

Измерение коэффициента шума методом Y-фактора

Указания по применению

Изделия:

R&S®FSW	R&S®FSV
R&S®FSQ	R&S®FSU
R&S®FSVR	R&S®FSMR
R&S®FSP	R&S®FSUP
R&S®FSG	R&S®FSL

В данных указаниях по применению подробно описаны действия, которые необходимо выполнить для измерения коэффициента шума с помощью анализатора спектра и метода "Y-фактора".

Приведены базовые уравнения для каждого этапа расчета. Кроме того, даны рекомендации для обеспечения воспроизводимости измерений. Затем рассматривается погрешность измерений, в том числе составляющие, вносимые источником шума, анализатором и самим испытуемым устройством.

И, наконец, описано программное приложение, которое позволяет автоматизировать расчет коэффициента шума по четырем измерениям, проводимым анализатором спектра. Приложение проверяет соответствие основных параметров измерений и указывает на основные проблемные области. Затем оно вычисляет коэффициент шума и коэффициент усиления ИУ, а также погрешность измерений.

Содержание

1	Введение	3
1.1	Определение коэффициента шума.....	3
1.2	Общее описание	4
1.3	Требуемое оборудование	4
2	Теоретические основы и необходимые соотношения	5
3	Подробное пошаговое описание измерения	9
3.1	Этап калибровки.....	10
3.2	Этап измерений	12
3.3	Этап расчета	13
4	Выбор анализатора спектра и источника шума	14
5	Автоматизация измерений	15
6	Вычисление погрешности измерений	17
6.1	Погрешность измерения каскадного коэффициента шума	18
6.2	Погрешность калибровки коэффициента шума анализатора спектра.....	19
6.3	Погрешность измерения коэффициента усиления ИУ	19
6.4	Погрешность значения ENR источника шума	19
6.5	Пример погрешности измерений коэффициента шума.....	19
7	Калькулятор Rohde & Schwarz для расчета коэффициента шума и погрешности измерений	22
7.1	Использование калькулятора.....	22
7.2	Отображение уровней оценки при измерениях вручную.....	24
7.3	Полностью ручное измерение коэффициента шума	24
7.4	Использование рекомендаций по измерению для обеспечения воспроизводимости результатов	25
7.5	Обзор меню и дополнительных функций	26
8	Способы улучшения результатов измерений коэффициента шума	28
9	Заключение	29
10	Библиография	30

1 Введение

В данных указаниях по применению подробно описаны действия, которые необходимо выполнить для измерения коэффициента шума с помощью анализатора спектра и метода Y-фактора. Приведены базовые уравнения для каждого этапа вычислений. Кроме того, даны рекомендации для обеспечения воспроизводимости измерений. Затем рассматривается погрешность измерений, в том числе составляющие, вносимые источником шума, анализатором и самим испытуемым устройством.

И, наконец, описано программное приложение, которое позволяет автоматизировать расчет коэффициента шума по четырем измерениям, проводимым анализатором спектра. Приложение проверяет соответствие основных параметров измерений и указывает на основные проблемные области. Затем вычисляется коэффициент шума и коэффициент усиления ИУ, а также погрешность измерений.

1.1 Определение коэффициента шума

Коэффициент шума прибора является количественной мерой шума испытуемого устройства, добавляемой к сигналу, проходящему через устройство. Иначе говоря, коэффициент шума определяется тем, насколько ИУ ухудшает отношение сигнал-шум. Коэффициент шума четко определен, легко измеряется, и значение указывается в технических данных для различных типов ВЧ и СВЧ-устройств.

Рассмотрим прибор с входным сигналом S_{in} плюс шум N_{in} и усилением G . Отношение сигнал-шум (SNR) на входе составляет S_{in}/N_{in} . Так как $S_{out} = S_{in}G$, то выходное соотношение сигнал шум составляет $S_{in}G/N_{out}$ (см. рисунок 1).

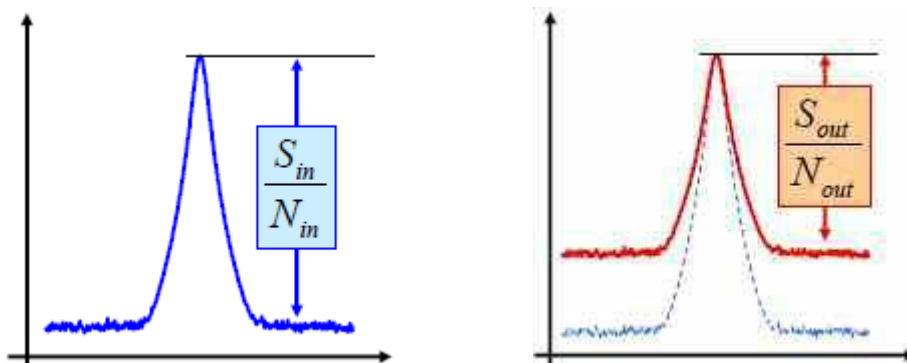


Рисунок 1 – Графическое представление отношений сигнал-шум на входе и выходе испытуемого устройства

Линейное отношение этих величин определяет *шум-фактор F (noise factor)*. Логарифмическое преобразование шум-фактора соответствует более распространенному понятию *коэффициента шума F_{dB} (noise figure)*.

Шум-фактор:
$$F = \frac{N_{out}}{N_{in}G}$$

Коэффициент шума:
$$F_{dB} = 10 \log \left(\frac{N_{out}}{N_{in}G} \right)$$

1.2 Общее описание

В измерениях, описываемых в данных указаниях по применению, для получения коэффициента шума с помощью анализатора спектра используется метод Y-фактора. В данном методе используется определенный широкополосный источник шума с двумя температурными состояниями: высокотемпературное T_{source}^{ON} с высокой мощностью выходного шума, и низкотемпературное T_{source}^{OFF} с меньшим выходным шумом. Источник шума подключается к входу ИУ, а затем измеряется мощность шума на выходе ИУ для каждого из двух состояний.

На базе этих измерений рассчитывают коэффициент шума и коэффициент усиления ИУ.

1.3 Требуемое оборудование

На рисунке 2 показана общая установка для проведения измерений коэффициента шума. Требуемое оборудование: анализатор спектра, источник шума. Анализатор спектра часто содержит встроенный предусилитель. Интегрированный порт 28 В постоянного тока является удобным дополнением к анализатору спектра и облегчает автоматизацию процесса измерений. Данный источник постоянного тока используется для включения и выключения источника шума и переключения между высокотемпературным и низкотемпературным состояниями.

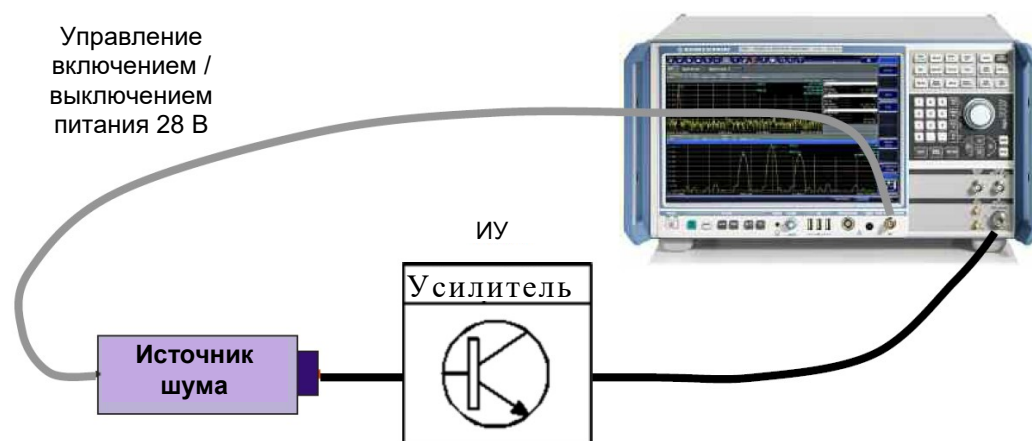


Рисунок 2 – Установка для измерения коэффициента шума.

2 Теоретические основы и необходимые соотношения

Для выполнения измерений коэффициента шума вручную с использованием анализатора спектра необходимо производить преобразование различных величин, таких как коэффициент шума, шум-фактор, шумовая температура, коэффициент усиления и мощность в линейном и логарифмическом виде. Уравнения, необходимые для данных преобразований описаны в данном разделе.

Как правило, логарифмические параметры имеют суффикс "dB" (дБ) в названии и такие же единицы измерений; например, см уравнение (1).

Начнем с линейной мощности, P , измеряемой в ваттах, первое преобразование позволяет выразить мощность в логарифмическом виде. Логарифмическая мощность измеряется в дБмВт, то есть является отношением линейной мощности к 1 мВт.

$$P_{dBm} = 10 \log \left(\frac{P}{0.001} \right) \quad (1)$$

Обратное соотношение для преобразования логарифмической мощности " P_{dBm} " в линейную мощность (единицы измерения – Вт).

$$P = (0.001) \cdot 10^{\left(\frac{P_{dBm}}{10} \right)} \quad (2)$$

Аналогичным образом, линейный коэффициент шума " F " преобразовывается в логарифмический коэффициент шума:

$$F_{dB} = 10 \log(F) \quad (3)$$

Обратное соотношение:

$$F = 10^{\left(\frac{F_{dB}}{10} \right)} \quad (4)$$

Для преобразования линейного коэффициента усиления в логарифмический коэффициент усиления используется следующее уравнение:

$$G_{dB} = 10 \log(G) \quad (5)$$

Обратное соотношение:

$$G = 10^{\left(\frac{G_{dB}}{10} \right)} \quad (6)$$

Соотношение коэффициента шума (логарифмического) с шумовой температурой:

$$T_{DUT} = T_0 \left(10^{\left(\frac{F_{dB}}{10} \right)} - 1 \right) \quad (7)$$

где T_0 – температура окружающей среды ИУ. Для указания шумовой температуры используется шкала Кельвина.

Обратное соотношение:

$$F_{dB} = 10 \log \left(\frac{T_{DUT}}{T_0} + 1 \right) \quad (8)$$

Источники шума обычно характеризуются коэффициентом избыточного шума (excess noise ratio, ENR), который выражается в дБ. Соотношение между шумовой температурой и коэффициентом избыточного шума показано в уравнении (9). Значения коэффициента избыточного шума ENR определяется производителем и, как правило, указывается для температуры $T_0 = 290 \text{ K}$.

$$ENR_{dB} = 10 \log \left(\frac{T_{source}^{ON} - T_{source}^{OFF}}{T_0} \right) \quad (9)$$

Преобразование из ENR в высокую температуру T^{ON} задается уравнением:

$$T_{source}^{ON} = T_0 \left(10^{[ENR/10]} \right) + T_{source}^{OFF} \quad (10)$$

Остальные уравнения в данном разделе относятся к методу Y-фактора. В методе Y-фактора используется измеренное значение мощности шума на выходе ИУ при комнатной температуре источника шума (источник шума выключен), подключенного к входу ИУ, и значение мощности шума при высокой температуре источника шума (источник шума с питающим напряжением 28 В), подключенного к входу ИУ.

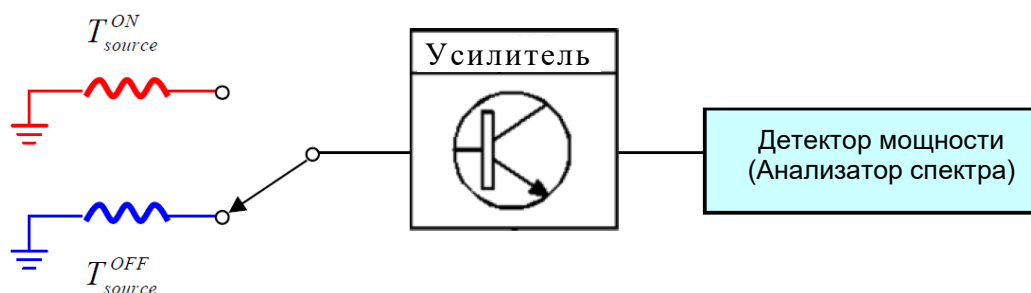


Рисунок 3 – Переменные метода Y-фактора для измерения коэффициента шума.

Эти два измерения обеспечивают возможность построения прямой (см. рисунок 4), с помощью которой может быть определен коэффициент усиления ИУ, G_{DUT} . Пересечение с осью Y показывает шум, добавляемый ИУ, N_{DUT} . На рисунке 4 также показаны переменные для полосы частот (в Гц) измерений шума, B , и постоянная Больцмана, k ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К).

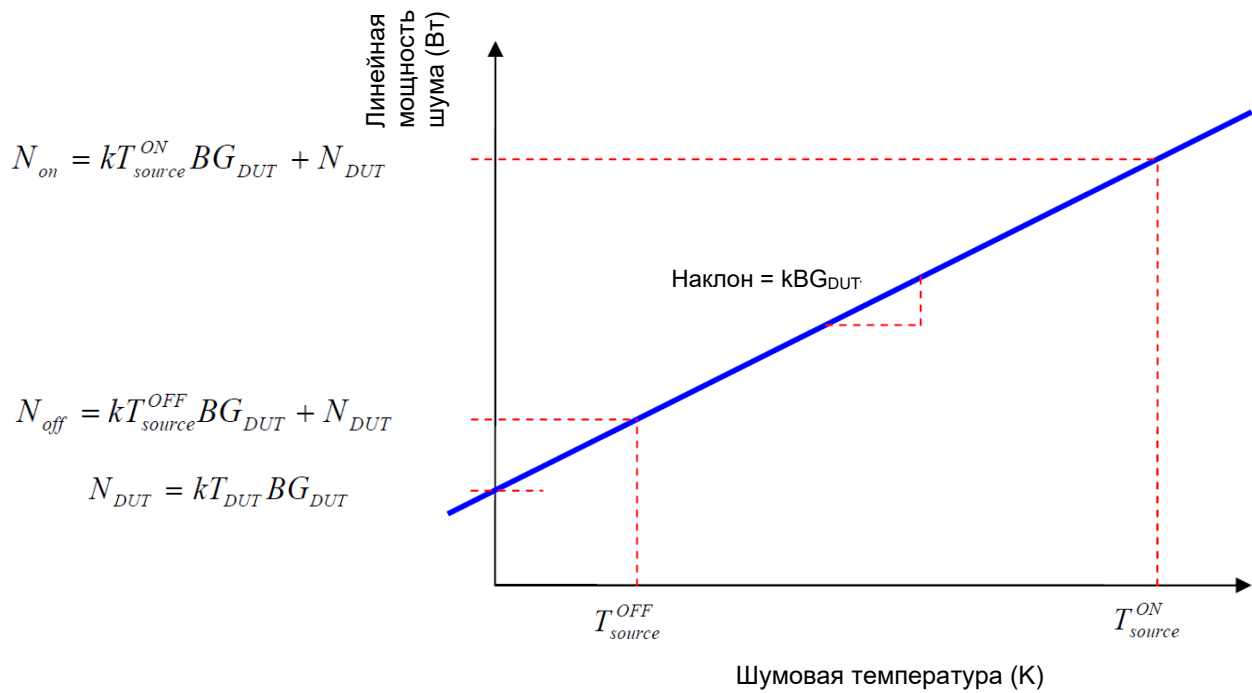


Рисунок 4 – Переменные метода Y-фактора

Y-фактор может быть определен как соотношение измеренной (линейной) мощности на выходе ИУ при включенном (*on*) и выключенном (*off*) источнике шума.

$$Y = \frac{N_{on}}{N_{off}} \quad (11)$$

Y-фактор может быть использован для расчета шумовой температуры ИУ:

$$T = \frac{T_{source}^{ON} - Y \cdot T_{source}^{OFF}}{Y - 1} \quad (12)$$

Анализатор спектра тоже вносит вклад в общий шум (за счет собственного уровня шума), поэтому обычно требуется определить коэффициент шума анализатора спектра (или линейный коэффициент шума), а затем вычесть его из общего результата измерений, используя уравнение для каскадного коэффициента шума. Часто эта процедура называется коррекцией второго каскада или калибровкой. В случае если ИУ имеет большой коэффициент усиления и высокий коэффициент шума, анализатор спектра имеет низкий коэффициент шума, то погрешность калибровки пренебрежимо мала и калибровку можно не выполнять. Однако в большинстве случаев рекомендуется проведение калибровки. Уравнение (13) описывает линейную форму уравнения для каскадного коэффициента шума.

$$F_{DUT \& SA} = F_{DUT} + \frac{F_{SA} - 1}{G_{DUT}} \quad (13)$$

Как коэффициент шума анализатора спектра, так и коэффициент шума каскада могут быть измерены напрямую. Линейное уравнение для коэффициента усиления ИУ:

$$G_{DUT} = \frac{N_{on}^{DUT \& SA} - N_{off}^{DUT \& SA}}{N_{on}^{SA} - N_{off}^{SA}} \quad (14)$$

Уравнение (15) используется для расчета шумовой температуры ИУ по коэффициенту усиления ИУ и шумовой температуре второго каскада (т.е. анализатора спектра).

$$T_{DUT} = T_{DUT \& SA} - \frac{T_{SA}}{G_{DUT}} \quad (15)$$

Уравнение (16) представляет собой упрощенную форму уравнения для коэффициента шума, полученную на основе уравнений (8), (9) и (12).

$$F_{dB} = ENR_{dB} - 10 \log(Y - 1) \quad (16)$$

где Y – измеренный Y-фактор в виде линейного отношения.

3 Подробное пошаговое описание измерения

При измерении с помощью анализатора спектра необходимо решить три основных задачи: калибровка измерительной установки, измерение ИУ и расчет коэффициента шума и коэффициента усиления ИУ.

Данные этапы описаны ниже вместе с результатами, полученными при выполнении образцового измерения для блока усиления малого сигнала с частотой 1 ГГц.

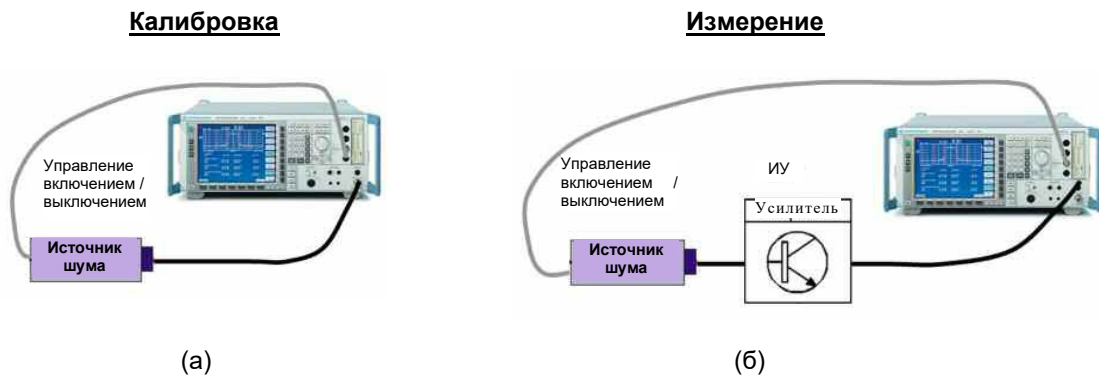


Рисунок 5 – Схема подключения для этапа калибровки (а), и измерения коэффициента шума ИУ (б).

Три основных этапа измерений:

1. Калибровка, при которой измеряется коэффициент шума измерительной установки
2. Измерение ИУ, последовательно подключенного к установке для измерений.
3. Расчет параметров ИУ с помощью уравнения для каскадного коэффициента шума.

Каждый из этих этапов более подробно описан в последующих разделах.

3.1 Этап калибровки

1. Подключите оборудование как показано на рисунке 5а. (без ИУ)
 - Подключите выход источника шума к ВЧ-входу анализатора спектра.
 - Подключите выход анализатора спектра для управления источником шума к источнику шума.

2. Задайте следующие настройки анализатора спектра:
 - Установите необходимую частоту измерения для анализатора спектра
 - (Например: от 990 до 1010 МГц)
 - Установите такую полосу разрешения RBW, чтобы она была меньше полосы пропускания ИУ
 - (Например: 1 МГц)
 - Включите предусилитель анализатора спектра.
 - Установите ВЧ-аттенюатор на 0 дБ.
 - Установите достаточно низкое значение опорного уровня
 - (Например: -80 дБмВт.)
 - Установите достаточно низкое значение логарифмического диапазона
 - (Например: 30 дБ.)
 - Выберите детектор среднеквадратического значения (RMS),
 - Выберите самую медленную развертку для среднеквадратического усреднения результатов.
 - (Например: 1 секунда)

3. Используйте уравнение (10) для получения температуры источника шума, когда он находится во включенном состоянии. Как правило, отношение сигнал-шум источника шума печатается в виде таблицы непосредственно на источнике шума. Примем температуру комнаты $T_0 = 290$ К, а также температуру в выключенном состоянии 290 К. Например, источник шума, используемый при измерениях, имеет отношение сигнал-шум 14,66 дБ на частоте 1 ГГц.

$$T_{source}^{OFF} = 290 K$$

$$T_{source}^{ON} = T_0 \left(1 + 10^{[14.66/10]} \right)$$

$$= 8770.0 K$$

4. Выключите источник шума и измерьте мощность шума кривой на анализаторе спектра с помощью маркера. Преобразуйте в линейное значение мощность шума с помощью уравнения (2). Измерения с помощью анализатора спектра Rohde & Schwarz дают мощность шума -104,5 дБмВт. Обратите внимание, что 1 фемтоватт (фВт или fW) = 1×10^{-15} Вт.

$$N_{off}^{SA} = -104.5 dBm$$

$$N_{off}^{SA} = 35.48 fW$$

5. Включите источник шума, измерьте мощность шума кривой с помощью маркера. Преобразуйте в линейное значение мощность шума с помощью уравнения (2). Например, на этом этапе измерения с помощью анализатора спектра Rohde & Schwarz коэффициент шума -97,6 дБВт.

$$N_{on_dB}^{SA} = -97.6 dBm$$

$$N_{on}^{SA} = 173.8 fW$$

6. Найдите линейный Y-фактор с помощью уравнения (11). Обратите внимание, что единицы измерения и выбранная полоса разрешения взаимно сокращаются при вычислении знаменателя Y-фактора. Эта особенность является преимуществом использования метода Y-фактора.

$$Y_{SA} = \frac{N_{on}^{SA}}{N_{off}^{SA}}$$

$$Y_{SA} = \frac{173.8}{35.48}$$

$$Y_{SA} = 4.898$$

7. Затем используйте уравнение (12) для получения шумовой температуры анализатора спектра

$$T_{SA} = \frac{T_{source}^{ON} - Y_{SA} \cdot 290}{Y_{SA} - 1}$$

$$T_{SA} = \frac{8770.0 - 4.898 \cdot 290}{4.898 - 1}$$

$$T_{SA} = 1885.6 K$$

8. Преобразуйте шумовую температуру анализатора спектра в коэффициент шума с помощью уравнения (8).

$$NF_{dB}^{SA} = 10 \log \left(\frac{1885.6}{290} + 1 \right)$$

$$NF_{dB}^{SA} = 8.75 dB$$

9. Или используйте значение ENR и Y-фактор в уравнении (16) для расчета коэффициента шума NF напрямую

$$NF_{dB}^{SA} = 14.66 - 10 \log(4.898 - 1)$$

$$NF_{dB}^{SA} = 8.75 dB$$

3.2 Этап измерений

На данном этапе измеряется каскадный коэффициент шума ИУ и анализатора спектра. Начните с последовательного подключения ИУ между источником шума и анализатором спектра (см. рисунок 5b).

1. Выключите источник шума и измерьте мощность шума кривой. В нашем примере усилитель малых сигналов, подключенный к анализатору спектра Rohde & Schwarz, имеет выходной уровень мощности -93,63 дБмВт.

$$N_{off_dB}^{DUT\&SA} = -93.6dBm$$

$$N_{off}^{DUT\&SA} = 436.5fW$$

2. Включите источник шума и измерьте мощность шума кривой. ИУ и анализатор спектра на данном этапе имеют уровень -82,58 дБмВт.

$$N_{on_dB}^{DUT\&SA} = -82.5dBm$$

$$N_{on}^{DUT\&SA} = 5623fW$$

3. Используйте уравнение (11) для вычисления линейного Y-фактора каскада.

$$Y_{DUT\&SA} = \frac{5623}{436.5}$$

$$Y_{DUT\&SA} = 12.88$$

4. Затем используйте уравнение (12) для получения шумовой температуры каскада.

$$T_{DUT\&SA} = \frac{T_{source}^{ON} - Y_{DUT\&SA} \cdot 290}{Y_{DUT\&SA} - 1}$$

$$T_{DUT\&SA} = \frac{8770.0 - 12.88 \cdot 290}{12.88 - 1}$$

$$T_{DUT\&SA} = 423.7K$$

5. Преобразуйте шумовую температуру каскада в коэффициент шума с помощью уравнения (8).

$$NF_{dB} = 10 \log \left(\frac{T_{DUT\&SA}}{T_0} + 1 \right)$$

$$NF_{dB} = 10 \log \left(\frac{423.7}{290} + 1 \right)$$

$$NF_{dB} = 3.91dB$$

6. Или используйте уравнение (16).

$$NF_{dB} = 14.66 - 10 \log(12.88 - 1)$$

$$NF_{dB} = 3.91 dB$$

3.3 Этап расчета

На последнем этапе вычисляется коэффициент усиления и коэффициент шума ИУ с помощью уравнений для каскадного коэффициента шума.

1. Используйте уравнение (14) для расчета линейного коэффициента усиления ИУ. Это еще одно уравнение, в котором единицы измерения и выбранная полоса разрешения взаимно сокращаются.

$$Gain_{DUT} = \frac{5623 - 436.5}{173.8 - 35.48}$$

$$Gain_{DUT} = 37.51$$

2. Используйте уравнение (5) для преобразования коэффициента усиления в логарифмические единицы

$$Gain_{DUT} = 10 \log(37.51)$$

$$Gain_{DUT} = 15.74 dB$$

3. Используйте уравнение (15) для расчета шумовой температуры ИУ

$$T_{DUT} = T_{DUT \& SA} - \frac{T_{SA}}{Gain_{DUT}}$$

$$T_{DUT} = 423.7 - \frac{1885.6}{37.51}$$

$$T_{DUT} = 373.4 K$$

4. И, наконец, рассчитайте коэффициент шума с помощью уравнения (8)

$$NF_{dB} = 10 \log \left(\frac{373.4}{290} + 1 \right)$$

$$NF_{dB} = 3.59 dB$$

4 Выбор анализатора спектра и источника шума

Ниже приведены три рекомендации по измерению, которые могут быть использованы при выборе источника шума и анализатора спектра, необходимых для проведения измерения коэффициента шума. Целью этих рекомендаций является обеспечение соответствующей разницы (дельты) между четырьмя измерениями, описанными в разделах 3.1 и 3.2. При этом уменьшается влияние собственного шума (невоспроизводимого) на отдельные измерения. Следование данным рекомендациям поможет обеспечить точность и воспроизводимость измерений.

1. Первая рекомендация относится к двум измерениям, выполняемым на этапе калибровки. Для расчета необходима разница не менее 3 дБ между включенным и выключенным источником шума. Для удовлетворения данного требования необходимо выбирать источник шума с отношением сигнал-шум как минимум на 3 дБ больше, чем коэффициент шума анализатора спектра.

$$ENR_{dB} > NF_{dB}^{SA} + 3dB$$

Пример раздела 3 удовлетворяет данной рекомендации:

$$14.66dB > 8.75dB + 3dB$$

$$14.66dB > 11.75dB$$



2. Вторая рекомендация относится к двум измерениям, выполняемым на этапе измерений. Здесь для расчета необходима разница не менее 5 дБ между включенным и выключенным источником шума. Для удовлетворения данного требования необходимо выбирать источник шума с отношением сигнал-шум как минимум на 5 дБ больше, чем коэффициент шума ИУ.

$$ENR_{dB} > NF_{dB}^{DUT} + 5dB$$

Пример раздела 3 соответствует данной рекомендации:

$$14.66dB > 3.59dB + 5dB$$

$$14.66dB > 8.59dB$$



3. Третья рекомендация относится к разнице между этапами измерений и калибровки. Для расчета необходима разница не менее 1 дБ, что выполняется при таком выборе анализатора спектра и предусилителя, чтобы коэффициент шума ИУ + усиление ИУ было как минимум на 1 дБ больше коэффициента шума анализатора спектра.

$$NF_{dB}^{DUT} + GAIN_{dB}^{DUT} > NF_{dB}^{SA} + 1dB$$

Пример раздела 3 соответствует данной рекомендации:

$$3.59dB + 15.74dB > 8.75dB + 1dB$$

$$19.33dB > 9.75dB$$



В случае если все три рекомендации по измерению выполнены, расчет Y-фактора будет давать воспроизводимые результаты.

5 Автоматизация измерений

Большая часть современных анализаторов спектра обеспечивает выполнение автоматического измерения коэффициента шума. При этом выполняются этапы калибровки и измерений, решение уравнений и построение результирующего коэффициента шума и коэффициента усиления ИУ на частотной диаграмме.

Кроме того, функция измерения коэффициента шума Noise figure от компании Rohde & Schwarz также учитывает любые потери на входе и выходе ИУ, компенсируя при этом такие элементы как согласователи, вентили или аттенюаторы. Влияние температуры источника шума на отношение сигнал-шум также автоматически компенсируется. Поддерживаются измерения, проводимые с помощью устройств преобразования частоты, таких как смесители или входные каскады передатчиков (ВЧ в ПЧ).

На рисунках 6,7 и 8 показаны снимки экрана с типичными измерениями коэффициента шума, проводимыми с помощью анализатора спектра FSV компании Rohde & Schwarz.

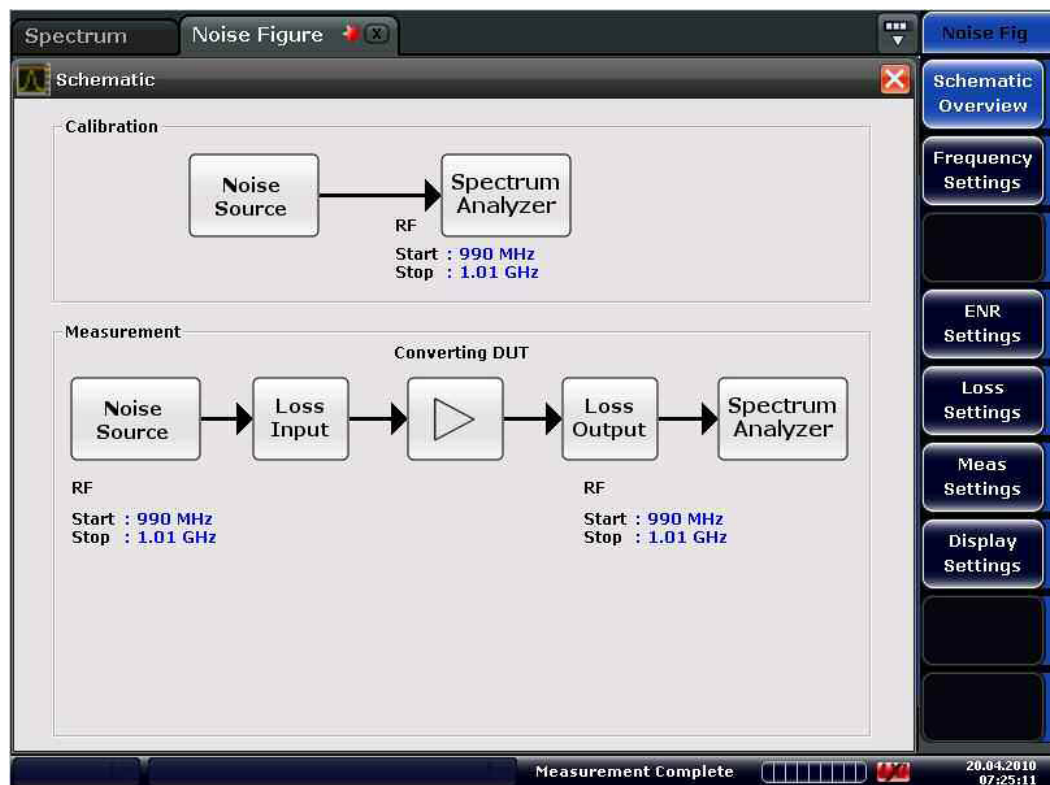


Рисунок 6 – Окно конфигурации для проведения измерений коэффициента шума с помощью анализатора спектра FSV компании Rohde & Schwarz

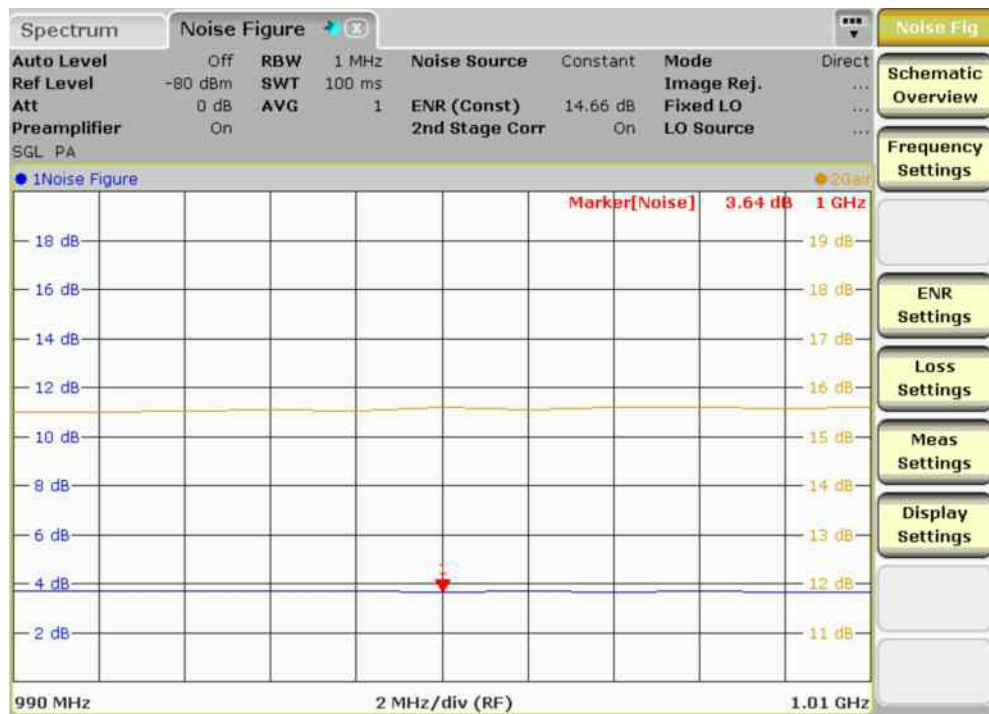


Рисунок 7 – Отображение результирующих значений коэффициента шума и коэффициента усиления ИУ.

The screenshot shows the 'Noise Figure' measurement interface with a table of frequency list results. The table has four columns: RF, NF, Noise Temp, and Gain. The row for 1.000 GHz is highlighted in yellow. Below the table, there is a 'Fixed Frequency (Meter)' section showing the current measurement values.

RF	NF	Noise Temp	Gain
990.000 MHz	3.683 dB	387.224 K	15.489 dB
992.000 MHz	3.672 dB	385.458 K	15.489 dB
994.000 MHz	3.672 dB	385.391 K	15.518 dB
996.000 MHz	3.673 dB	385.553 K	15.543 dB
998.000 MHz	3.692 dB	388.586 K	15.513 dB
1.000 GHz	3.640 dB	380.492 K	15.591 dB
1.002 GHz	3.707 dB	390.847 K	15.538 dB
1.004 GHz	3.642 dB	380.742 K	15.589 dB
1.006 GHz	3.682 dB	386.979 K	15.592 dB
1.008 GHz	3.657 dB	383.110 K	15.575 dB
1.010 GHz	3.650 dB	382.089 K	15.587 dB

Fixed Frequency (Meter)
 Frequency: 1 GHz Noise Figure: 3.64 dB Gain: 15.591 dB

Рисунок 8 – Сводная таблица коэффициента шума, шумовой температуры и коэффициента усиления ИУ.

6 Вычисление погрешности измерений

Погрешность измерений коэффициента шума является одним из ключевых параметров. Измерения будут бессмысленны, если погрешность слишком велика. Знание погрешности измерений коэффициента шума очень важно при сравнении результатов измерений. Далее рассмотрим два устройства. Какое из них предпочтительнее?

ИУ	Коэффициент шума
Устройство 1	1,257 дБ
Устройство 2	1,4 дБ

На первый взгляд усилитель с меньшим коэффициентом шума (и также с большим количеством знаков) будет правильным выбором. Но рассмотрение значений погрешностей измерений может изменить это решение.

ИУ	Коэффициент шума	Погрешность коэффициента шума
Устройство 1	1,257 дБ	+/- 0,5 дБ
Устройство 2	1,4 дБ	+/- 0,1 дБ

Погрешность может быть вычислена или для наихудшего случая, путем сложения всех погрешностей, вносящих вклад в общую погрешность, или путем расчета корня из суммы квадратов (RSS) погрешностей. Как правило, если составляющие, влияющие на общую погрешность, независимы друг от друга, используется метод RSS, как более реалистичный. При расчете погрешности измерения коэффициента шума ее составляющие являются независимыми, то есть используется метод RSS.

На погрешность измерения коэффициента шума влияют несколько составляющих. Значительное влияние имеют коэффициент шума анализатора спектра, погрешность значения ENR источника шума и коэффициент усиления ИУ. Кроме того, на общую погрешность влияют несогласование нагрузки между источником и ИУ, ИУ и анализатором спектра, источником шума и анализатором спектра (на этапе калибровки).

Несмотря на то, что источники погрешности измерений легко идентифицировать, составить уравнение для расчета общей погрешности гораздо сложнее. Данная работа была сделана с помощью дифференциального анализа уравнения для расчета каскадного коэффициента шума и приведена в отдельном документе [3]. Полученная формула отображена в уравнении (17)

$$\begin{aligned}
 \text{Погрешность измерений} = & \sqrt{ \left(\frac{F_{DUT \& SA}}{F_{DUT}} \Delta F_{DUT \& SA_dB} \right)^2 + \left(\frac{F_{SA}}{F_{DUT} G_{DUT}} \Delta F_{SA_dB} \right)^2 + \left(\frac{F_{SA} - 1}{F_{DUT} G_{DUT}} \Delta G_{DUT_dB} \right)^2 + \left(\left(\frac{F_{DUT \& SA}}{F_{DUT}} - \frac{F_{SA}}{F_{DUT} G_{DUT}} \right) \Delta ENR_{dB} \right)^2 } \quad (17)
 \end{aligned}$$

Необходимо отметить, что в уравнении (17) четыре слагаемых $\Delta F_{DUT\&SA_dB}$, ΔF_{SA_dB} , ΔG_{DUT_dB} , ΔENR_{dB} имеют единицы измерения дБ и соответствуют четырем "основным составляющим" погрешности измерений. Уравнения для данных составляющих описаны в следующем разделе.

Остальные составляющие являются комбинациями линейных отношений измеренного коэффициента шума и коэффициента усиления ИУ, коэффициента шума анализатора спектра и каскадного коэффициента шума анализатора спектра и ИУ. Данные значения измеряются или вычисляются в процессе измерения коэффициента шума, описанном в разделе 3. Обратите внимание, что в уравнении (17) предполагается, что этап калибровки выполнен и что ИУ является линейным устройством, таким как усилитель. Для ИУ с преобразованием частоты должна быть учтена погрешность ENR источника шума на входной и выходной частотах, и вычисление погрешности измерений будет немного отличаться. Далее в разделе рассматривается только линейный случай (без преобразования частоты).

6.1 Погрешность измерения каскадного коэффициента шума

Измерение каскадного коэффициента шума состоит из двух измерений для определения каскадного Y-фактора. При выполнении этих двух измерений основными факторами появления погрешности являются следующие:

1. Рассогласование между источником шума и входом ИУ, которое создает в линии передачи стоячую волну.
2. Погрешность результатов измерения коэффициента шума с помощью анализатора спектра.

Расчет погрешности рассогласования хорошо известен, итоговая погрешность:

$$mismatch_error_{dB} = \pm 20 \log(1 \mp \Gamma_{source} \Gamma_{DUT_input})$$

Коэффициенты отражения источника шума и ИУ обычно указываются в технических данных или легко измеряются.

Погрешность коэффициента шума анализатора спектра указывается производителем прибора.

Поскольку погрешности рассогласования и коэффициента шума независимы друг от друга, для их сложения используется метод квадратного корня из суммы квадратов этих погрешностей (RSS). Итоговая погрешность измерений каскадного коэффициента шума соответствует уравнению (18). Результат (в дБ) необходим при окончательном вычислении уравнения (17)

$$\Delta F_{DUT\&SA_dB} = \sqrt{(20 \log(1 - \Gamma_{source} \Gamma_{DUT_input}))^2 + (SA_{NF_uncertainty_dB})^2} \quad (18)$$

6.2 Погрешность калибровки коэффициента шума анализатора спектра

Следующая составляющая погрешности – погрешность измерений коэффициента шума анализатора спектра во время калибровки – аналогична первой составляющей и вычисляется так:

$$\Delta F_{SA_dB} = \sqrt{\left(20 \log(1 - \Gamma_{source} \Gamma_{SA_input})\right)^2 + \left(SA_{NF_uncertainty_dB}\right)^2} \quad (19)$$

Эта составляющая (измеряется в дБ) также необходима для расчета уравнения (17).

6.3 Погрешность измерения коэффициента усиления ИУ

Третьей составляющей является погрешность измерения коэффициента усиления ИУ. Эта составляющая влияет на все три комбинации рассогласования между источником шума, входными и выходными портами ИУ и анализатором спектра. Кроме того, она зависит от коэффициента шума анализатора спектра.

$$\Delta G_{DUT_dB} = \sqrt{\left(20 \log(1 - \Gamma_{source} \Gamma_{SA_input})\right)^2 + \left(20 \log(1 - \Gamma_{source} \Gamma_{DUT_input})\right)^2 + \left(20 \log(1 - \Gamma_{DUT_output} \Gamma_{SA_input})\right)^2 + \left(SA_{gain_uncertainty_dB}\right)^2} \quad (20)$$

6.4 Погрешность значения ENR источника шума

Четвертой составляющей является погрешность значений коэффициента избыточного шума ENR источника шума, определяемая производителем. Погрешность обычно указывается производителем прибора и, как правило, лежит в диапазоне от 0,1 дБ до 0,2 дБ.

$$\Delta ENR_{dB} \cong 0.2 \quad (21)$$

6.5 Пример погрешности измерений коэффициента шума

Примем следующие коэффициенты отражений:

Источник шума:	0,05	(потери на отражение 26 дБ)
Вход ИУ	0,251	(потери на отражение 12 дБ)
Выход ИУ	0,316	(потери на отражение 10 дБ)
Вход анализатора спектра	0,2	(потери на отражение 14 дБ)

Положим, что измеренный коэффициент шума анализатора спектра 12 дБ. (коэффициент шума 15,85)
 Положим, что коэффициент усиления ИУ 15 дБ (коэффициент усиления 31,62)
 Положим, что коэффициент шума ИУ и каскада анализатора спектра 7,85 дБ (коэффициент шума 6,095)
 поэтому коэффициент шума ИУ вычисляется как 7,5 дБ (коэффициент шума 5,62)
 Положим, что погрешность коэффициента шума анализатора спектра 0,05 дБ
 Положим, что погрешность коэффициента усиления анализатора спектра 0,059 дБ
 Положим, что погрешность значения ENR 0,2 дБ.

Используя уравнение 18:

$$\begin{aligned} \Delta F_{DUT\&SA_dB} &= \sqrt{(0.1097)^2 + (0.05)^2} \\ &= 0.1245\text{dB} \end{aligned}$$

С помощью уравнения 19:

$$\begin{aligned} \Delta F_{SA_dB} &= \sqrt{(0.0873)^2 + (0.05)^2} \\ &= 0.1053\text{dB} \end{aligned}$$

Уравнение 20:

$$\begin{aligned} \Delta G_{DUT_dB} &= \sqrt{(0.1097)^2 + (0.0873)^2 + (0.567)^2 + (0.059)^2} \\ &= 0.587\text{dB} \end{aligned}$$

И уравнение 21:

$$\Delta ENR_{dB} = 0.2$$

Требуемые линейные соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{F_{DUT\&SA}}{F_{DUT}} &= \frac{6.095}{5.62} = 1.085 \\ \frac{F_{SA}}{F_{DUT} G_{DUT}} &= \frac{15.85}{(5.62)(31.62)} = 0.0892 \\ \frac{F_{SA} - 1}{F_{DUT} G_{DUT}} &= \frac{15.85 - 1}{(5.62)(31.62)} = 0.0836 \\ \frac{F_{DUT\&SA}}{F_{DUT}} - \frac{F_{SA}}{F_{DUT} G_{DUT}} &= \frac{6.095}{5.62} - \frac{15.85}{(5.62)(31.62)} = 0.996 \end{aligned}$$

Подстановка значений в уравнение (17) приведет к получению следующей общей погрешности коэффициента шума:

$$\begin{aligned} &= \sqrt{((1.085)(.125))^2 + ((.0892)(.105))^2 + ((.0836)(.587))^2 + ((.996)(.2))^2} \\ &= 0.243 \text{ dB} \end{aligned}$$

7 Калькулятор Rohde & Schwarz для расчета коэффициента шума и погрешности измерений

Несмотря на то, что методы оценки, предложенные в разделе 4, очень просты, расчет погрешностей измерений довольно сложен для того, чтобы выполнять его вручную. Для упрощения этой задачи в данных указаниях по применению Rohde & Schwarz предлагает программу-калькулятор погрешности *Noise Figure and Uncertainty Calculator*, выполняющую расчет коэффициента шума и погрешности измерений (может быть бесплатно загружена с веб-сайта R&S). Программное обеспечение предназначено для использования с операционными системами Microsoft Windows 7 или Windows XP. Оно представляет собой отдельную программу, не требующую установки. Приложение состоит из одного окна, в котором выполняются вычисления погрешности измерений коэффициента шума и анализ рекомендаций по измерению. Пользователю нужно просто ввести требуемые параметры источника шума, ИУ и анализатора. Также имеется опция для вычисления коэффициента шума и коэффициента усиления на основе измерений, проводимых вручную, описанных в разделе 3.

7.1 Использование калькулятора

Основная функция калькулятора – вычисление погрешности измерений коэффициента шума и анализ рекомендаций по измерению. Для вычисления погрешности измерений пользователю необходимо ввести следующие параметры:

- Согласование выхода источника шума (КСВН или потери на отражение)
- Погрешность значения ENR источника шума (дБ)
- Согласование входа и выхода ИУ (КСВН или потери на отражение)
- Коэффициент шума и коэффициент усиления ИУ (дБ)
- Согласование входа анализатора спектра (КСВН или потери на отражение)
- Шум анализатора спектра (Коэффициент шума или DANL)
- Погрешность коэффициента усиления и погрешность коэффициента шума анализатора спектра (дБ)

Рекомендации по измерению основываются на трех следующих параметрах, вводимых пользователем:

- Коэффициент избыточного шума ENR источника шума (дБ)
- Коэффициент шума и коэффициент усиления ИУ (дБ)
- Шум анализатора спектра (коэффициент шума или DANL)

Результаты расчета погрешности и рекомендации обновляются сразу при изменении параметров.

Пользователь может ввести параметры источника шума вручную (User) или выбрать конкретную модель источника шума в выпадающем списке (см. рисунок 9). При выборе модели автоматически вводятся выходное согласование и номинальное значение ENR. Согласование является частотно-зависимым параметром и изменяется при вводе частоты. Значение ENR зависит от конкретного прибора, поэтому устанавливается только номинальное значение параметра ENR для выбранной модели.

Таким же образом, параметры анализатора спектра могут быть введены вручную (User) или в выпадающем списке может быть выбрана модель анализатора спектра. При выборе модели анализатора спектра автоматически вводятся входное согласование, DANL (средний уровень собственных шумов), погрешность коэффициента усиления и погрешность коэффициента шума. Если выбранная модель содержит встроенный предусилитель, то будет доступна кнопка-флажок "Int PA" и при установке в ней флажка будет установлен соответствующий уровень DANL.

Значения входного согласования и DANL являются частотно-зависимыми, поэтому при вводе частоты они изменяются. Кроме того для выбора внутреннего предусилителя пользователь может оценить влияние внешнего предусилителя с помощью кнопки-флажка "Ext PA". При установке флажка пользователь может ввести коэффициент усиления и коэффициент шума внешнего предусилителя. При этом поле *Analyzer Input Match* (Согласование входа анализатора) принимает значение *Ext PA Input Match* (Согласование входа внешнего предусилителя).

При выборе модели источника шума или анализатора спектра устанавливаемые значения являются гарантированными, а не типичными. Фактически значения, скорее всего, будут лучше, чем введенный наихудший случай.

Расчет погрешности для устройств с преобразованием частоты будет немного отличаться. В приложении имеется кнопка-флажок для определения данного типа ИУ. Если установлен флажок "Freq Conv", то появятся два поля для ввода частоты – входной и выходной частот. Обратите внимание, что если и для источника шума и для анализатора спектра установлен пользовательский режим "User", поле Frequency (частота) неактивно и не будет использоваться ни при каких вычислениях.

Если уровень шума анализатора вводится в виде значения DANL, приложение преобразует значение в эквивалентный коэффициент шума (NF), необходимый для расчета погрешности, с помощью следующей формулы: $NF = DANL + 173,98 \text{ дБмВт} + 2,51 \text{ дБ} - 0,27 \text{ дБ}$ ($173,98 \text{ дБмВт}$ – значение kTB при 290 К, $2,51 \text{ дБ}$ – поправка для детектора отсчетов и логарифмического усреднения, используемого для определения DANL, $0,27 \text{ дБ}$ – поправка эквивалентной шумовой полосы для 1 кГц цифрового разрешающего фильтра Гаусса, используемого для определения DANL).

Кроме того, двумя составляющими погрешности измерений, обычно небольшими, являются погрешности коэффициента усиления и коэффициента шума анализатора спектра. Если выбрана определенная модель анализатора спектра, то данные значения вводятся автоматически. Пользователь может скрыть эти значения, выбрав в меню пункт "Option → Hide SA Uncertainties", но они все равно будут использоваться при расчете погрешности.

Измерение коэффициента шума устройств с большим коэффициентом усиления иногда выполняется без калибровки, так как шум, добавляемый на втором этапе (анализатором), незначителен. Пользователь может использовать функцию просмотра результатов при исключении коррекции второго каскада путем деактивации пункта "Enable 2nd Stage Correction" в меню "Options". При этом этап калибровки будет исключен из вычислений и показана смещенная погрешность измерений (всегда положительная) в связи с отсутствием калибровки. Обратите внимание, что при отключении коррекции второго каскада рекомендации по измерению не отображаются.

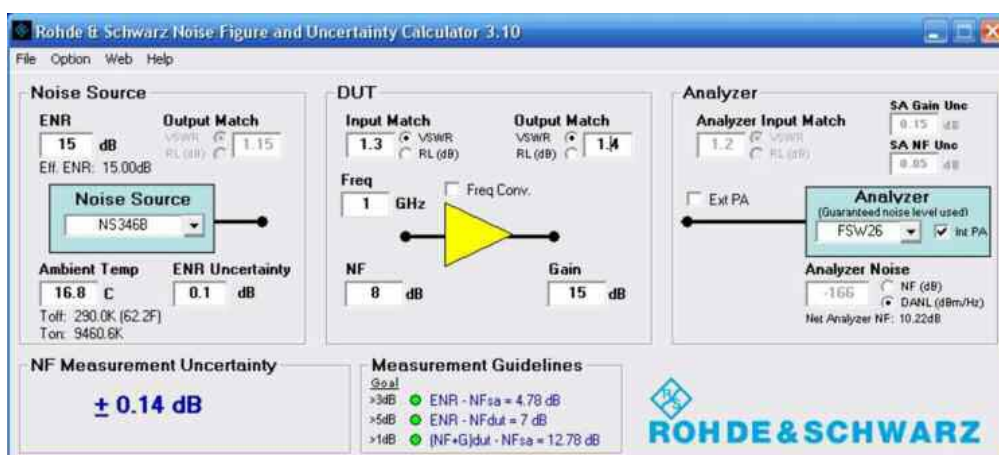


Рисунок 9 – Калькулятор Rohde & Schwarz для расчета коэффициента шума и погрешности измерений. В примере выбран источник шума NS346A и анализатор спектра FSW26 с внутренним предусилителем.

7.2 Отображение уровней оценки при измерениях вручную

В приложении имеется дополнительная возможность отображения уровней оценки четырех основных измерений, описанных в разделе 3. Данные значения оцениваются на основе значения ENR источника шума, коэффициента шума и коэффициента усиления ИУ, а также шума анализатора. Для отображения данных значений выберите в меню "Options" пункт "Show Manual Measurement Values" (см. рисунок 10). Обратите внимание, что четыре абсолютных уровня только оцениваются, так как они зависят от полосы разрешения анализатора, коэффициента прямоугольности фильтра, потерь и т.д. Однако дельта-значения между уровнями и соответствующими значениями Y_{cal} , Y_{meas} , NF_{sa} , $NF_{(dut+sa)}$ являются точными.

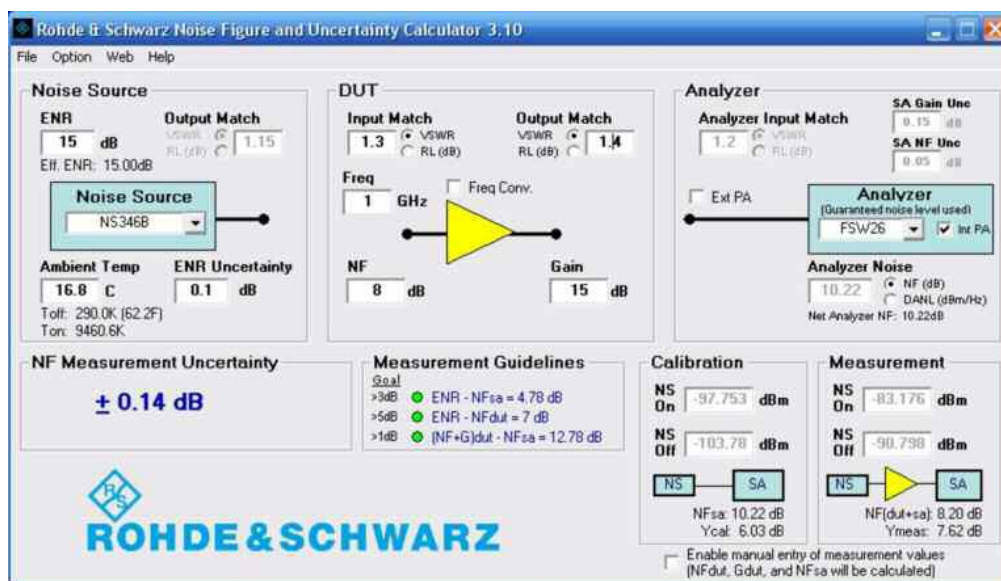


Рисунок 10 – Калькулятор для вычисления коэффициента шума и погрешности измерений с включенными уровнями оценки измерений.

7.3 Полностью ручное измерение коэффициента шума

Приложение позволяет выполнять расчеты, описанные в разделе 3 при проведении полностью ручных измерений коэффициента шума. Поля калибровки и измерений будут доступны для пользовательского ввода, если отмечена кнопка-флажок "Enable manual entry of measurement values" (Разрешить ручной ввод измеренных значений) (см. рисунок 11).

Параметры, используемые для расчета коэффициента шума и коэффициента усиления ИУ и шума анализатора:

- Значение коэффициента избыточного шума ENR (дБ)
- Температура окружающей среды источника шума (градусы Цельсия, C)
- Измерение порога шума анализатора при выключенном ("off") источнике шума (дБмВт)
- Измерение порога шума анализатора при включенном ("on") источнике шума (дБмВт)
- Измерение шума на выходе ИУ при выключенном ("off") источнике шума (дБмВт)
- Измерение шума на выходе ИУ при включенном ("on") источнике шума (дБмВт)

Коэффициент шума и коэффициент усиления ИУ обновляются сразу же при вводе значений, также как и погрешность измерений коэффициента шума и рекомендации по измерению. Кроме того, коэффициент шума анализатора спектра отображается в нижней части раздела "Calibration" (Калибровка), а каскадный коэффициент шума ИУ и анализатора отображается в нижней части раздела "Measurement" (Измерение).

Значения коэффициента избыточного шума ENR, указанные производителем или калибровочной лабораторией, относятся к температуре окружающей среды 290 К. Однако часто реальная температура окружающей среды не равна 290 К. В поле "Ambient Temp" пользователь может ввести реальную температуру окружающей среды источника шума, и коэффициент шума будет скорректирован с помощью действующих значений ENR и T_{on} (отображается в области источника шума). Обращаясь к рисунку 4, мы увидим, что изменения температуры окружающей среды может быть визуализировано путем сдвига по горизонтали вертикальных точек T_{off} и T_{on} , тогда как наклон и пересечение с осью Y для синей линии остаются неизменными.

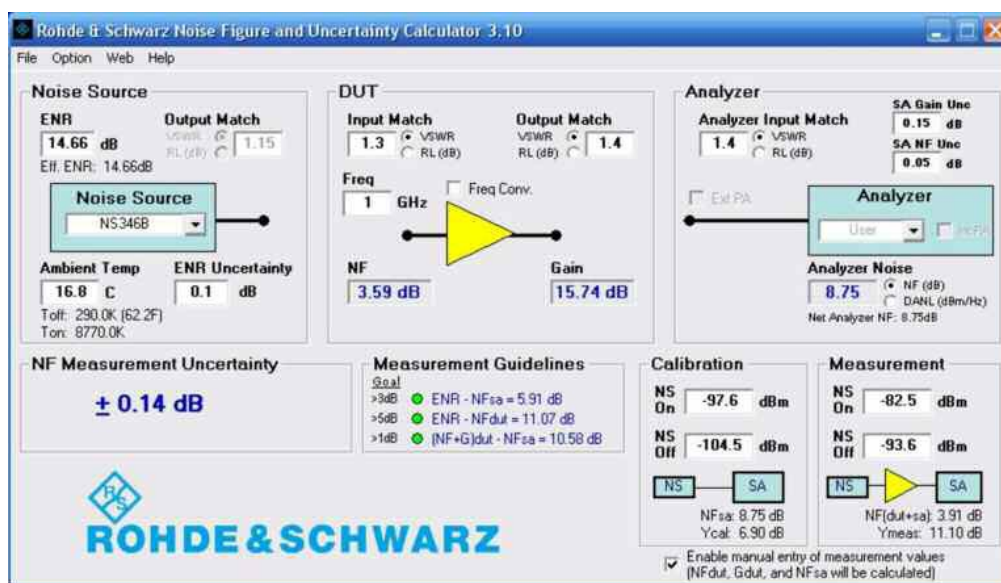


Рисунок 11 – Калькулятор при проведении измерений вручную, с примером из раздела 3.

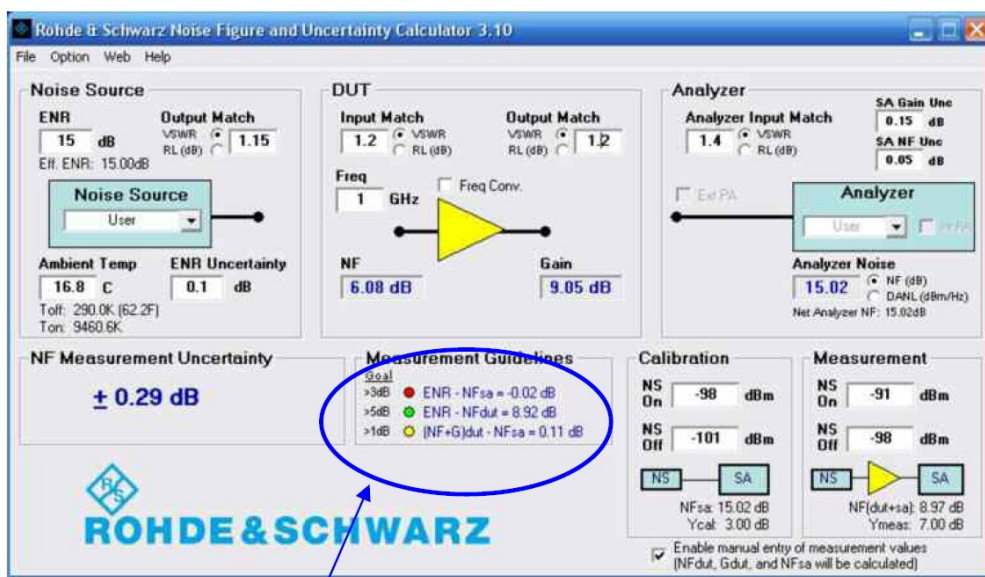
7.4 Использование рекомендаций по измерению для обеспечения воспроизводимости результатов

Рекомендации по измерению, описанные в разделе 4, вычисляются на основе коэффициента шума и коэффициента усиления ИУ, коэффициента шума анализатора и значения ENR. Данные рекомендации даются для оценки качества измерений. Соответствие рекомендациям отображается следующим образом:

- Зеленый цвет: соответствие рекомендациям
- Желтый цвет: соответствие рекомендациям, но только в пределах 1 дБ
- Красный цвет: несоответствие рекомендациям

Пользователю следует выбрать источник шума, анализатор спектра и предусилитель таким образом, чтобы все три рекомендации были отмечены зеленым цветом. Следует обратить внимание, что значение ENR источника шума влияет на рекомендации 1 и 2,

а комбинация анализатор спектра/предусилитель (внутренний или внешний) влияет на рекомендации 1 и 3. Может показаться, что чем выше значение ENR, тем лучше, однако источники шума с высоким значением ENR имеют плохой КСВН, который может увеличить погрешность. Таким образом, чтобы соответствовать рекомендациям, лучше выбирать источник шума с наименьшим допустимым значением ENR. Что касается анализатора спектра, то чем ниже коэффициент шума, тем лучше. На рисунке 12 показан пример, в котором нет соответствия рекомендациям 1 и 3. Это говорит о том, что коэффициент шума анализатора недостаточно низкий для проведения качественных измерений, а также должен учитываться предусилитель (внутренний или внешний).



Рекомендации по измерению

Рисунок 12 – Пример использования рекомендаций по измерению.

7.5 Обзор меню и дополнительных функций

Кроме расчета погрешности и рекомендаций по измерению, приложение позволяет анализировать влияние каждой составляющей на общую погрешность измерений коэффициента шума. Любой параметр может быть легко увеличен: следует выделить его и воспользоваться сочетаниями клавиш Ctrl-стрелка вверх (+0,01 дБ), стрелка вверх (+0,1 дБ), или Shift-стрелка вверх (+1 дБ). Аналогично используется стрелка вниз для уменьшения выделенного параметра. При смещении отдельных параметров на 0,1 дБ и наблюдении за значением погрешности, пользователь может легко оценить чувствительность погрешности измерений в отношении каждого из параметров. Этот простой метод позволяет быстро определить, какие параметры являются наиболее значимыми для погрешности измерений, и где могут быть внесены улучшения.

Погрешность измерений по умолчанию отображается с разрешением 0,01 дБ, но пользователь может изменять разрешение в диапазоне от 0,1 до 0,0001 дБ с помощью нажатия в любом месте раздела "NF Measurement Uncertainty" и выбора требуемого разрешения. Для отображения всех комбинаций клавиш выберите пункт "UI Hints" в меню "Help" (см. рисунок 13).

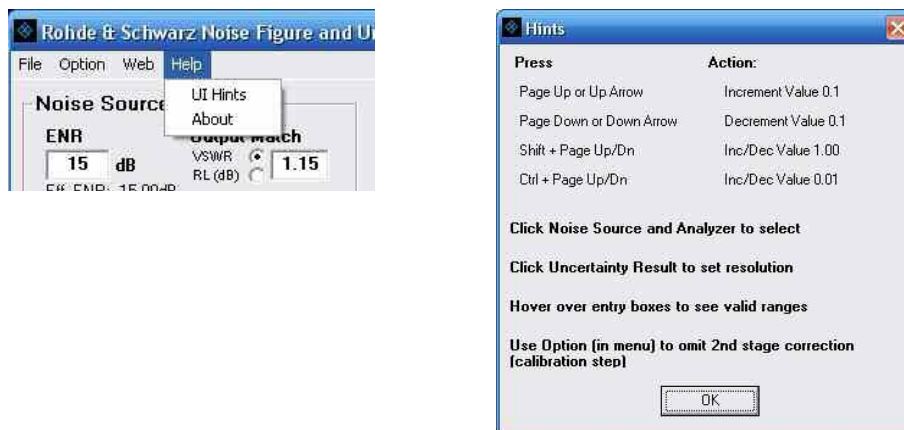


Рисунок 13 – Раздел *UI Hints* доступен в меню *Help*.

Большая часть параметров, вводимых пользователем, защищена от ввода некорректных значений (например, КСВН < 1, ENR < 0, и т.д.), однако ошибка может возникнуть при вводе определенной комбинации нескольких значений. Если появилась такая ошибка, приложение отметит проблемные параметры красным цветом и появится сообщение с описанием проблемы (см. рисунок 14).

Такое возможно в следующих ситуациях:

- коэффициент шума ИУ < -коэффициент усиления ИУ (т.е. NF < потеря)
- Уровень включенного источника шума NS On ≤ уровень выключенного источника шума NS Off (при калибровке или измерении)
- Уровень выключенного источника шума NS Off при измерении < уровень выключенного источника шума NS Off при калибровке

В меню "File" имеется три варианта выбора:

- "Reset to Startup Values" – перезапуск программы с исходными значениями без изменения любых необязательных настроек;
- "Preset" – перезапуск приложения полностью в соответствии с начальными условиями;
- "Exit" – закрытие приложения.

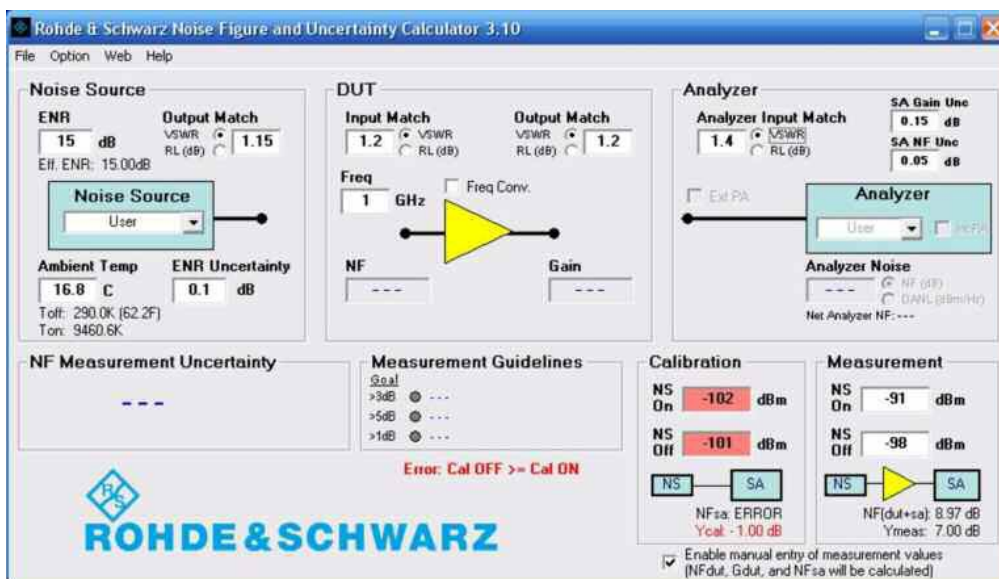


Рисунок 14 – Пример ввода ошибочных условий (уровень выключенного источника шума NS Off при калибровке > уровень включенного источника шума NS On).

Меню "Web" содержит список ссылок на страницы опций приборов R&S для измерения коэффициента шума, страницы источников шума и соответствующие указания по применению.

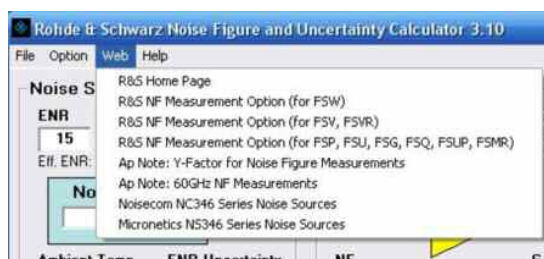


Рисунок 15 – Меню Web содержит ссылки на некоторые полезные сайты, относящиеся к измерениям коэффициента шума.

8 Способы улучшения результатов измерений коэффициента шума

Существует несколько возможных способов, которые можно применить, если вычисленная погрешность измерений не удовлетворяет требованиям текущей задачи. Как правило, наибольший вклад в погрешность измерений коэффициента шума вносит анализатор спектра. Без предусилителя обычный анализатор спектра имеет коэффициент шума более 20 дБ. К счастью, большая часть анализаторов спектра имеет опциональный внутренний предусилитель, который существенно улучшает коэффициент шума анализатора. В действительности для проведения качественных измерений коэффициента шума почти всегда требуется использование предусилителя (внутреннего или внешнего).

Например, если ИУ имеет коэффициент шума 5 дБ, а коэффициент усиления 10 дБ, анализатор спектра среднего класса без предусилителя может дать погрешность измерения более 6 дБ! Внутренний предусилитель улучшит ее до 0,7 дБ. Внешний предусилитель с высоким коэффициентом усиления и низким уровнем шума может дать даже лучший результат. Предусилитель (внешний, внутренний или оба) работает как часть измерительной системы, и калибруют его вместе с остальной частью системы на этапе калибровки.

Рассогласование также вносит вклад в погрешность измерений. Для минимизации рассогласования и уменьшения погрешности в систему могут быть добавлены небольшие аттенюаторы или вентили. Эти компоненты должны быть включены на этапе калибровки, тогда они будут учтены во время измерений. И, конечно, источники шума с низким значением ENR, как правило, имеют лучшее согласование.

Кроме того, для минимизации погрешности измерений следует максимально обеспечить их воспроизводимость. Это осуществляется при соблюдении всех трех рекомендаций, описанных в разделе 4. Всегда желательно использование анализатора спектра и предусилителя для получения наименьшего уровня системного шума. Однако выбор оптимального источника шума более важен, так как чем выше значение ENR, тем хуже характеристики согласования. Хорошее согласование уменьшает погрешность измерений, а высокое значение ENR улучшает воспроизводимость.

9 Заключение

Измерения коэффициента шума достаточно просты при использовании источника шума и анализатора спектра. Выполнение процесса вручную может быть трудоемким, но дает точные результаты. Рекомендации по измерению позволяют обеспечить воспроизводимость измерений с определенной погрешностью. Компания Rohde & Schwarz предлагает программное приложение, позволяющее на основе условий измерений рассчитать коэффициент шума и погрешность измерений. Приложение позволяет быстро оценить точность различных вариантов измерительных сценариев.

Кроме выполнения процесса измерений вручную, большая часть современных анализаторов спектра (и все текущие модели анализаторов спектра Rohde & Schwarz) имеют функцию измерений коэффициента шума. Данная функция автоматизирует все этапы измерений и предоставляет пользователю информацию о коэффициенте шума и коэффициенте усиления ИУ в графической и табличной формах.

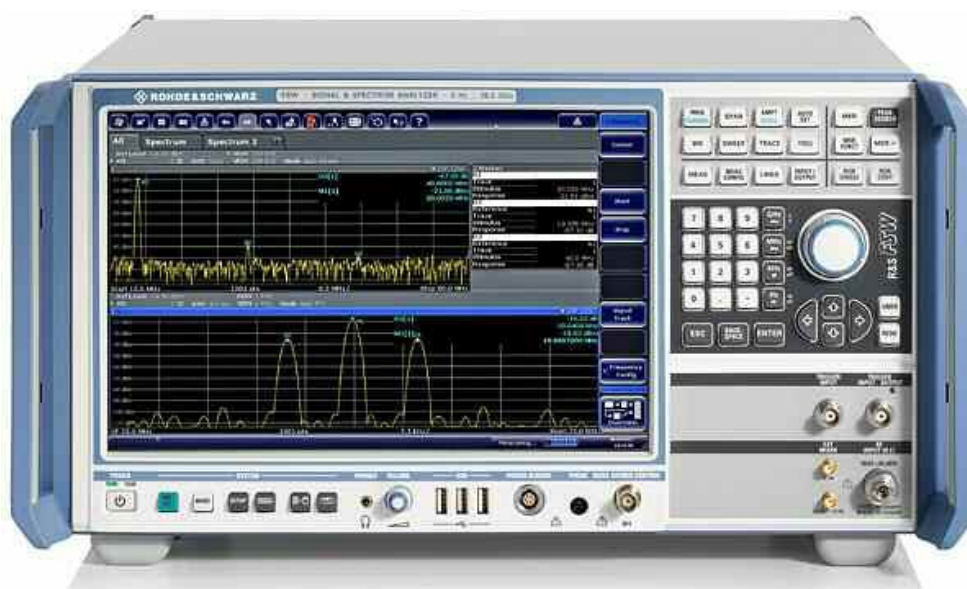


Рисунок 16 – Анализатор спектра Rohde & Schwarz FSW. Прибор является идеальным выбором для проведения измерений коэффициента шума благодаря низкому уровню собственного шума, встроенному предусилителю и функции управления источником шума.

10 Библиография

- [1] Д. М. Позар, "Техника СВЧ", Джон Вилей и сыновья, 1998.
- [2] С. Рошер, "Основы спектрального анализа", Rohde & Schwarz, 2005.
- [3] Л. Колби и Б. Хейнз, "Погрешность систем измерения коэффициента шума", ВЧ & СВЧ симпозиум и выставка, Hewlett Packard, 1988.
- [4] Д. Бойд, "Расчет погрешности измерений коэффициента шума", СВЧ и ВЧ, октябрь, 1999, стр. 93.
- [5] Rohde & Schwarz, "Руководство по эксплуатации FSU", Rohde & Schwarz, 2003.
- [6] В. Вендлер и Б. Муро, "Измерение коэффициента шума в 60 ГГц диапазоне", Rohde & Schwarz Указания по применению 1EF64, 2009.
- [7] С. Нейхардт, М. Бир, А. Пэйч, "Опция измерения коэффициента шума ZVAB-K30", Rohde & Schwarz Указания по применению 1EZ61, 2010.

О компании Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz представляет собой независимую группу компаний, специализирующуюся на производстве электронного оборудования. Rohde & Schwarz является ведущим поставщиком контрольно-измерительных систем и приборов, оборудования для теле- и радиовещания, систем радиомониторинга и радиопеленгации, а также систем профессиональной радиосвязи специального назначения. Rohde & Schwarz успешно работает уже 75 лет, представительства и сервисные центры компании находятся в более чем 70 странах. Головной офис компании расположен в Мюнхене, Германия.

Обязательства по охране окружающей среды

- Энергосберегающие изделия
- Постоянное улучшение экологической устойчивости
- Сертифицированная система экологического менеджмента ISO 14001



Контакты в регионах

Европа, Африка, Ближний Восток / +49 89 4129 12345
customersupport@rohde-schwarz.com

Северная Америка / 1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)
customer.support@rsa.rohde-schwarz.com

Латинская Америка / +1-410-910-7988
customersupport.la@rohde-schwarz.com

Азия/Тихий океан / +65 65 13 04 88
customersupport.asia@rohde-schwarz.com

Китай / +86-800-810-8228 /+86-400-650-5896
customersupport.china@rohde-schwarz.com

Представительство в Москве

115093 Москва, ул. Павловская, 7, стр.1, этаж 5
тел. +7 (495) 981 35 60
факс +7 (495) 981 35 65
info.russia@rohde-schwarz.com

Данный документ и поставляемые программы могут применяться только при соблюдении условий, изложенных в области загрузки веб-сайта Rohde & Schwarz.

R&S® является зарегистрированным товарным знаком компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Товарные знаки и торговые марки принадлежат соответствующим владельцам.

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Mühlhofstraße 15 | D - 81671 München

Тел. + 49 89 4129 - 0 | Факс + 49 89 4129 - 13777

www.rohde-schwarz.com