уровне $-164,2$ дБм/Гц. Определенные сложности будут даже у анализатора спектра с опцией предварительного усилителя. Обычно с предварительным усилителем порог шумов анализатора класса high-end можно снизить до -168 дБм/Гц. Как видно, такой анализатор, в принципе, сможет измерить шум в $-164,2$ дБм/Гц, но погрешность измерений в таких случаях будет возрастать. Если $(NF+G)$ выше 30 дБ, то «метод холодного источника» в сочетании с хорошим анализатором спектра будет давать неплохие результаты, даже если анализатор спектра не оснащен предварительным усилителем. Также данный метод можно рекомендовать для тестируемых устройств с высоким коэффициентом шума и большим усилением.

Метод Y-фактора без коррекции

Основным методом, который используется при измерении коэффициента шума СВЧ-устройств, является «метод Y-фактора». Для расчетов используется выражение (10). Для проведения измерений нужен источник шума с калиброванным значением ENR, источник питания 28 В DC и анализатор спектра (желательно, с предварительным усилителем). К входу того же самого усилителя Hittite HMC313 подключаем источник шума, выход усилителя подаем на анализатор спектра Rohde & Schwarz FSU26. При выключенном источнике шума (питание отсутствует) наблюдаем шум мощностью в $-117,5$ дБм в полосе ПЧ 1 кГц ($-147,5$ дБм/Гц) на частоте 4 ГГц. Включаем источник шума (подаем на него питание 28 В DC 10 мА). Анализатор спектра показывает, что уровень шумов повысился до значения $-108,5$ дБм в полосе ПЧ 1 кГц ($-138,5$ дБм/Гц). Следовательно, Y-фактор составляет 9,0 дБ. По калибровочной таблице источника шума определяем, что на частоте 4 ГГц ENR составляет 14,94 дБ. Используя уравнение (10), находим, что коэффициент шума усилителя равен:

$$NF = 10 \log_{10} [10^{1,494} / (10^{0,90} - 1)] = 10 \log_{10} [4,492] = 6,52 \text{ дБ.}$$

Метод Y-фактора с коррекцией второго каскада

До сих пор во всех описанных методах практических измерений мы не отделяли коэффициент шума тестируемого устройства от собственного коэффициента шума измерительной системы. Согласно каскадной формуле Фриса (14), чем выше коэффициент усиления тестируемого устройства, тем меньший эффект в измерениях имеет собственный коэффициент шума измерительной системы. То есть для устройств с высоким усилением собственным коэффициентом шума измерительной системы можно пренебречь. Однако для систем с незначительным усилением и малым коэффициентом шума, а также

в случаях, когда требуется наивысшая точность, подобное допущение невозможно. В таких ситуациях обычно осуществляют коррекцию второго каскада (собственного коэффициента шума измерительной системы) — калибровку.

Этот принцип используют все автоматические специализированные измерители коэффициента шума (Agilent NFA, все анализаторы спектра Agilent с опцией 219, все анализаторы спектра Rohde & Schwarz с опцией K3). Общая схема измерения с коррекцией второго каскада показана на рис. 9.

Как видно, полное измерение коэффициента шума и усиления тестируемого устройства методом Y-фактора с коррекцией состоит из двух шагов.

Следует обратить внимание, что во время измерений и автоматических вычислений специализированные анализаторы коэффициента шума оперируют не коэффициентом шума или фактором шума, а эффективной температурой шума. Перевод результатов в коэффициент шума осуществляется в конце измерения.

Первый шаг называется калибровкой. Он производится без тестируемого устройства. Источник шума с калиброванным значением ENR подключают непосредственно к входу прибора. В прибор вводят таблицу ENR в точках частотного диапазона, согласно маркировке источника шума. Некоторые измерители коэффициента шума (Agilent NFA, Agilent PSA с опцией 219) могут автоматически считывать таблицу ENR из источника шу-



Рис. 7. Анализатор коэффициента шума Agilent NFA N8973A

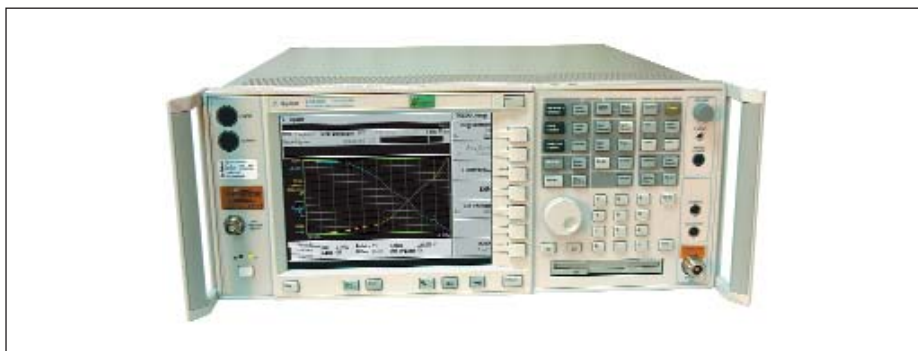


Рис. 8. Анализатор спектра Agilent PSA E4440A с опцией измерения коэффициента шума 219

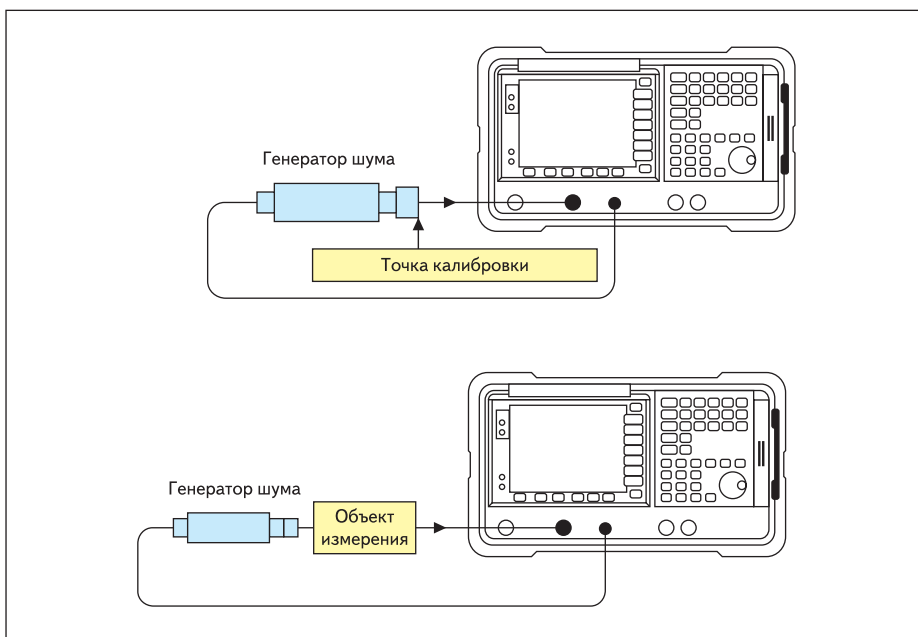


Рис. 9. Схема измерения КШ с коррекцией второго каскада: а) калибровка; б) измерение

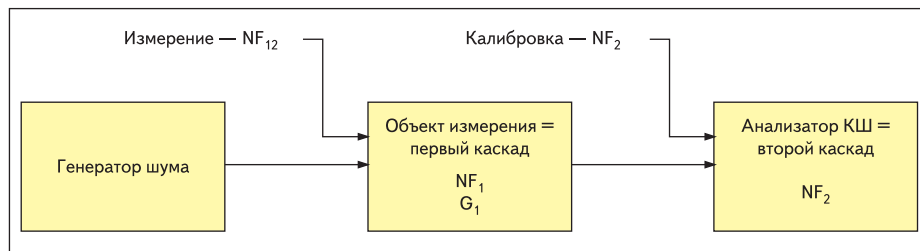


Рис. 10. Двухкаскадная система

ма без участия оператора. После того как таблица ENR загружена в память прибора, измеритель коэффициента шума включает и выключает источник шума и измеряет значения мощностей P_2^{ON} и P_2^{OFF} .

Поскольку мощность прямо пропорциональна температуре шума, мы можем записать, что Y-фактор равен:

$$Y = P_2^{ON}/P_2^{OFF} = T^{ON}/T^{OFF}. \quad (21)$$

Если собственная температура шума измерительного прибора (второй каскад) — это T_2 , то в соответствии с уравнением (21) Y-фактор, измеренный путем подключения источника шума к входу прибора, будет равен:

$$Y_2 = P_2^{ON}/P_2^{OFF} = (T_S^{ON} + T_2)/(T_S^{OFF} + T_2) \quad (22)$$

или

$$T_2 = (T_S^{ON} - Y_2 T_S^{OFF}) / (Y_2 - 1). \quad (23)$$

T_S^{OFF} — это физическая температура источника шума, а T_S^{ON} вычисляется на основе ИКШ (ENR), прописанного для источника шума производителем, при помощи уравнения (24):

$$ENR = 10 \log_{10} [(T_S^{ON} - T_S^{OFF}) / T_0]. \quad (24)$$

В конце калибровки прибор сохраняет измеренные значения P_2^{ON} и P_2^{OFF} , а также вычисленные значения Y_2 и T_2 . Затем прибор приводит кривые коэффициента шума и усиления к номинальному значению 0 дБ. После этого прибор готов к измерению тестируемого устройства.

Следующим шагом является включение тестируемого устройства в разрыв между источником шума и прибором и повторное измерение методом Y-фактора. Наша система теперь состоит из тестируемого устройства (первый каскад) и прибора (второй каскад), как показано на рис. 10.

Суммарный Y-фактор системы определяется как:

$$Y_{12} = P_{12}^{ON}/P_{12}^{OFF}. \quad (25)$$

Аналогично уравнению (23) общая температура шума системы T_{12} равна:

$$T_{12} = (T_S^{ON} - Y_{12} T_S^{OFF}) / (Y_{12} - 1). \quad (26)$$

Поскольку прибор теперь знает значения P_{12}^{ON} и P_{12}^{OFF} , а также прежде сохраненные значения P_2^{ON} и P_2^{OFF} , он может высчитать усиление тестируемого устройства:

$$G_1 = (P_{12}^{ON} - P_{12}^{OFF}) / (P_2^{ON} - P_2^{OFF}). \quad (27)$$

Обычно значение G_1 отображается прибором в дБ:

$$G_1 \text{ (дБ)} = 10 \log_{10} G_1. \quad (28)$$

Таким образом, наш прибор вычислил значения T_2 , T_{12} и G_1 . Согласно уравнению (16), температура шума первого каскада равна:

$$T_1 = T_{12} - T_2 / G_1.$$

Теперь у прибора есть вся информация, которая необходима для вычисления температуры шума первого каскада T_1 — температуры шума тестируемого устройства с учетом коррекции коэффициента шума самого прибора.

Большинство автоматических анализаторов коэффициента шума отображают результаты измерения либо в виде температуры шума T (К), фактора шума F (отношение, разы) или в виде коэффициента шума NF (дБ). Пересчет из одних единиц в другие осуществляют путем использования уравнений (2), (3) и (12). Как правило, автоматические анализаторы коэффициента шума могут выводить на экран не только численные показания коэффициента шума и усиления, но и панорамные графики, обеспечивающие лучшую визуализацию результатов, что существенно упрощает настройку и тестирование приемных устройств в заданной полосе частот.

Методы измерения коэффициента шума с векторной коррекцией

Некоторые производители контрольно-измерительного оборудования (Anritsu, Agilent Technologies) предлагают решения для измерения коэффициента шума, реализованные на базе векторных анализаторов электрических цепей, оснащенных опциональными аппаратными средствами и соответствующими программными пакетами. Принципиально в основе таких решений лежит либо метод Y-фактора, либо метод холодного источника, однако применение алгоритмов векторной коррекции (которые недоступны анали-



Рис. 11. Измерение коэффициента шума на векторном анализаторе цепей Anritsu MS4623B с опцией 04

заторам спектра и даже измерителям Agilent NFA) позволяет оптимизировать точность измерений.

Компания Anritsu с 2002 года предлагает решение для измерения коэффициента шума на базе анализаторов цепей серии Scorpion MS462xB/D с опцией 04 (рис. 11). Смысл этой опции состоит в следующем: в анализатор цепей по второму порту встраивается дополнительный приемник, оснащенный предварительным усилителем (шумовой приемник).

Кроме того, добавляется возможность управления внешним источником шума и направления шумового сигнала на тестируемое устройство через первый измерительный порт. После проведения 12-параметрической калибровки анализатор цепей вычисляет параметры согласования с источником и согласования с нагрузкой и, следовательно, может осуществить их коррекцию. Калибровка для измерений коэффициента шума опирается на данные 12-параметрической калибровки и вычисляет коэффициент шума второго каскада (собственный коэффициент шума шумового приемника). Затем между портами анализатора цепей включают тестируемое устройство и производят измерение коэффициента шума методом Y-фактора. Его отличие от классического измерения методом Y-фактора заключается в том, что измерение осуществляется с векторной коррекцией, при помощи которой устраняются ошибки рассогласования источника шума с тестируемым устройством и устройства с измерительной системой (с учетом кабелей и переходов). Причем это не единственное преимущество. Следует помнить, что в основе формул по расчету коэффициента шума лежит понятие «доступного усиления» (то есть усиления при оптимальной нагрузке). Поскольку алгоритм векторной коррекции учитывает параметры рассогласования на измерительном порту анализатора цепей, он позволяет модифицировать в соответствии с ними измеренное значение усиления таким образом, что оно становится именно «доступным усилением». Как следствие, мы получаем более точные и повторяющиеся результаты измерения коэффициента шума и усиления.

Компания Agilent Technologies в сентябре 2007 года анонсировала новое решение для



Рис 12. Анализатор цепей Agilent PNA-X N5242A с опцией измерения коэффициента шума 029

измерения коэффициента шума на базе векторного анализатора PNA-X N5242A с опцией 029.

Данное решение, в отличие от решения компании Anritsu, опирается на метод холодного источника. В анализатор цепей встраивают два дополнительных «шумовых» приемника с предварительными усилителями на диапазоны 0,01–3 ГГц и 3–26,5 ГГц, дополнительно после измерительного порта 2 ставят коммутатор, который позволяет направлять сигнал на шумовые приемники. Кроме того, добавляется возможность выводить на порт 1 шумовой сигнал с модуля электронной калибровки, который выступает как тюнер импеданса, а также осуществлять питание внешнего источника шума. Собственно, источник шума используется только на этапе калибровки для коррекции эффекта второго каскада. Усиление измеряется традиционным для векторного анализатора цепей способом, как один из S-параметров. Благодаря 12-параметрической калибровке появляется, как и в случае с Anritsu, возможность избавиться от эффекта рассогласований на измерительном порту, что повышает точность из-

мерений. Кроме того, в отличие от Anritsu, PNA-X имеет возможность измерить коэффициент шума тестируемого устройства при четырех различных значениях импеданса согласованной нагрузки. Это позволяет с гораздо большей точностью вычислить истинный коэффициент шума тестируемого устройства при согласованной нагрузке 50 Ом. Решение на базе PNA-X особенно хорошо подходит для измерений, когда генератор шума невозможно подключить непосредственно к тестируемому устройству, например, для измерений кристаллов на пластинах при помощи зондовых станций.

Решения для измерения коэффициента шума на базе анализаторов цепей с векторной коррекцией, в конечном счете, позволяют добиться погрешностей в $\pm 0,18$ дБ (у Anritsu) и в $\pm 0,10$ дБ (Agilent), что превосходит точность измерений при помощи анализаторов спектра и даже при помощи специализированных измерителей типа Agilent NFA.

Измерение коэффициента шума при помощи анализатора спектра «СК4-БЕЛАН 32» с опциями 004 и 005

ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» в феврале 2008 года разработало для анализаторов «СК4-БЕЛАН 32» две опции, которые позволяют производить точные панорамные измерения коэффициента шума и коэффициента усиления классическим методом Y-фактора. Данная опция является аналогом опции 219 для анализаторов спектра Agilent PSA и ESA и аналогом опции K3 для анализаторов спектра FSU и FSP компании Rohde & Schwarz.

Опция 005 представляет собой отключаемый малошумящий предварительный усилитель, который встраивается по входу прибора после ступенчатого аттенюатора. Для традиционных измерений спектраль-

ных составляющих сигнала предварительный усилитель можно отключить, поскольку он будет ограничивать динамику прибора. Зато для измерений малых сигналов и, конечно, для измерений коэффициента шума предварительный усилитель по-настоящему незаменим, поскольку он позволяет снизить собственный коэффициент шума анализатора спектра до 6–8 дБ. Кроме того, опция 005 добавляет возможность питания внешнего источника шума (Agilent 346B/C) с задней панели прибора через разъем BNC.

Опция 006 — это специализированное программное обеспечение для измерения коэффициента шума, которое позволяет:

- сохранить в памяти прибора до 16 калибровочных таблиц ENR различных ПШ;
- производить автоматическую коррекцию ENR, если фактическая температура ПШ не равна $T_0 = 290$ К;
- производить измерения КШ и коэффициента усиления с коррекцией собственного КШ анализатора спектра;
- выводить данные измерений в форматах: КШ в дБ, КШ в разгах, Y-фактор, эффективная температура шума в Кельвинах, P «горячего» источника, P «холодного» источника, усиление в дБ, усиление в разгах;
- производить произвольное масштабирование графиков;
- наблюдать КШ и коэффициент усиления одновременно (в двух окнах или методом наложения);
- производить компенсацию потерь в тракте до тестируемого устройства и после него;
- сохранять результаты измерений в виде текстового файла или картинки.

Типичное измерение коэффициента шума усилителя при помощи «СК4-БЕЛАН 32» с опциями 005 и 006 показано на рис. 13.

Интерфейс программного обеспечения показан на рис. 14. Данный интерфейс реализован в традиционной для измерителей КШ форме и отличается удобством использования и большим набором функций.

На рис. 15 представлен результат коррекции собственного коэффициента шума «СК4-БЕЛАН 32» после калибровки. Обрати-



Рис. 13. Измерение КШ при помощи «СК4-БЕЛАН 32» с опциями 005 и 006

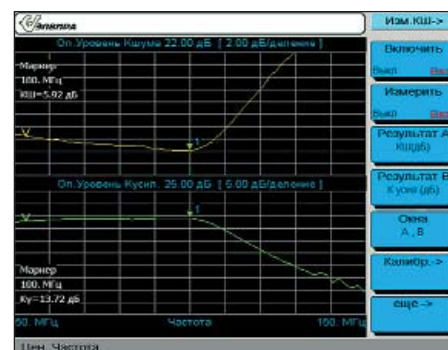


Рис. 14. Интерфейс программного обеспечения для измерения КШ в «СК4-БЕЛАН 32»

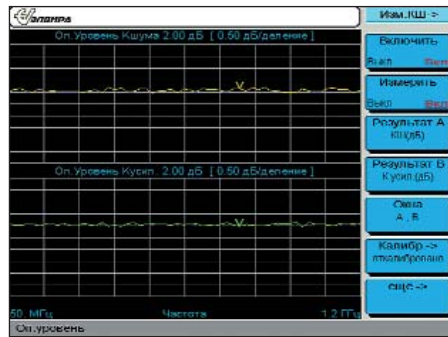


Рис. 15. Результат коррекции собственного коэффициента шума «СК4-БЕЛАН 32» после калибровки

те внимание на низкую дисперсию графиков коэффициента шума и коэффициента усиления. Инженеры, которые занимаются исследованием коэффициента шума, знают, что низкая дисперсия является косвенным признаком высокой стабильности измерительной системы и низкого коэффициента шума самого анализатора.

На рис. 16 приведено сравнение результатов измерения одного и того же усилителя при помощи «СК4-БЕЛАН 32» и прецизионного векторного анализатора цепей с опцией измерения КШ Anritsu MS4624B.



Рис. 16. Сравнение результатов измерения КШ на «СК4-БЕЛАН 32/005/006» и Anritsu MS4624B/04

Особо следует отметить, что оснащение «СК4-БЕЛАН 32» опциями для измерения

КШ обойдется потребителю, в среднем, в два раза дешевле, чем в случае с аналогичными моделями зарубежных производителей. Таким образом, можно утверждать, что специалистам ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» удалось создать конкурентоспособное решение для панорамного измерения коэффициента шума на базе отечественного серийного прибора. Это расширяет спектр задач, которые может решать «СК4-БЕЛАН 32», и, в сочетании с уже заложенными в него возможностями (анализ фазовых шумов, измерение АЧХ при помощи трекинг-генератора и т. п.), делает его еще более мощным инструментом в руках СВЧ-инженера.

Литература

1. Friis H. T. Noise Figures of Radio Receivers. Proc. of the IRE, July, 1944.
2. Agilent. Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements. Application note 57-1.
3. Agilent. Noise Figure Measurement Accuracy — The Y-Factor Method. Application note 57-2.
4. Vondran D. Vector Corrected Noise Figure Measurements // Microwave Journal, March 1999.
5. Anritsu. Noise Figure Accuracy. Application Note No. 11410-00227