

# Скалярный анализ цепей с помощью измерителей мощности серии U2000 с шиной USB

## Руководство по применению

### Обзор

Измерители мощности Agilent серии U2000 с шиной USB — это лёгкие компактные приборы, которые позволяют осуществлять точное измерение мощности ВЧ и СВЧ сигналов. При использовании совместно с делителем мощности, ответвителем и источником сигналов измерители серии U2000 обеспечивают возможность проведения скалярного анализа цепей (САЦ). Скалярный анализ цепей позволяет исследовать зависимость отклика от входного воздействия, в частности, проводить измерение значения коэффициента усиления, вносимых и обратных потерь, а также частотной характеристики. Эти измерения используются для определения коэффициентов передачи и отражения различных устройств: кабелей, фильтров, усилителей, а также сложных систем, состоящих из множества компонентов, элементов и цепей.

Примерами измерений «воздействие-отклик» являются:

- определение полосы пропускания полосового фильтра по уровню  $-3$  дБ;
- коэффициент усиления и обратные потери усилителя;
- обратные потери в антенне;
- неравномерность фильтра нижних частот;
- частотная характеристика кабеля.

При измерениях по принципу «воздействие-отклик» необходимо наличие источника, обеспечивающего подачу входных сигналов на тестируемое устройство (ТУ), и приёмника (в данном случае — измерителя мощности), который позволяет анализировать параметры частотной характеристики ТУ. Компания Agilent предлагает широкий спектр измерителей мощности, которые могут функционировать на частотах свыше 26,5 ГГц. Однако в данном руководстве по применению будут рассмотрены только измерители мощности с шиной USB.

В этом руководстве по применению будет показано, как провести точные измерения по принципу «воздействие-отклик» с использованием:

- измерителей мощности серии U2000 с шиной USB;
- генераторов сигналов серий ESG, MXG и PSG;
- широкополосных ответвителей;
- делителей мощности.

В данном руководстве особое внимание уделяется характеристикам и особенностям измерителей серии U2000, существенным для проведения САЦ, а также сравниваются их функциональные возможности с возможностями других приборов. В руководстве показано, как с помощью измерителей серии U2000 можно проводить раздельное и одновременное измерение параметров передачи и отражения, а также измерения со свипированием по мощности. Кроме того, оцениваются погрешности измерений.



**Agilent Technologies**

## Содержание

Обзор .....	1
Сопоставление измерительного оборудования .....	3
Измерение параметров передачи .....	6
Погрешности измерения параметров передачи .....	10
Измерение параметров отражения .....	14
Погрешность измерения параметров отражения .....	17
Одновременное измерение параметров передачи и отражения .....	22
Погрешность измерения параметров передачи и отражения .....	25
Измерения со свипированием по мощности .....	26
Оптимизация скорости измерений .....	27
Выводы .....	28
Информация для заказа .....	29
Полезные ссылки .....	31
Литература по теме .....	31
Приложение .....	32
Сервис и техническая поддержка .....	последняя страница обложки
Контактная информация .....	последняя страница обложки

## Сопоставление измерительного оборудования

Существует несколько типов приборов, позволяющих проводить измерения по методу «воздействие-отклик»: устройства для скалярных измерений на основе измерителей с шиной USB, анализаторы цепей и анализаторы спектра со следящими генераторами.

### Анализаторы цепей

Анализаторы цепей бывают двух типов: векторные и скалярные. Если требуется информация о фазовых соотношениях сигнала, то нужно использовать векторный анализатор цепей (ВАЦ). Векторный анализатор обеспечивает наиболее точные измерения по методу «воздействие-отклик» благодаря использованию алгоритмов векторной коррекции ошибок. Анализаторы спектра со свипируемой частотой настройки, скалярные анализаторы цепей (САЦ) и измерители мощности относятся к инструментам скалярного анализа. Скалярные анализаторы цепей (например, снятый с производства анализатор Agilent 8757D) являются наиболее популярными приборами для проведения скалярных измерений «воздействие-отклик».

Функциональные возможности САЦ включают:

- широкий диапазон частот: от 10 МГц до 110 ГГц (в зависимости от используемого детектора);
- высокая скорость развёртки: от 40 мс до 400 мс на развёртку;
- несколько входных портов позволяют проводить одновременное измерение параметров передачи и отражения, исключая необходимость реконfigurирования или перекалибровки прибора;
- гибкие форматы отображения, которые можно выбирать с передней панели и которые позволяют проводить визуальный анализ измеренных САЦ параметров передачи и отражения.

### Скалярные анализаторы цепей на основе измерителей с шиной USB

Скалярные анализаторы цепей на основе USB измерителей также имеют ряд привлекательных особенностей. Такие анализаторы имеют диапазон измерения мощности от  $-60$  дБм до  $+44$  дБм — в зависимости от выбранного измерителя. Благодаря возможности полной калибровки измерителя САЦ обеспечивают высокую точность: погрешность измерений составляет порядка  $\pm 3\%$ . Неравномерность частотной характеристики снижена до уровня  $\pm 0,1$  дБ, а поправочные коэффициенты для калибровки хранятся в памяти измерителя. Пожалуй, наиболее важной особенностью измерителей с шиной USB является возможность их двойного использования. Помимо точного измерения мощности эти приборы могут быть настроены на проведение скалярных измерений мощности при сравнительно низкой общей стоимости установки.

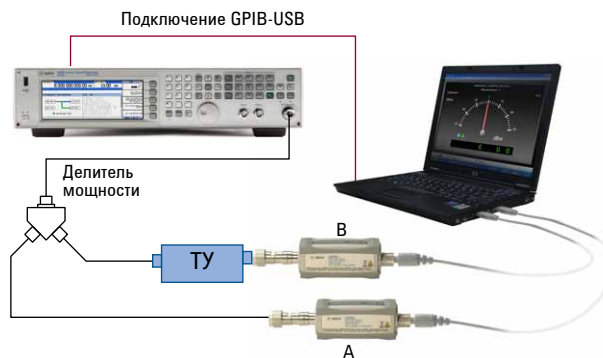
Если USB измерители серии U2000 используются совместно с источником сигналов, делителем мощности или ответвителем, то они могут быть преобразованы в САЦ, обеспечивающий измерение коэффициента передачи или потерь, а также обратных потерь. На рисунке 1 показаны некоторые примеры конфигурации скалярных анализаторов цепей на основе измерителей с шиной USB. Для каждого из вариантов конфигурации САЦ, приведённых в данном руководстве по применению, с веб-сайта Agilent можно загрузить бесплатную демонстрационную версию программного обеспечения (ПО). Демонстрационная версия ПО совместима со всеми измерителями мощности Agilent серий EPM, EPM-P и P, а также с USB измерителями.

[www.agilent.com/find/SNAsoftware\\_download](http://www.agilent.com/find/SNAsoftware_download)

# Сопоставление измерительного оборудования



а. Измерение усиления без компенсации (абсолютное)



б. Измерение усиления с компенсацией (относительное)



в. Измерение усиления после компенсации



г. Измерение обратных потерь



д. Измерение усиления и затухания при передаче и обратных потерь

Рис. 1. Скалярный анализатор цепей на основе USB измерителей серии U2000 может использоваться в различных конфигурациях.

## Сопоставление измерительного оборудования

Перед проведением измерений с использованием приборов серии U2000 необходимо провести калибровку с целью внесения поправок на потери и рассогласование от делителя мощности, ответвителя, кабелей и переходников. В следующем разделе будут рассматриваться методы измерения параметров передачи, а также требующиеся при этом виды калибровок.

В таблице 1 приводится сравнение различных типов приборов, обеспечивающих выполнение скалярного анализа цепей, включая снятый с производства скалярный анализатор Agilent 8757D и перспективные измерители мощности серии U2000 с шиной USB.

Таблица 1.

**Варианты выбора оборудования для измерений по принципу «воздействие-отклик»**

	САЦ Agilent 8757D, измеритель и направленный мост 85027x	САЦ на основе измерителей серии U2000 с шиной USB
Динамический диапазон	от -60 дБм до +16 дБм	от -60 дБм до +20 дБм (U2000A) от -50 дБм до +30 дБм (U2000H) от -30 дБм до +44 дБм (U2000B)
Частотный диапазон	от 10 МГц до 110 ГГц (в зависимости от используемого измерителя)	от 9 кГц до 26,5 ГГц (в зависимости от используемого измерителя). (Частотный диапазон может быть расширен до 110 ГГц при использовании измерителя мощности Agilent и комбинации измерителей. См. раздел «Информация для заказа» для измерителей миллиметрового диапазона)
Линейность	не определено	3%
Направленность	40 дБ в диапазоне до 20 ГГц 36 дБ в диапазоне до 26,5 ГГц 30 дБ в диапазоне до 40 ГГц 25 дБ в диапазоне до 50 ГГц (в зависимости от используемого моста)	В зависимости от используемого ответвителя/моста Пример: мост 86205A 40 дБ в диапазоне до 2 ГГц 30 дБ в диапазоне до 3 ГГц 20 дБ в диапазоне до 5 ГГц 16 дБ в диапазоне до 6 ГГц
Погрешность измерения коэффициента передачи	от 0,5 до 2,3 дБ <sup>1</sup> (динамическая погрешность + погрешность рассогласования)	от 0,3 до 0,5 дБ (погрешность рассогласования + нелинейность)
Погрешность измерения коэффициента отражения	Зависит, главным образом, от направленности ответвителя/моста	
Обратные потери детектора/измерителя (тип.) на частоте		
2 ГГц	20 дБ	40 дБ
18 ГГц	20 дБ	26 дБ
Погрешность частотной характеристики в диапазоне до 18 ГГц	±0,35 дБ для прецизионного измерителя (до ±2 дБ для других измерителей)	±0,1 дБ
Скорость измерений	от 40 до 400 мс на развёртку (75 мс для 2 кривых по 201 точке)	~50 мс на измерение (~10 с на развёртку с 201 точкой) <sup>2</sup>
Цена	8757D (снят с производства): 21 000 \$ Измеритель: от 1 800 до 2 600 \$ Общая стоимость (конфигурация 18 ГГц) ~67 000 \$ (с источником сигналов) ~35 000 \$ (без источника сигналов)	Общая стоимость (конфигурация 18 ГГц) ~40 000 \$ (с источником сигналов) ~14 000 \$ (без источника сигналов)

1. Взято из технического описания анализатора 8757D (публикация № 5091-2471E).

2. Возможно увеличение скорости до 15 мс на измерение при использовании измерителей мощности серии P и измерителей с функцией внешнего запуска измерений со свипированием. Для получения более подробной информации см. раздел «Оптимизация скорости измерений».

## Измерение параметров передачи

### В чём заключается измерение параметров передачи?

Скалярные измерения передачи мощности позволяют определять параметры усиления и потерь ТУ. Рассмотрим некоторые термины, которые обычно используются при скалярных измерениях.

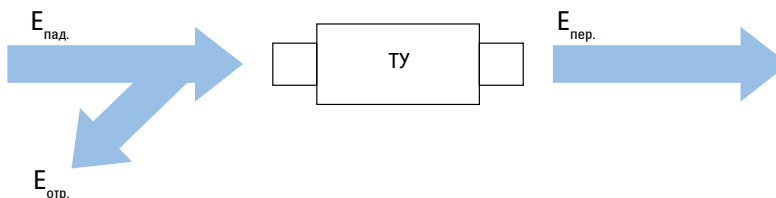


Рис. 2. Термины, используемые при скалярных измерениях цепей.

$E_{пад.}$  — напряжение падающего сигнала;

$E_{отр.}$  — напряжение отражённого сигнала;

$E_{пер.}$  — напряжение переданного сигнала.

Термины, используемые при определении коэффициента передачи, включают:

#### Коэффициент передачи (линейный):

$$\tau = \frac{E_{пер.}}{E_{пад.}}$$

$$\begin{aligned} \text{Усиление/потери при передаче (в децибелах)} &= 20 \lg \tau \text{ (усиление)} \\ &= -20 \lg \tau \text{ (потери)} \\ &= 20 \lg (E_{пер.}) - 20 \lg (E_{пад.}) \end{aligned}$$

Коэффициент передачи  $\tau$  определяется как отношение переданного напряжения  $E_{пер.}$  к падающему напряжению  $E_{пад.}$ . Так как во многих дисплеях используется логарифмическая шкала, то и коэффициент передачи должен отображаться в децибелах. Этот коэффициент применяется в различных измерениях параметров передачи. Затухание, вносимые потери и усиление определяются следующими выражениями:

$$\text{Затухание или вносимые потери (дБ)} = P_{пад.} \text{ (дБм)} - P_{пер.} \text{ (дБм)};$$

$$\text{Усиление (дБ)} = P_{пер.} \text{ (дБм)} - P_{пад.} \text{ (дБм)};$$

где

$P_{пад.}$  — мощность падающей волны;

$P_{пер.}$  — переданная мощность.

## Измерение параметров передачи

### Измерение параметров передачи с помощью САЦ на основе USB измерителей серии U2000

Существует несколько методов измерения параметров передачи с помощью САЦ на основе USB измерителей серии U2000:

1. Измерение параметров передачи без компенсации.
2. Измерение параметров передачи с компенсацией.
3. Измерение параметров передачи после компенсации.

### Измерение параметров передачи без компенсации

Как следует из названия, при измерениях параметров передачи без компенсации предполагается, что мощность на выходе источника сигналов имеет калиброванное значение и что потери в кабеле от источника до ТУ минимальны (рис. 3). В этом случае коэффициент передачи вычисляется следующим образом:

(измеренная мощность) – (мощность на выходе источника сигналов)



Рис. 3. Измерение параметров передачи без компенсации.

### Измерение параметров передачи с компенсацией

При измерениях параметров передачи с компенсацией используется делитель мощности, с помощью которого осуществляется разделение выходной мощности источника между ТУ и измерителем А (рис. 4). При соответствующих характеристиках делителя мощности мощность на входе ТУ будет равна мощности, измеренной прибором А. В этом случае коэффициент передачи вычисляется следующим образом:

(мощность, измеренная прибором В) – (мощность, измеренная прибором А)

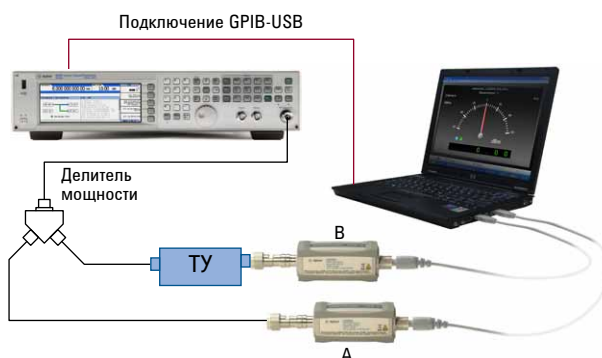


Рис. 4. Измерение параметров передачи с компенсацией.

## Измерение параметров передачи

### Измерение параметров передачи после компенсации

Измерение параметров передачи после компенсации очень похоже на измерение параметров передачи без компенсации, однако в этом случае добавляется этап калибровки тракта на потери (рис. 5). В такой конфигурации ТУ сначала отключается, в результате измеритель напрямую измеряет величину мощности на выходе источника. Эти данные сохраняются как коэффициент калибровки для всего диапазона частот. Затем ТУ снова устанавливается на своё место и производится измерение мощности на его выходе. Для вычисления коэффициента передачи используется выражение:

$$(\text{измеренная мощность}) - (\text{коэффициент калибровки})$$



Рис. 5. Измерение параметров передачи после компенсации.

### Измерение параметров передачи с компенсацией

Измерение параметров передачи с компенсацией осуществляется следующим образом:

1. USB измерители соединяются, как показано на рис. 6.
2. С помощью программного обеспечения (ПО), запущенного на компьютере, для измерителя задаются начальное («Start») и конечное («Stop») значения частоты, величина приращения («Step») частоты, а также уровень мощности на выходе источника и количество циклов усреднения.
3. Коэффициент передачи вычисляется следующим образом:

$$(\text{мощность, измеренная прибором В}) - (\text{мощность, измеренная прибором А}),$$

где мощность, измеренная устройством В, равна величине переданной мощности, а мощность, измеренная прибором А, равна величине падающей мощности.

4. Для увеличения точности измерений рекомендуется увеличить количество циклов усреднения. Однако следует иметь в виду, что это снижает скорость измерений. И наоборот, если для увеличения скорости измерений уменьшить количество циклов усреднения, то это приведёт к снижению точности измерений.

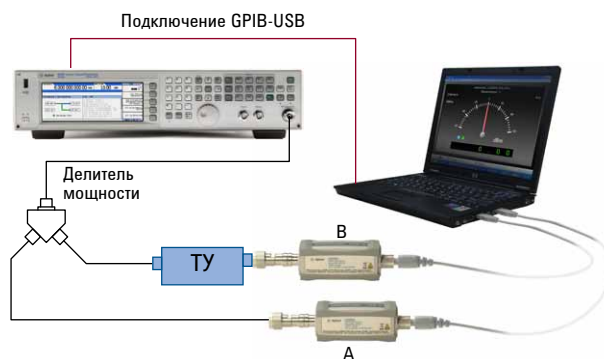


Рис. 6. Измерение параметров передачи с компенсацией.



## Измерение параметров передачи

На рисунке 7 показан пример результатов измерений параметров передачи фильтра нижних частот (ФНЧ) с использованием САЦ на основе USB измерителей серии U2000 и демонстрационной версии программного обеспечения.

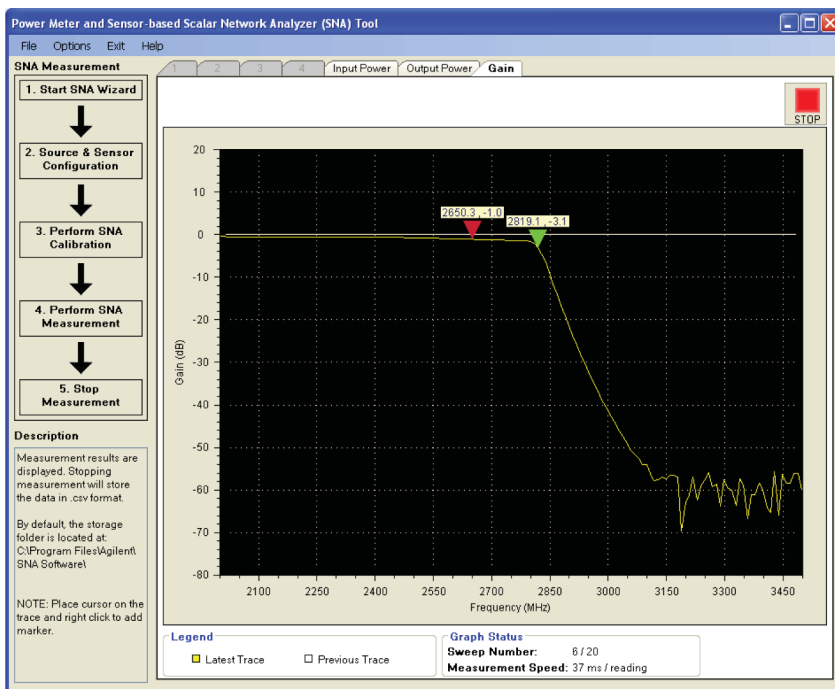


Рис. 7. Измерение параметров передачи ФНЧ с использованием САЦ на основе USB измерителей серии U2000 и демонстрационной версии программного обеспечения.

## Погрешности измерения параметров передачи

Следующим шагом после проведения измерений параметров передачи является определение погрешности измерений. Суммарная погрешность измерений параметров передачи включает погрешность частотной характеристики и рассогласования при проведении калибровки и измерений, а также нелинейность измерителя. Рассогласование источника и измерителя может привести к ошибкам как в ходе калибровки, так и при выполнении измерений. Погрешность частотной характеристики в САЦ на основе USB измерителей достаточно мала, так как в них осуществляется коррекция ошибок с использованием калибровочных коэффициентов. В дальнейшем погрешность частотной характеристики может быть вообще сведена к минимуму, если перед каждым текущим измерением проводить нормализацию или калибровку.

Измеритель мощности серии U2000 с шиной USB и диодным детектором обеспечивает преобразование энергии высокочастотных колебаний в постоянный ток. Это преобразование осуществляется благодаря выпрямительным свойствам диода, которые обусловлены нелинейностью его вольтамперной характеристики. На начальном участке характеристики (ниже  $-20$  дБм), который описывается квадратичной функцией, продетектированное напряжение на выходе диода прямо пропорционально входной мощности ( $V_{\text{вых.}}$  пропорционально  $V_{\text{вх.}}^2$ ), что позволяет проводить непосредственное измерение мощности. На участке свыше  $-20$  дБм характеристика диода становится линейной ( $V_{\text{вых.}}$  пропорционально  $V_{\text{вх.}}$ ), поэтому соотношения, справедливые для квадратичной функции, больше не выполняются. Нелинейность означает величину отклонения от идеальной прямой соотношения  $P_{\text{измеренная}} \propto P_{\text{вх.}}$  ( $V_{\text{вых.}} \propto V_{\text{вх.}}^2$  на квадратичном участке характеристики диода). У обычных диодных измерителей величина нелинейности не превышает 3%.

Правильное понимание причин появления ошибок рассогласования помогает минимизировать сопутствующую им погрешность измерения. Погрешности рассогласования подразделяются на две категории: погрешности, появляющиеся на этапе калибровки, и погрешности, появляющиеся на этапе измерений.

## Погрешности измерения параметров передачи

### Погрешности рассогласования при калибровке

Погрешности рассогласования при калибровке появляются из-за несоответствия импедансов источника сигнала и измерителя. Ввиду несогласованности сопротивлений часть энергии падающего сигнала отражается от входа измерителя обратно на источник (рис. 8). Этот отражённый сигнал затем снова отражается от источника, в результате чего образуется вектор неопределённости  $\rho_s \cdot \rho_d$ , отличающийся от падающего сигнала по фазе на некоторую неизвестную величину. Вектор погрешности может накладываться на результаты измерений, вызывая тем самым ошибки измерений при калибровке. В самом неблагоприятном случае сигнал будет регистрироваться измерителем с погрешностью, равной  $1 \pm \rho_s \cdot \rho_d$ .

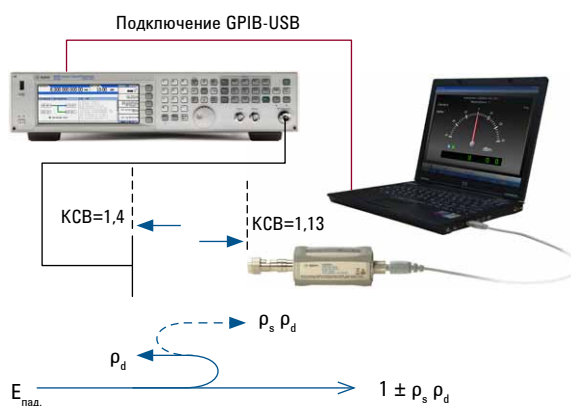


Рис. 8. Погрешности рассогласования при калибровке (измерение параметров передачи после компенсации)

## Погрешности измерения параметров передачи

### Погрешности рассогласования при измерениях

Погрешности рассогласования при измерениях параметров ТУ появляются из-за несоответствия импедансов «источник-вход ТУ» и «выход ТУ-измеритель» (рис. 9). Погрешность, вызываемая несогласованностью импедансов «источник-вход ТУ», составляет величину  $(1 \pm \rho_s \cdot \rho_1)$ , а погрешность, вызываемая несогласованностью импедансов «выход ТУ-измеритель», равна  $(1 \pm \rho_d \cdot \rho_2)$ .

Так как коэффициент передачи тестируемого устройства — это разница между калиброванным и измеренным значением мощности, то суммарная погрешность рассогласования включает в себя и погрешности при калибровке, и погрешности при измерениях.

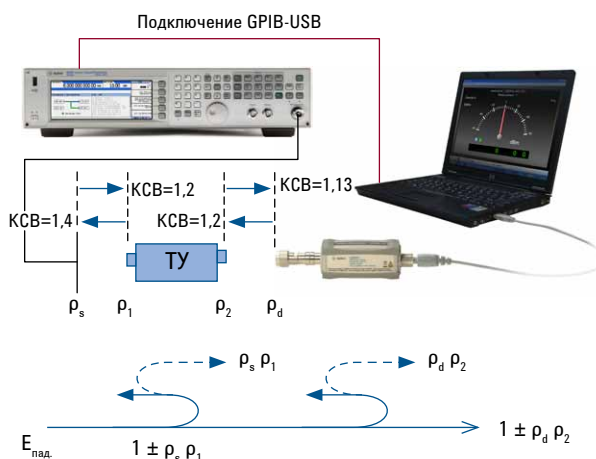


Рис. 9. Погрешности рассогласования при измерениях (измерение параметров передачи после компенсации)

### Вычисление погрешностей измерения параметров передачи

Для понимания степени воздействия погрешностей при измерении коэффициента передачи в качестве примера вычислим погрешность измерения параметров передачи для самого неблагоприятного с точки зрения величины погрешности варианта, в основе которого лежит описанный выше метод измерения параметров передачи после компенсации.

Для расчёта погрешностей рассогласования необходимо преобразовать коэффициент стоячей волны (КСВ) в коэффициент отражения  $\rho$ .

$$\rho = \frac{\text{КСВ} - 1}{\text{КСВ} + 1}$$

На частоте 1 ГГц КСВ на выходе генератора МХГ составляет 1,4, а измерителя серии U2000A — порядка 1,13. Допустим, что КСВ на входе и выходе тестируемого устройства равен 1,2. Тогда величина коэффициентов отражения составит:

$$\rho_s = 0,167; \quad \rho_d = 0,061; \quad \rho_1 = \rho_2 = 0,091.$$

## Погрешности измерения параметров передачи

Нелинейность измерителей серии U2000A не превышает 3%. Погрешность измерений параметров передачи для самого неблагоприятного варианта рассчитывается следующим образом:

$$\text{Погрешность измерений} = (\text{погрешности рассогласования при калибровке}) + (\text{погрешности рассогласования при измерении}) + 2 \times (\text{нелинейность})$$

$$\begin{aligned} \text{Погрешность измерений (дБ)} &= \\ &= 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_d) + 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_1) + 20 \lg(1 \pm \rho_d \rho_2) + 2 \times 10 \lg(1 \pm 3\%) = \\ &= 0,527 \text{ дБ или } -0,530 \text{ дБ} \end{aligned}$$

Полученная величина является максимальным значением погрешности измерения параметров передачи с помощью САЦ на основе измерителей с шиной USB. В данном примере сделано допущение, что в тестируемом устройстве развязка между входом и выходом не хуже 3 дБ, поэтому многократные повторяющиеся отражения оказывают незначительное влияние на величину погрешности. Для двунаправленных устройств с малыми потерями член « $20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_d)$ » является частью общей погрешности измерения и поэтому входит дважды в уравнение погрешности рассогласования.

Для уменьшения погрешности измерения параметров передачи используется метод компенсации, который позволяет уменьшить рассогласование источника.

Рассогласование источника может быть уменьшено путём расчёта соотношения падающего и отражённого сигналов (рис. 6). Применение этого метода позволяет компенсировать любое изменение падающего сигнала. Все переотражения фиксируются обоими измерителями, в результате путём компенсации падающего и отражённого сигналов можно нейтрализовать влияние рассогласования источника. Для этих целей, благодаря своему небольшому размеру и широкополосной характеристике, хорошо подходит делитель мощности. В этом случае в роли согласующего сопротивления источника будет выступать выходное сопротивление делителя мощности.

На частоте 1 ГГц КСВ на выходе делителя мощности составляет 1,10 ( $\rho_s = 0,0476$ ). Тогда погрешность измерения параметров передачи может быть уменьшена до величины:

$$\begin{aligned} \text{Погрешность измерений параметров передачи (дБ)} &= \\ &= 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_d) + 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_1) + 20 \lg(1 \pm \rho_d \rho_2) + 2 \times 10 \lg(1 \pm 3\%) = \\ &= 0,371 \text{ дБ или } -0,371 \text{ дБ} \end{aligned}$$

Использование метода компенсации позволило уменьшить погрешность измерения с 0,53 дБ до 0,37 дБ. Напомним, что расчёт проводился для наиболее неблагоприятного варианта измерения параметров передачи, при котором погрешность максимальна.

Для уменьшения рассогласования на участке между детектором САЦ и ТУ часто используют фиксированный аттенюатор. Основной причиной его использования является плохое входное согласование измерителя. Измерители мощности серии U2000 лишены этого недостатка, поэтому подключение дополнительного аттенюатора обычно не требуется.

## Измерение параметров отражения

### В чём заключается измерение параметров отражения?

Скалярные измерения параметров отражения позволяют установить, насколько эффективно энергия передаётся ТУ. При этом оценивается величина рассогласования между ТУ и трактом передачи  $Z_0$  ( $Z_0$  — это волновое сопротивление, обычно равное 50 Ом). Не вся энергия, подаваемая на вход ТУ, поглощается устройством; часть её отражается обратно на источник. Эффективность передачи энергии может быть определена путём сравнения падающего и отражённого сигналов.

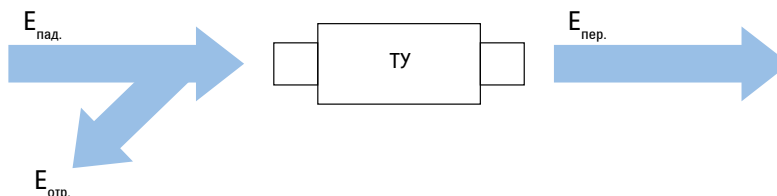


Рис. 10. Принцип скалярных измерений параметров отражения.

Коэффициент отражения  $\rho$  равен отношению напряжения отражённой волны  $E_{отр.}$  к напряжению падающей волны  $E_{пад.}$ . Для тракта передачи с волновым сопротивлением  $Z_0$ , идеально согласованного с сопротивлением нагрузки, вся энергия передаётся на нагрузку, и отражения не наблюдается:  $E_{отр.} = 0$ , следовательно, и  $\rho = 0$ . Если тот же тракт передачи на дальнем конце разомкнут (ХХ) или замкнут накоротко (КЗ), то вся энергия отражается обратно:  $E_{отр.} = E_{пад.}$ , следовательно,  $\rho = 1$ . Таким образом, коэффициент отражения  $\rho$  может принимать значения от 0 до 1.

$$\rho = \frac{E_{отр.}}{E_{пад.}}$$

Так как во многих дисплеях используется логарифмическая шкала, то и коэффициент отражения должен отображаться в децибелах. Обратные потери — это логарифмический вид соотношения между падающим и отражённым сигналами. Величина обратных потерь может быть рассчитана как  $-20 \lg \rho$ . Таким образом, величина обратных потерь лежит в пределах от бесконечности (для идеально согласованного тракта передачи) до 0 дБ (при КЗ или ХХ).

$$\text{Обратные потери} = -20 \lg \rho$$

Другим широко используемым термином является коэффициент стоячей волны (КСВ). Стоячие волны образуются при взаимодействии падающей и отражённой волн в процессе их распространения по тракту передачи. КСВ численно равен отношению максимума (по напряжению) огибающей суммарной бегущей волны к её минимуму. КСВ может вычисляться через значение коэффициента отражения  $\rho$ . Значения КСВ меняются в пределах от 1 (для идеально согласованного тракта передачи) до бесконечности (при КЗ или ХХ).

$$\text{КСВ} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$



Рис. 11. Соотношения между согласованной нагрузкой и КЗ/ХХ при измерении параметров отражения.

## Измерение параметров отражения

### Направленный ответвитель или мост

Перед тем, как приступить к более подробному описанию методов измерения параметров отражения, рассмотрим устройства, предназначенные для разделения сигнала, такие как ответвители или мосты. Эти устройства чрезвычайно важны для проведения точных измерений параметров отражения (рис. 12, 13).

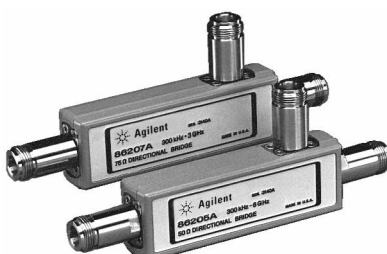


Рис. 12. Направленные мосты Agilent 86205A и 86207A.



Рис. 13. Направленный ответвитель Agilent 773D

Направленный ответвитель, или мост, предназначен для ответвления части сигнала из основного канала передачи в дополнительный. Переходное затухание (коэффициент связи) характеризует степень взаимосвязи между вторичной (дополнительный канал передачи) и первичной (основной канал) линиями ответвителя, выраженную в децибелах. При переключении ответвителя и изменении направления сигнала в основном канале на противоположное, в идеальном случае во вспомогательную линию не должно наблюдаться никакой утечки мощности. Однако в реальности некоторое количество энергии будет просачиваться через ответвитель. Мерой величины сигнала утечки служит коэффициент развязки ответвителя.

Другим термином, часто применяемым к ответвителям, является направленность. Направленность — это способность ответвителя разделять сигналы, протекающие в противоположных направлениях. Коэффициент направленности определяется как отношение мощности, измеренной во вспомогательном канале передачи с ответвителем, подключенным в прямом направлении, к мощности, измеренной во вспомогательном канале передачи с ответвителем, подключенным в обратном направлении. В обоих случаях выход ответвителя должен быть заглушен нагрузкой  $Z_0$  той же мощности, что и уровень входной мощности.

$$\text{Направленность} = \frac{\text{коэффициент связи}}{\text{коэффициент развязки}};$$

$$\text{Направленность (в дБ)} = \text{коэффициент развязки (дБ)} - \text{коэффициент связи (дБ)},$$

где

$$\text{коэффициент связи (дБ)} = -10 \lg \frac{P(\text{переходное затухание в прямом направлении})}{P_{\text{вх}}}$$

$$\text{коэффициент развязки (дБ)} = -10 \lg \frac{P(\text{переходное затухание в обратном направлении})}{P_{\text{вх}}}$$

$$\text{линейный член коэффициента направленности} = 10 \frac{-\text{Направленность (дБ)}}{20}$$

Причинами неидеальности направленности являются утечки, внутренние отражения ответвителя и отражения от соединителей.

Обычно уровень вносимых потерь широкополосного ответвителя составляет порядка 1 дБ. В то же время, направленный мост имеет вносимые потери порядка 6 дБ. Эти потери непосредственно вычитаются из динамического диапазона измерений.

## Измерение параметров отражения

### Измерение параметров отражения с помощью САЦ на основе USB измерителей серии U2000

Перед проведением измерений параметров отражения USB измеритель и генератор сигналов должны быть соединены так, как показано на рисунке 14. Для измерения отражения в схему должны быть добавлены устройства разделения сигнала: делитель мощности, направленный ответвитель или мост (рис. 15).

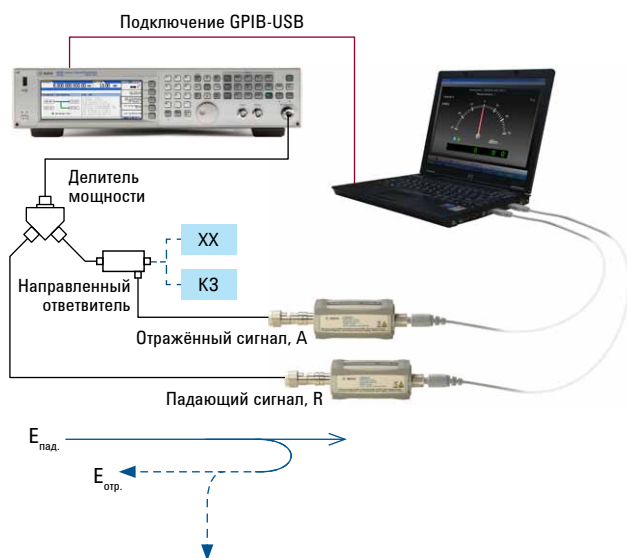


Рис. 14. Установка для калибровки перед проведением измерений параметров отражения.

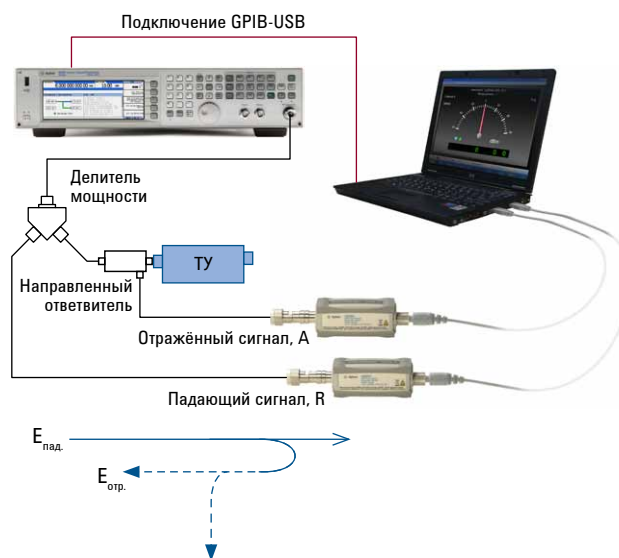


Рис. 15. Установка для измерений параметров отражения.

Делитель мощности используется для отделения части падающего сигнала с целью измерения падающей мощности, в то время как ответвитель служит для выделения отражённого сигнала при измерении отражённой мощности. Тестируемое устройство подключается к выходу ответвителя.

Для выполнения точных измерений параметров отражения требуется провести следующее.

1. Собрать установку, как показано на рисунке 14.
2. Настроить параметры источника сигнала и измерителя мощности: частотный диапазон, уровень мощности, количество усреднений.
3. Провести калибровку в режимах КЗ/ХХ для установки возвратных потерь на уровне 0 дБ и сохранить калибровочные данные в памяти компьютера. Калибровочные параметры являются результатом усреднения данных калибровки в режимах КЗ и ХХ.
4. Подключить ТУ, как показано на рисунке 15, и провести измерение параметров отражения.
5. Нормировать результаты измерений путём вычитания калибровочных параметров из измерительных данных.

При выполнении шага 2 важно, чтобы уже настроенные параметры не изменялись в ходе измерений. При изменении настроек в измерительную систему могут быть внесены погрешности, которых в ней не было.

Выполняемая в ходе шага 3 калибровка КЗ/ХХ предназначена для устранения ошибок калибровки, вызываемых направленностью и рассогласованностью источника.



## Погрешность измерения параметров отражения

После проведения измерений параметров отражения необходимо определить погрешность измерений. Погрешность измерений, связанная с измерением параметров отражения, включает в себя три составляющие.

$$\Delta\rho = A + B\rho + C\rho^2$$

Это уравнение является упрощённым представлением сложной блок-схемы анализа. В нём  $\Delta\rho$  — это погрешность для наиболее неблагоприятного варианта измерений параметров отражения (максимальная погрешность), а  $\rho$  — измеренное значение коэффициента отражения устройства. Буквами А, В и С обозначены линейные члены уравнения. Содержание каждого из этих параметров рассматривается ниже.

### Элемент А: Направленность

Направленность — это способность моста или ответвителя разделять сигналы, протекающие в противоположных направлениях. Так как ни одно из устройств разделения сигналов не является совершенным, некоторое количество падающей энергии, протекающей по основному каналу, может просачиваться через вспомогательный канал, что является причиной ошибок при измерении уровня сигнала. Этот паразитный сигнал не зависит от коэффициента отражения ТУ и добавляется (в худшем случае) непосредственно в суммарную погрешность. Если уровень сигнала, отражённого от ТУ, достаточно велик, например, в случае КЗ, тогда направленность по сравнению с отражённым сигналом будет мала и её влияние будет несущественно. Если уровень отражённого сигнала мал (высокие обратные потери), тогда паразитный сигнал будет достаточно большим по сравнению с отражённым сигналом, а погрешность, вызванная направленностью, станет значительной (рис. 16). Следовательно, правильный выбор устройства разделения сигнала чрезвычайно важен с точки зрения точности измерений параметров отражения. Для таких измерений может быть рекомендован мост Agilent 86205А, направленность которого составляет величину до 40 дБ. Так как влияние направленности не может быть устранено, следует выбирать устройство разделения сигнала с высоким значением направленности.

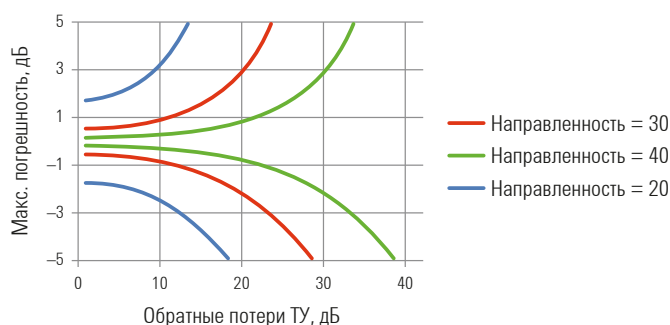


Рис. 16. Влияние направленности ответвителя на погрешность измерения параметров отражения

## Погрешность измерения параметров отражения

### Элемент В: Ошибка калибровки

При калибровке системы с использованием стандартных мер (КЗ или ХХ) осуществляется измерение некоторых элементов погрешности. Такие составляющие погрешности, как направленность и рассогласование источника, всегда имеют место и всегда должны быть измерены. Если допустить, что других ошибок нет, то минимальная погрешность калибровки будет равна сумме значений направленности и рассогласования источника:

$$B = A + C$$

На рисунке 17 показана частотная характеристика стандартной меры ХХ. Отметим наличие пульсаций, вызванных векторами ошибки рассогласования источника и направленности. В процессе калибровки может использоваться также и другая стандартная мера — мера КЗ. Отметим, что её характеристика также имеет пульсации, однако отличающиеся по фазе (рис. 18). Ошибки калибровки, вызванные суммой погрешностей направленности и рассогласования источника, могут быть устранены путём усреднения характеристик мер ХХ и КЗ. Несмотря на то, что отражения от разомкнутой цепи отличаются по фазе на 180 градусов по сравнению с цепью короткого замыкания, ошибки, вызванные суммарной погрешностью направленности и рассогласования источника, не изменяют фазу при изменении характера нагрузки с ХХ на КЗ. Таким образом, усреднения результатов калибровки в режимах ХХ и КЗ позволяет усреднить ошибку калибровки, в результате чего  $B = 0$ . На рисунке 18 показано среднее арифметическое характеристик мер ХХ и КЗ. Отметим, что пульсации характеристик удалось устранить.

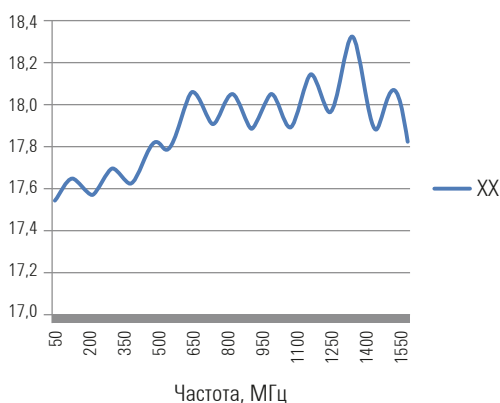


Рис. 17. Частотная характеристика стандартной меры ХХ.

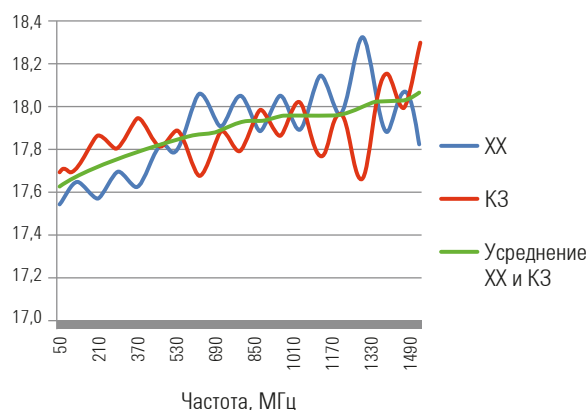


Рис. 18. Частотная характеристика стандартной меры ХХ (синий цвет), меры КЗ (красный цвет) и среднее характеристик мер ХХ и КЗ (зелёный цвет).

Среднее арифметическое характеристик мер ХХ и КЗ рассчитывается по формуле:

$$\text{Среднее арифметическое ХХ и КЗ} = \frac{C_{\text{ХХ}} - C_{\text{КЗ}}}{2},$$

где  $C_{\text{ХХ}}$  — линейный член коэффициента отражения для стандартной меры ХХ,  
 $C_{\text{КЗ}}$  — линейный член коэффициента отражения для стандартной меры КЗ.

$$\text{Среднее ХХ и КЗ (в дБ)} = 20 \lg \left( \frac{10^{\frac{-C_{\text{ХХ(дБ)}}}{20}} + 10^{\frac{-C_{\text{КЗ(дБ)}}}{20}}}{2} \right),$$

где  $C_{\text{ХХ(дБ)}}$  — коэффициент отражения в дБ для стандартной меры ХХ,  
 $C_{\text{КЗ(дБ)}}$  — коэффициент отражения в дБ для стандартной меры КЗ.

# Погрешность измерения параметров отражения

## Элемент С: Эффективное согласование источника

Идеальное согласование источника позволяет обеспечить постоянство подаваемой на нагрузку мощности вне зависимости от величины отражения от нагрузки. Если согласование источника не идеально, сигналы будут переотражаться, в результате чего в падающий сигнал будет добавляться некоторое неизвестное значение фазы, что, в свою очередь, способствует появлению ошибки измерений. На рисунке 19 схематически показано прохождение отражённого сигнала. Сначала сигнал отражается от ТУ. Этот отражённый сигнал  $\rho_L$  (коэффициент отражения ТУ) направлен к источнику. Если согласование источника не идеально, то сигнал снова отражается от источника (с коэффициентом отражения  $\rho_S$ ). Этот сигнал,  $\rho_L \rho_S$ , вновь отражается от ТУ, в результате чего образуется сигнал  $\rho_L^2 \rho_S$ . Если уровень отражённого сигнала  $\rho_L$  будет велик (низкие обратные потери), тогда рассогласованность источника будет вызвать значительную погрешность. Если отражённый сигнал  $\rho_L$  мал, тогда влияние рассогласованности источника будет несущественным (рис. 20). Заметим, что этот случай является полной противоположностью эффекта направленности, когда высокий уровень обратных потерь усиливает влияние направленности, а низкие обратные потери ослабляют её воздействие.

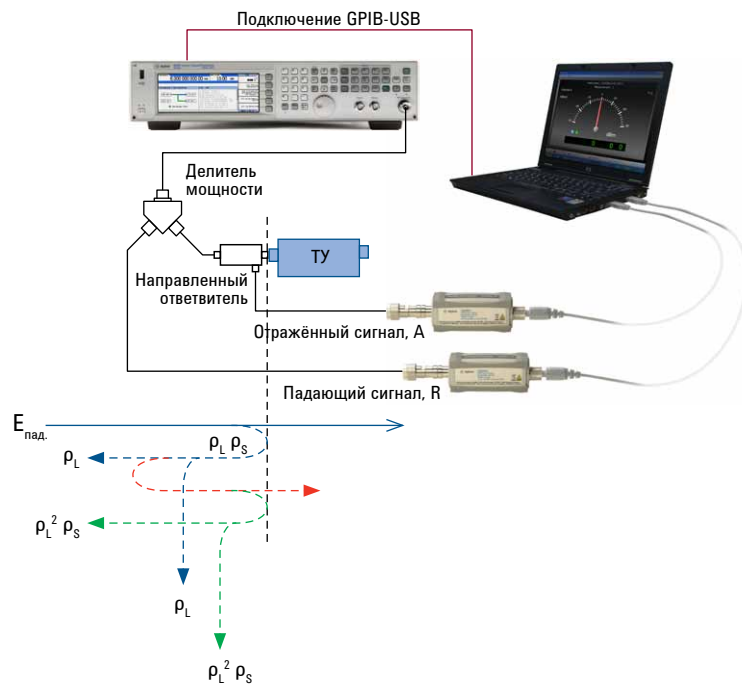


Рис. 19. Для улучшения согласованности источника используется метод компенсации.

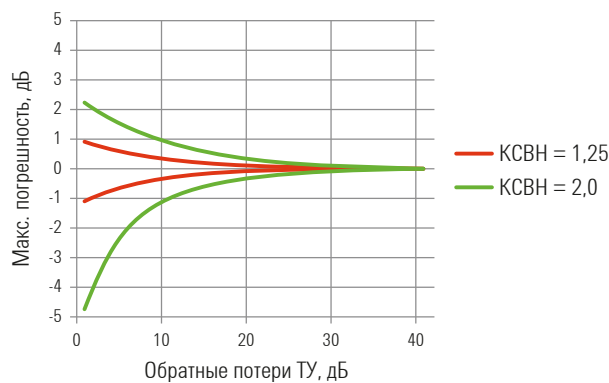


Рис. 20. Влияние согласованности источника на погрешность измерения параметров отражения

## Погрешность измерения параметров отражения

Эффективное согласование источника может быть улучшено путём компенсации падающего и отражённого сигналов с применением двухрезисторного делителя мощности. Все отражённые сигналы регистрируются обоими измерителями. В этом случае, если использовать соотношение отражённого и падающего сигналов, можно устранить влияние рассогласования источника. А так как делитель не идеален, необходимо определить эффективное согласование источника. Это может быть сделано с помощью руководства по выбору делителя мощности (ВЧ и СВЧ принадлежности Agilent для испытаний) («Agilent RF and Microwave Test Accessories», публикация № 5990-5499EN). Эффективное согласование источника для делителя мощности Agilent 11667A составляет менее 1,1 на частотах до 4 ГГц, менее 1,2 в диапазоне частот от 4 ГГц до 8 ГГц и менее 1,33 для частот от 8 ГГц до 18 ГГц.

Таким образом, мы рассмотрели три способа повышения точности измерений параметров отражения.

1. Ответители и мосты с высоким коэффициентом направленности позволяют уменьшить значение параметра А (погрешность направленности), что даёт возможность повысить точность измерений параметров устройств с низким коэффициентом отражения.
2. Усреднение результатов калибровки в режимах XX и K3 позволяет избавиться от элемента В (ошибка калибровки) в уравнении погрешности.
3. Улучшение согласования источника может быть достигнуто путём использования метода компенсации для уменьшения параметра С (эффективное согласование источника) в уравнении погрешности.

### Примеры повышения точности измерений

Приведённые ниже примеры показывают, как эти методы влияют на точность измерений параметров отражения.

#### Пример 1.

Проводится измерение параметров устройства, имеющего обратные потери на уровне 12 дБ ( $\rho = 0,2512$ ). Предварительно проводилась калибровка только в режиме XX.

Направленность ответителя составляет 30 дБ (0,0316).

Согласование источника равно 1,4:1 ( $\rho_s = 0,1667$ ).

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= A + B\rho + C\rho^2 = \\ &= 0,0316 + (0,03162 + 0,1667) \times 0,2512 + 0,1667 \times 0,2512^2 = \\ &= 0,0316 + 0,0498 + 0,0105 = 0,0919\end{aligned}$$

Максимальная погрешность измерения  $\Delta\rho$  параметров отражения устройства с  $\rho = 0,2512$  составляет  $\pm 0,0919$ . Преобразование в децибелы даёт:

$$-20 \lg(0,2512 \pm 0,0919) = 9,3 \text{ дБ или } 16,0 \text{ дБ.}$$

Таким образом, погрешность измерения в децибелах в данном случае равна  $-2,7$  дБ и  $4,0$  дБ, что составляет довольно существенную величину.

#### Пример 2:

Точность измерений может быть повышена путём проведения усреднения результатов калибровки в режимах XX и K3 с целью исключения элемента В. При использовании того же комплекта оборудования погрешность составит:

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= A + B\rho + C\rho^2 = \\ &= 0,0316 + 0 + 0,1667 \times 0,2512^2 = \\ &= 0,0316 + 0,0105 = 0,0421\end{aligned}$$

Погрешность измерения в децибелах составит  $-1,3$  дБ и  $1,6$  дБ, что значительно меньше, чем в предыдущем примере.

## Погрешность измерения параметров отражения

### Пример 3:

Для дальнейшего повышения точности измерений может быть использован метод компенсации с помощью делителя мощности. Благодаря применению делителя согласование источника можно улучшить с 1,4 до 1,1.

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= A + B\rho + C\rho^2 = \\ &= 0,0316 + 0 + 0,0476 \times 0,2512^2 = 0,0346\end{aligned}$$

В этом случае погрешность измерения составит  $-1,1$  дБ и  $1,3$  дБ.

### Пример 4:

Ответитель с хорошим показателем направленности может помочь ещё больше повысить точность измерений. Ниже приведён пример использования ответителя с направленностью 40 дБ.

$$\begin{aligned}\Delta\rho &= A + B\rho + C\rho^2 = \\ &= 0,01 + 0 + 0,0476 \times 0,2512^2 = 0,013\end{aligned}$$

Погрешность измерения уменьшена до величины  $-0,44$  дБ и  $0,46$  дБ, что значительно лучше, чем погрешность на уровне  $\Delta\rho = 4$  дБ, полученная в примере 1.

## Методика выполнения точных измерений параметров отражения

Таким образом, чтобы провести точные измерения параметров отражения с использованием скалярного анализатора цепей на основе USB измерителей требуется выполнить следующие шаги.

1. Настроить измерения по методу компенсации с использованием направленного ответителя или моста и делителя мощности.
2. Выбрать ответитель или мост с хорошей направленностью (например, Agilent 86205A).
3. Настроить частотный диапазон, уровень мощности, количество усреднений.
4. Провести калибровку в режимах XX и K3 с усреднением результатов. Не изменять настройки после калибровки.
5. Подключить ТУ и провести измерения.
6. Нормализовать результаты измерений путём вычитания калибровочных параметров из измерительных данных.

## Одновременное измерение параметров передачи и отражения

Для одновременного измерения параметров передачи и отражения можно использовать три USB измерителя серии U2000. На рисунках 21 и 22 показаны схемы установок для калибровки и измерений.



Рис. 21. Установка для калибровки перед проведением одновременного измерения усиления и обратных потерь.



Рис. 22. Установка для одновременного измерения усиления и обратных потерь.

Делитель мощности используется для выделения части падающего сигнала, а ответвитель — части отраженного сигнала для измерения. Тестируемое устройство подключается к выходу ответвителя. Выход ТУ подключен к измерителю, который осуществляет измерение переданной мощности. Перед проведением измерений пользователь должен провести калибровку в режимах КЗ, ХХ и прохода. Калибровка в режимах КЗ и ХХ необходима для точного измерения параметров отражения (как это показано выше). Калибровка на проход проводится для компенсации потерь при распространении сигнала, что позволяет повысить точность измерений параметров передачи.

Для проведения точных измерений параметров передачи и отражения требуется выполнить следующие шаги.

1. Собрать установку, как показано на рисунке 21.
2. Настроить параметры источника сигнала и измерителя мощности: частотный диапазон, уровень мощности, количество усреднений.
3. Провести калибровку в режимах КЗ/ХХ для установки обратных потерь на уровне 0 дБ и сохранить калибровочные параметры в памяти компьютера. Калибровочные параметры являются результатом усреднения данных калибровки в режимах КЗ и ХХ.
4. Провести калибровку в режиме прохода для установки нуля при измерении параметров передачи и сохранить параметры этой калибровки в памяти компьютера.
5. Подключить ТУ, как показано на рисунке 22, и провести одновременное измерение параметров передачи и отражения.
6. Нормализовать результаты измерений путём вычитания калибровочных параметров из измерительных данных. Параметры калибровки в режимах КЗ/ХХ вычитаются из результатов измерений параметров отражения, а параметры калибровки режиме перемычки — из результатов измерений параметров передачи.

## Одновременное измерение параметров передачи и отражения

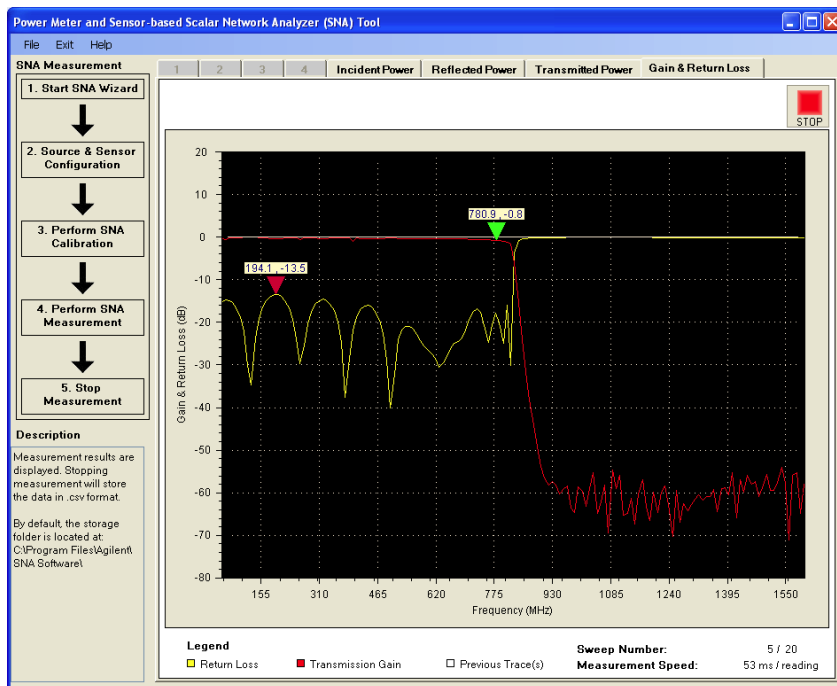


Рис. 23. Одновременное измерение параметров передачи ФНЧ с использованием САЦ на основе USB измерителей серии U2000 и демонстрационной версии программного обеспечения.

На рисунке 23 показан пример результатов одновременного измерения параметров передачи и отражения фильтра нижних частот (ФНЧ) с использованием САЦ на основе USB измерителей серии U2000 и демонстрационной версии программного обеспечения. На рисунках 24 и 25 приведено сравнение результатов измерений параметров передачи и отражения фильтра нижних частот с использованием анализатора Agilent 8757D и САЦ на основе USB измерителей серии U2000. В целом, результаты измерений на этих двух разных установках очень похожи. Следует отметить, что расхождение данных в районе отметки 600 МГц обусловлено ошибкой направленности ответвителя. Это расхождение можно уменьшить, если при измерениях использовать ответвитель с лучшей направленностью. Кроме того, результаты измерений показывают, что САЦ на основе USB измерителей имеет лучшую шумовую характеристику.

## Одновременное измерение параметров передачи и отражения

### Сопоставление результатов измерений параметров ФНЧ с использованием анализатора Agilent 8757D и САЦ на основе USB измерителей

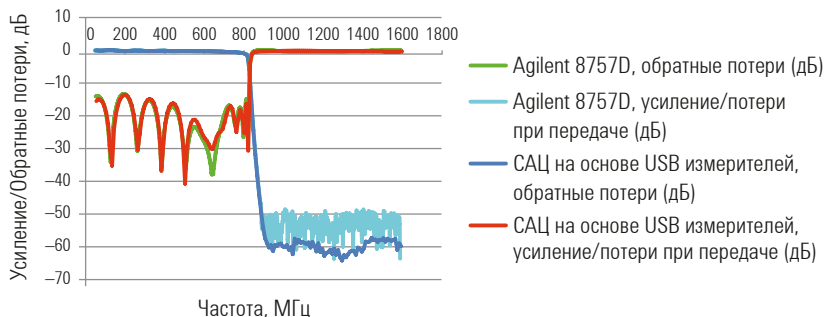


Рис. 24. Сравнение результатов измерений параметров ФНЧ анализатором Agilent 8757D и САЦ на основе USB измерителей.

### Сопоставление результатов измерений параметров ФНЧ с использованием анализатора Agilent 8757D и САЦ на основе USB измерителей

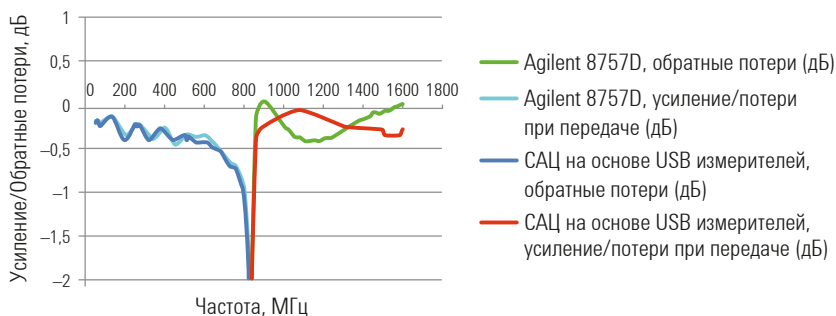


Рис. 25. Сравнение результатов измерений параметров ФНЧ анализатором Agilent 8757D и САЦ на основе USB измерителей (масштаб области на уровне 0 дБ увеличен для детального отображения точности измерения параметров передачи).



## Погрешность измерения параметров передачи и отражения

Определение погрешности при одновременном измерении параметров передачи и отражения осуществляется способом, аналогичным рассмотренному ранее.

### Пример 1:

На частоте 1 ГГц КСВ измерителя U2000A составляет 1,13. Допустим, что КСВ на входе и выходе тестируемого устройства равен 1,2. Согласование источника равно 1,4. Тогда величина коэффициентов отражения составит:

$$\rho_s = 0,167; \rho_d = 0,061; \rho_1 = 0,091; \rho_2 = 0,091.$$

Максимальная погрешность рассогласования (МПР) рассчитывается следующим образом:

$$\text{МПР} = \pm[(\text{погрешности калибровки}) + (\text{погрешности измерения})].$$

$$\text{МПР (дБ)} = 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_d) + 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_1) + 20 \lg(1 \pm \rho_d \rho_2) = \pm 0,27 \text{ дБ}.$$

### Пример 2:

Для улучшения согласования источника (для уменьшения ошибки рассогласования) между ответвителем и ТУ может быть подключен фиксированный аттенюатор на 10 дБ. Допустим, что этот аттенюатор имеет КСВ, равный 1,1 ( $\rho = 0,048$ ). Тогда согласование источника с аттенюатором ( $\rho_s$ ) будет равно:

$$\rho_s = 0,167 \times 0,31622 + 0,048 = 0,065$$

Максимальная погрешность рассогласования может быть уменьшена:

$$\text{МПР (дБ)} = 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_d) + 20 \lg(1 \pm \rho_s \rho_1) + 20 \lg(1 \pm \rho_d \rho_2) = \pm 0,13 \text{ дБ}.$$

### Пример 3:

Рассмотрим пример определения погрешности измерения параметров отражения того же ТУ с КСВ = 1,2 ( $\rho = 0,091$ , обратные потери 20,8 дБ), но с усреднением результатов калибровки в режимах ХХ и КЗ:

$$\text{Направленность ответвителя} = 30 \text{ дБ (0,0316)}.$$

$$\text{Согласование источника} = 1,4:1 (\rho_s = 0,167).$$

$$\Delta\rho = A + B\rho + C\rho^2$$

$$= 0,0316 + 0 + 0,167 \times 0,091^2 = 0,0316 + 0,0014 = 0,033$$

Максимальная погрешность измерения параметров отражения устройства с  $\rho = 0,091$  составляет  $\pm 0,033$ . Преобразование в децибелы даёт:

$$-20 \lg(0,091 \pm 0,033) = 18,1 \text{ дБ или } 24,7 \text{ дБ}.$$

Таким образом, погрешность измерения в децибелах равна  $-2,7$  дБ и  $3,9$  дБ, что составляет значительную величину.

## Погрешность измерения параметров передачи и отражения

### Пример 4:

Для дальнейшего повышения точности измерений может быть использован метод компенсации с помощью делителя мощности. Благодаря применению делителя согласование источника можно улучшить с 1,4 до 1,10 ( $\rho = 0,0476$ ).

$$\Delta\rho = A + B\rho + C\rho^2 = 0,0316 + 0 + 0,0476 \times 0,091^2 = 0,032$$

Погрешность измерений уменьшилась незначительно: до  $-2,6$  дБ и  $3,8$  дБ. При малой величине коэффициента отражения ТУ заметного улучшения добиться не удаётся, так как в этом случае влияние согласования источника несущественно. Более целесообразно уменьшать погрешность измерения параметров отражения за счёт улучшения направленности. Влияние направленности более значительно для ТУ с низким коэффициентом отражения и менее ощутимо для ТУ с высоким коэффициентом отражения.

### Пример 5:

Применение ответвителя с хорошей направленностью позволяет более эффективно повысить точность измерений. Рассмотрим пример использования ответвителя с направленностью  $40$  дБ.

$$\Delta\rho = A + B\rho + C\rho^2 = 0,01 + 0 + 0,0476 \times (0,091)^2 = 0,01 + 0,0004 = 0,0104$$

В результате максимальную погрешность измерения параметров отражения удалось уменьшить до  $-0,9$  дБ и  $1,1$  дБ.

## Измерения со свипированием по мощности

Для проведения измерений компрессии коэффициента усиления возможно использование режима свипирования по выходной мощности источника сигналов, при этом измерители мощности работают в качестве приёмников. Измерения со свипированием по мощности осуществляются при фиксированном значении частоты. Доступный диапазон мощности зависит от диапазона выходной мощности источника сигналов и динамического диапазона измерителей мощности. Генераторы серии ESG обеспечивают генерирование сигналов в диапазоне от  $-136$  дБм до  $+17$  дБм, в то время как USB измерители имеют динамический диапазон от  $-60$  дБм до  $+44$  дБм (в зависимости от модели измерителя).

## Оптимизация скорости измерений

Для приложений, в которых требуется высокая скорость измерений, можно использовать измерители мощности серии P с быстродействием до 15 мс на отсчёт и измерители с функцией внешнего запуска свипирования по мощности или частоте. Эта функция позволяет источнику сигналов с помощью внешнего сигнала ТТЛ запускать сбор данных на измерителе мощности. По окончании сбора данных измеритель мощности выдаёт на генератор сигнал запуска, по которому тот переключается на следующую частотную точку. Этот процесс повторяется в каждой частотной точке. Двусторонняя связь через проводное соединение между этими двумя приборами помогает сократить время на передачу данных, что, в конечном итоге, позволяет уменьшить общее время тестирования.

На рисунке 26 показана конфигурация такой испытательной установки. Более подробную информацию по использованию этой функции можно найти в Руководстве по применению «Максимальное увеличение скорости измерений при использовании измерителей мощности серии P» («Maximizing Measurement Speed Using P-Series Power Meters»), публикация № 5989-7678EN). В демонстрационной версии программного обеспечения также приводится пошаговая инструкция по настройке этих измерений.

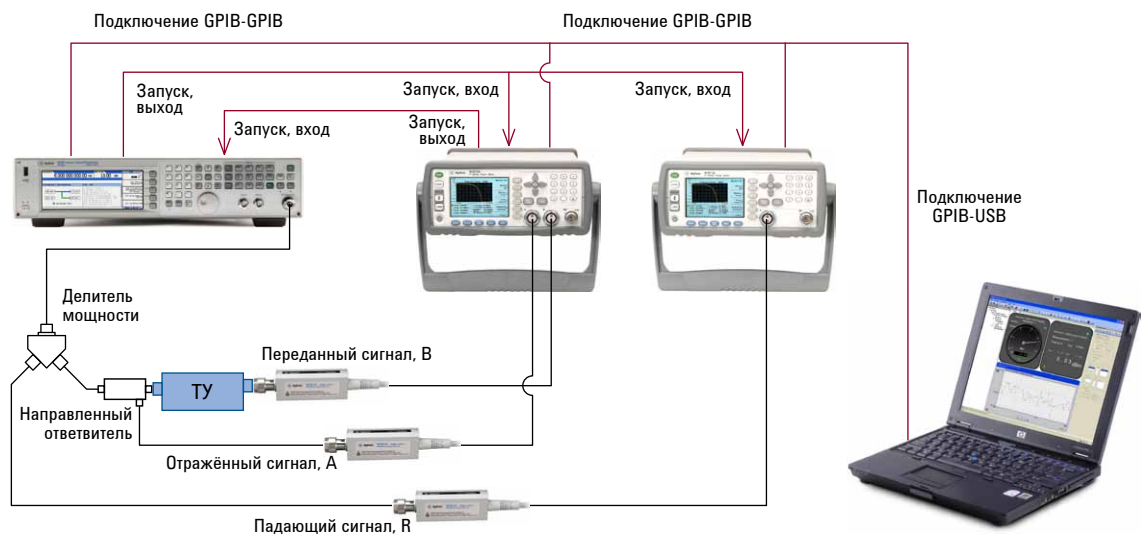


Рис. 26. Ускоренный скалярный анализ цепей с помощью измерителей мощности Agilent серии P и USB измерителей мощности.

## Выводы

Скалярные анализаторы цепей на основе измерителей серии U2000 помимо обычных измерений мощности обеспечивают возможность проведения точных измерений параметров передачи и отражения. Измерители с шиной USB имеют широкий динамический диапазон и позволяют проводить измерения с погрешностью не более 3%. Частотная характеристика имеет неравномерность не хуже 0,1 дБ с корректировкой коэффициента калибровки. При использовании совместно с делителем мощности и ответвителем эти анализаторы обеспечивают точные скалярные измерения мощности при сравнительно низкой стоимости используемого измерительного оборудования.

С помощью скалярных анализаторов цепей на основе измерителей серии U2000 и простого программного обеспечения можно легко провести измерения параметров передачи, таких как полоса пропускания (по уровню 3 дБ) полосового фильтра, коэффициент усиления и обратные потери усилителя, обратные потери антенны, неравномерность фильтра нижних частот и частотная характеристика кабеля.

## Информация для заказа

### Измерители мощности Agilent

N1913A/14A, измерители мощности серии EPM

E4416A/17A, измерители мощности серии EPM-P

N1911A/12A, измерители мощности серии P

Измерители мощности серии U2000 с шиной USB

### Преобразователи мощности Agilent

		ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ			Описание продукта/ тип преобразователя	Частотный диапазон	Диапазон мощности	
		E4416/17A	N1913/14A	N1911/12A N8262A				
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МОЩНОСТИ	Термопарные и диодные преобразователи мощности серий N8480/8480	N848xA	✓	✓	✓	термопарный	100 кГц ... 67 ГГц	-35 дБм (316 нВт) ... +20 дБм (100 мВт)
		N848xB/H	✓	✓	✓	термопарный большой мощности	100 кГц ... 18 ГГц	-15 дБм (32 мкВт) ... +44 дБм (25 Вт)
		848xD	✓	✓	✓	диодный	100 кГц ... 50 ГГц	-70 дБм (100 пВт) ... -20 дБм (10 мкВт)
	Преобразователи мощности непрерывных сигналов	E441xA	✓	✓	✓	диодный	100 МГц ... 33 ГГц	-70 дБм (100 пВт) ... +20 дБм (100 мВт)
		Преобразователи средней мощности серии E9300	E930xA	✓	✓	✓	диодный	9 кГц ... 24 ГГц
	E930xB/H		✓	✓	✓	диодный	10 МГц ... 18 ГГц	-50 дБм (10 нВт) ... +44 дБм (25 Вт)
	Преобразователи пиковой и средней мощности серии E9320	E932xA	✓	—	✓	диодный	50 МГц ... 18 ГГц	-60 дБм (1 нВт) ... +20 дБм (100 мВт)
		Широкополосные преобразователи мощности серии P	N1921A	—	—	✓	диодный	50 МГц ... 18 ГГц
	N1922A		—	—	✓	диодный	50 МГц ... 40 ГГц	-35 дБм (316 нВт) ... +20 дБм (100 мВт)
	Измерители мощности серии U2000 с шиной USB	U200xA	—	✓	—	диодный	9 кГц ... 26,5 ГГц	-60 дБм (1 нВт) ... +20 дБм (100 мВт)
		U200xB	—	✓	—	диодный	10 МГц ... 18 ГГц	-30 дБм (1 мкВт) ... +44 дБм (25 Вт)
		U200xH	—	✓	—	диодный	10 МГц ... 24 ГГц	-50 дБм (10 нВт) ... +44 дБм (25 Вт)
	Волноводные преобразователи мощности серии 8480	R8486D	✓	✓	✓	волноводный	26,5 ГГц ... 40 ГГц	-70 дБм (100 пВт) ... -20 дБм (10 мкВт)
		Q8486D	✓	✓	✓	волноводный	33 ГГц ... 50 ГГц	-70 дБм (100 пВт) ... -20 дБм (10 мкВт)
		N8486AR	✓	✓	✓	термопарный волноводный	26,5 ГГц ... 40 ГГц	-35 дБм (316 нВт) ... +20 дБм (100 мВт)
		N8486AQ	✓	✓	✓	термопарный волноводный	33 ГГц ... 50 ГГц	-35 дБм (316 нВт) ... +20 дБм (100 мВт)
		V8486A	✓	✓	✓	преобразователь мощности V-диапазона	50 ГГц ... 75 ГГц	-30 дБм (1 мкВт) ... +20 дБм (100 мВт)
		W8486A	✓	✓	✓	волноводный	75 ГГц ... 110 ГГц	-30 дБм (1 мкВт) ... +20 дБм (100 мВт)

## Информация для заказа

### Делители мощности Agilent

11667A, делитель мощности в диапазоне от постоянного тока до 18 ГГц

11667B, делитель мощности в диапазоне от постоянного тока до 26,5 ГГц

11667C, делитель мощности в диапазоне от постоянного тока до 50 ГГц

### Генераторы сигналов Agilent

Генераторы сигналов Agilent серий ESG, MXG и PSG

### Ответвители и мосты Agilent

Модель	Частотный диапазон	Направленность	Переходное затухание (ном.)	Вносимые потери
86205A	300 кГц ... 6 ГГц	< 30 дБ в диапазоне до 5 МГц < 40 дБ в диапазоне до 2 ГГц < 30 дБ в диапазоне до 3 ГГц < 20 дБ в диапазоне до 5 ГГц < 16 дБ в диапазоне до 6 ГГц	16 дБ	< 1,5 дБ
86207A	300 кГц ... 3 ГГц	< 30 дБ в диапазоне до 5 МГц < 40 дБ в диапазоне до 1,3 ГГц < 35 дБ в диапазоне до 2 ГГц < 30 дБ в диапазоне до 3 ГГц	15 дБ	< 1,5 дБ
87300B	1 ... 20 ГГц	> 16 дБ	10 ± 0,5 дБ	< 1,5 дБ
87300C	1 ... 26,5 ГГц	> 14 дБ в диапазоне до 12,4 ГГц > 12 дБ в диапазоне до 26,5 ГГц	10 ± 1,0 дБ	< 1,2 дБ в диапазоне до 12,4 ГГц < 1,7 дБ в диапазоне до 26,5 ГГц
87300D	6 ... 26,5 ГГц	> 13 дБ	10 ± 0,5 дБ	< 1,3 дБ
87301B	10 ... 46 ГГц	> 10 дБ	10 ± 0,7 дБ	< 1,9 дБ
87301C	10 ... 50 ГГц	> 10 дБ	10 ± 0,7 дБ	< 1,9 дБ
87301D	1 ... 40 ГГц	> 14 дБ в диапазоне до 20 ГГц > 10 дБ в диапазоне до 40 ГГц	13 ± 1,0 дБ	< 1,2 дБ в диапазоне до 20 ГГц < 1,9 дБ в диапазоне до 40 ГГц
87301E	2 ... 50 ГГц	> 13 дБ в диапазоне до 26,5 ГГц > 10 дБ в диапазоне до 50 ГГц	10 ± 1,0 дБ	< 2,0 дБ
773D	2 ... 18 ГГц	> 30 дБ в диапазоне до 12,4 ГГц > 27 дБ в диапазоне до 18 ГГц	20 ± 0,9 дБ	< 0,9 дБ

### Широкополосные ответвители других производителей:

Narda Microwave-East, [www.nardamicrowave.com](http://www.nardamicrowave.com)

Krytar, [www.krytar.com](http://www.krytar.com)

Quinstar Technology Inc., [www.quinstar.com](http://www.quinstar.com)

### Калибровочные наборы Agilent

Компания Agilent предлагает широкий выбор калибровочных наборов, позволяющих работать в диапазоне частот от постоянного тока до 110 ГГц. Более подробную информацию о них можно найти на сайте:

[www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=US&lc=eng&ckey=100000298:epsg:pgr&nid=-536902686.0.00&id=100000298:epsg:pgr&pselect=SR.GENERAL#16](http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=US&lc=eng&ckey=100000298:epsg:pgr&nid=-536902686.0.00&id=100000298:epsg:pgr&pselect=SR.GENERAL#16)

## Полезные ссылки

1. Высокочастотные измерения со свипированием (High Frequency Swept Measurements). — Руководство по применению компании Agilent, публикация № 3, 1978 г.
2. Основы скалярных измерений (Scalar Measurement Fundamentals). — Семинар по скалярным измерениям компании Hewlett Packard.
3. Скалярные измерения с помощью 1,5 ГГц анализатора спектра ESA-L1500A и следящим генератором. — Публикация № 5966-1650E.

## Литература по теме

Название публикации	Номер публикации
<i>Измерители мощности Agilent N1911A/N1912A серии P и широкополосные измерители мощности N1921A/N1922A, техническое описание</i>	5989-2471EN
<i>Измерители мощности Agilent серии U2000 с шиной USB, техническое описание</i>	5989-6278EN
<i>Измерители мощности Agilent E4416A/E4417A серии EPM-P и измерители пиковой и средней мощности E9320 серии E, техническое описание</i>	5980-1469E
<i>Измерители мощности Agilent N1913A и N1914A серии EPM, техническое описание</i>	5990-4019EN
<i>Измерители мощности Agilent E4418B/E4419B серии EPM, измерители мощности серий E и 8480, техническое описание</i>	5965-6382E
<i>Термопарные измерители мощности серии N8480, техническое описание</i>	5989-9333EN
<i>Выбор подходящего измерителя и преобразователя мощности, руководство по применению</i>	5968-7150E
<i>Основы ВЧ и СВЧ измерений мощности, руководство по применению №№ 1449-1/2/3/4</i>	5988-9213/4/5/6EN
<i>Измерители мощности Agilent серии P: Внутренняя установка нуля и калибровка в измерителях ВЧ мощности, руководство по применению</i>	5989-6509EN
<i>Максимальное увеличение скорости измерений при использовании измерителей мощности серии P, руководство по применению</i>	5989-7678EN
<i>ВЧ и СВЧ принадлежности Agilent для испытаний, руководство по выбору</i>	5990-5499EN

## Приложение

В данном приложении в качестве справочной информации приведены команды SCPI, используемые в демонстрационной версии программного обеспечения для управления генератором сигналов и измерителем мощности при проведении скалярного анализа цепей.

### Конфигурирование измерителя мощности серии U2000 с шиной USB:

```
SYST:PRES //Предварительная настройка измерителя
Wait for 1s
INIT:CONT OFF //Установка одиночного запуска
SENS:MRATE NORM //Установка нормальной скорости измерений
SENS:AVER:COUN 1 //Установка количества элементов в фильтре на единицу
SENS:AVER ON //Включение усреднения
CAL:ZERO:TYPE EXT //Включение внешней установки нуля
CAL //Установка нуля измерителя
while value not equals to zero
{
    value = STAT:OPER:CAL:COND? //Возврат 0 по завершении установки нуля
}
}
```

### Конфигурирование генератора сигналов:

```
SYST:PRES //Предварительная настройка прибора
Wait for 1s
POW:LEVEL 10DBM //Установка мощности источника на 10дБм
OUTP:STAT ON //Включение источника
```

**Последовательно пройти по всем тестовым точкам частотного диапазона, используя эти команды для выполнения скалярных измерений со свипированием по частоте:**

```
FREQ 1GHz //Передать эту команду в источник для установки значения частоты, равного 1 ГГц
SENS:FREQ 1GHz //Передать эту команду в измеритель для установки значения частоты, равного 1 ГГц
READ? //Передать эту команду в измеритель для считывания значения мощности на входе измерителя
```

**Перейти к следующему тестовому значению частоты и повторить предыдущие шаги.**





### Agilent Email Updates

Новости по электронной почте  
[www.agilent.com/find/emailupdates](http://www.agilent.com/find/emailupdates)  
Получите последнюю информацию по выбранным приборам и приложениям.



### [www.axiestandard.org](http://www.axiestandard.org)

AXIe представляет собой открытый стандарт, основанный на AdvancedTCA, с расширениями для контрольно-измерительных приложений. Компания Agilent является одним из основателей консорциума AXIe.



### [www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

Стандарт LXI (LAN eXtensions for Instrumentation – расширение LAN для измерений) позволяет в полной мере использовать преимущества технологий передачи Ethernet, сетевых возможностей Internet и протоколов LAN в измерительных системах. Компания Agilent является одним из основателей консорциума LXI.



### <http://www.pxisa.org>

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) — это модульная платформа, предназначенная для создания многофункциональных и высокопроизводительных контрольно-измерительных систем на базе ПК.

### Торговые партнеры компании Agilent

#### [www.agilent.com/find/channelpartners](http://www.agilent.com/find/channelpartners)

Получите двойную выгоду: богатый опыт и широкий выбор продуктов Agilent в сочетании с удобствами, предлагаемыми торговыми партнерами.



Программа компании Agilent по сервисной поддержке своих приборов позволяет успешно эксплуатировать оборудование в течение всего срока службы. Мы делимся с вами опытом измерений и обслуживания, помогая создавать продукты, изменяющие наш мир. Для поддержания вашей конкурентоспособности мы постоянно совершенствуем инструменты и технологии, ускоряющие калибровку и ремонт, снижающие эксплуатационные расходы и позволяющие быть всегда впереди.

[www.agilent.com/find/advantageservices](http://www.agilent.com/find/advantageservices)



[www.agilent.com/quality](http://www.agilent.com/quality)

[www.agilent.com](http://www.agilent.com)

Для получения дополнительной информации о продукции Agilent, её применении, а также о предоставляемых услугах обращайтесь, пожалуйста, в **Российское представительство компании Agilent Technologies:**

Россия, 113054, Москва,  
Космодамианская набережная, д. 52, стр. 1  
Тел.: +7 (495) 7973900  
Факс: +7 (495) 7973901  
e-mail: [tmo\\_russia@agilent.com](mailto:tmo_russia@agilent.com)  
[www.agilent.ru](http://www.agilent.ru)

### Представительства компании Agilent Technologies в других странах:

#### Северная и Южная Америка

Бразилия	(11) 4197 3500
Канада	(877) 894 4414
Мексика	01800 5064 800
США	(800) 829 4444

#### Азиатско-Тихоокеанский регион

Австралия	1 800 629 485
Гонконг	800 938 693
Индия	1 800 112 929
Китай	800 810 0189
Корея	080 769 0800
Малайзия	1 800 888 848
Сингапур	1 800 375 8100
Тайвань	0800 047 866
Япония	0120 (421) 345
Другие страны	(65) 375 8100

#### Европа и Ближний Восток

Бельгия	32 (0) 2 404 93 40
Великобритания	44 (0) 118 9276201
Германия	49 (0) 7031 464 6333
Дания	45 70 13 15 15
Израиль	972-3-9288-504/544
Ирландия	1890 924 204
Испания	34 (91) 631 3300
Италия	39 02 92 60 8484
Нидерланды	31 (0) 20 547 2111
Финляндия	358 (0) 10 855 2100
Франция	0825 010 700*
Швеция	0200-88 22 55

*Полный список представительства  
приведён на сайте:*

[www.agilent.com/find/contactus](http://www.agilent.com/find/contactus)

Обновлено 14 октября 2010 г.

Технические характеристики и описания приборов могут изменяться без предварительного уведомления.

© Agilent Technologies, Inc. 2011  
Отпечатано в России, 28 апреля 2011 г.  
5990-7540 RURU



**Agilent Technologies**