

Keysight Technologies

Недорогое решение для проверочных испытаний РЛС с помощью скалярного анализа цепей на базе измерителей мощности с интерфейсом USB

Заметки по применению

Обзор

Достижение максимальных характеристик радиолокационных систем (РЛС) требует всестороннего анализа и тщательной оптимизации каждого компонента и сборочного узла РЛС. Эффекты потерь сигнала, вызванные элементами системы, непосредственно характеризуются терминами потерь в трактах передачи/приёма в уравнении дальности действия РЛС. Как правило, передатчик РЛС является самым дорогим компонентом системы, который характеризуется наивысшим энергопотреблением, самыми строгими требованиями по охлаждению и наибольшим влиянием на характеристики системы. Мощность может оказаться дорогой, и потери непосредственно вычитаются из эффективной мощности РЛС. Например, потери в 1 децибел имеют такой же эффект, как сокращение мощности на 1 децибел. При передаче мощности в 1 мегаватт увеличение ее на один децибел для компенсации потерь может быть дорогим. Чем больше потерь можно минимизировать, тем лучше. Измерения потерь особенно важны для таких компонентов, как фильтры, антенные переключатели и циркуляторы, которые расположены после усилителя мощности передатчика и перед малошумящим усилителем приемника.

Проблема

Для проведения базовых измерений параметров РЛС и её компонентов можно использовать многие измерительные приборы. Векторные анализаторы цепей часто являются более предпочтительными измерительными приборами, которые чаще всего используются во многих исследовательских и производственных подразделениях. Они также необходимы для специальных испытаний, в которых требуется проведение калиброванных измерений фазы. Вместе с тем, они являются самыми дорогими приборами, и их доступность может быть ограничена для ответственных испытательных станций. Скалярные анализаторы цепей, такие как анализаторы серии 8757 компании Agilent, в настоящее время снятые с производства, в течение длительного времени использовались в качестве менее затратного технического решения для испытаний, в которых не требуется проводить измерение фаз.

Скалярные анализаторы цепей обладают возможностью проводить измерения методом стимул/отклик таких параметров, как коэффициент усиления, вносимые потери, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и обратные потери. Эти измерения используются для определения коэффициента передачи или отражения компонентов РЛС, таких как кабели, фильтры и усилители, а также комплексных подсистем, которые охватывают множество компонентов, устройств и кабелей.

Ниже приведены следующие примеры характеристик, измеренных методом стимул/отклик:

- полоса пропускания полосового фильтра (по уровню -3 дБ;
- коэффициент усиления и обратные потери усилителя;
- обратные потери антенны;
- неравномерность АЧХ фильтра нижних частот;
- АЧХ кабеля.

В течение более чем 20 лет скалярные анализаторы цепей серии 8757 компании Keysight поддерживали проведение испытаний РЛС в разрабатывающих, производственных и эксплуатирующих подразделениях. Необходимость в дальнейшем уменьшении стоимости испытаний привела к появлению ещё более простых и менее затратных технических решений для обеспечения этих базовых — но очень важных — измерений параметров РЛС.

Решение

Измерители мощности с интерфейсом USB серии U2000 компании Agilent - это компактные и лёгкие измерительные приборы, способные выполнять точные измерения мощности РЧ и СВЧ сигналов. При использовании вместе с разветвителем мощности, ответвителем и источником сигнала они позволяют в дополнение к измерению мощности проводить также скалярный анализ цепей.

Измерения методом стимул/отклик требуют наличия источника для подачи входного сигнала на вход испытуемого устройства (ИУ) и приёмника (в данном случае, измерителя мощности) для анализа АЧХ испытуемого устройства. Хотя на частотах выше 26,5 ГГц могут использоваться и другие измерители и первичные преобразователи (датчики) мощности компании Keysight, для простоты в данных заметках по применению внимание будет сосредоточено только на использовании измерителей мощности с интерфейсом USB.

Кроме низкой стоимости данного технического решения, скалярный анализ цепей на базе измерителей мощности с интерфейсом USB имеет ряд привлекательных свойств. Например, он обеспечивает широкий диапазон измерения мощности от -60 до $+44$ дБм, в зависимости от выбранного измерителя. Он обеспечивает превосходную точность за счёт полностью калиброванного первичного преобразователя (датчика), имеющего абсолютную погрешность измерения не более 3 процентов. Погрешность АЧХ минимизирована и не превышает $\pm 0,1$ дБ, а калибровочные коэффициенты хранятся в памяти измерителя мощности. Вероятно, самым важным свойством является возможность двойного использования: помимо точного измерения мощности, измерители мощности с интерфейсом USB могут также быть установлены для проведения точных скалярных измерений мощности с низким уровнем общих затрат на такую установку. Подключение к компьютеру и автоматизация измерений упрощаются за счёт доступного бесплатного программного обеспечения и соединения по интерфейсу USB. Точные измерения методом стимул/отклик выполняются с использованием следующего оборудования:

- измерители мощности с интерфейсом USB серии U2000;
- генераторы сигналов серий ESG/MXG/PSG;
- широкополосные ответвители;
- разветвители мощности

В следующем разделе описаны три наиболее часто используемые измерительные конфигурации, содержится обзор доступного программного обеспечения для автоматизации измерений и сравнение технических решений на базе серий U2000 и 8757.

Измерительные конфигурации

Как было указано ранее, измерители мощности с интерфейсом USB серии U2000 могут объединяться с источником сигнала и разветвителем мощности или ответвителем для измерения обратных потерь, коэффициента передачи или потерь при передаче. В данном разделе описаны три конфигурации, которые могут использоваться для измерения параметров передачи, параметров отражения, а также одновременного измерения параметров передачи и отражения.

Измерение параметров передачи

Скалярное измерение параметров передачи определяет коэффициент передачи или потери при передаче для испытуемого устройства (ИУ). При использовании измерителей мощности серии U2000 для измерения параметров передачи можно использовать два метода: измерение параметров передачи с выравниванием по уровню и измерение параметров передачи с поствыравниванием по уровню.

Погрешность для наихудшего случая при измерении параметров передачи определяет сочетание трёх факторов: погрешность, обусловленная АЧХ, погрешность рассогласования в процессе калибровки и измерения, а также нелинейность характеристик измерителей мощности. При скалярном анализе цепей с использованием измерителей мощности с интерфейсом USB погрешность, обусловленная АЧХ, минимальна, если выполнена коррекция с использованием калибровочных коэффициентов, запомненных в памяти измерителя мощности. Погрешность, обусловленная АЧХ, может быть ещё больше уменьшена, если перед действительным измерением выполнить нормализацию или калибровку. Погрешность, обусловленная нелинейностью, связана с отклонением от квадратичного закона характеристики диода и обычно не превышает 3%. Погрешности рассогласования в процессе измерения являются результатом рассогласований в местах соединений источника с входом ИУ и выхода ИУ с измерителем мощности. Детальное обсуждение погрешностей при измерении параметров передачи, когда измерители мощности с интерфейсом USB используются в режиме скалярного анализа цепей, приведено в заметках по применению Scalar Network Analysis with U2000 Series USB Power Sensors (скалярный анализ цепей с использованием измерителей мощности с интерфейсом USB серии U2000) (номер публикации 5990-7540EN)¹.

Измерение параметров передачи с выравниванием по уровню

В данной конфигурации добавляется разветвитель мощности, чтобы разделить мощность сигнала источника между испытуемым устройством (ИУ) и вторым измерителем мощности А (рисунок 1). За счёт одинаковых и согласованных характеристик плеч делителя уровень мощности, поступающей на вход ИУ, равен уровню мощности, измеренной измерителем мощности А. Таким образом, коэффициент передачи можно вычислить как разницу между уровнями мощности, которые были измерены каждым из двух измерителей мощности.

По сравнению с двумя другими методами, конфигурация измерения параметров передачи с выравниванием по уровню обходится несколько дороже из-за добавления разветвителя мощности и второго измерителя мощности. Однако этот метод предлагает преимущество более высокой точности измерения: любые изменения на выходе генератора сигналов передаются на оба измерителя мощности и поэтому компенсируются при вычислении коэффициента передачи.

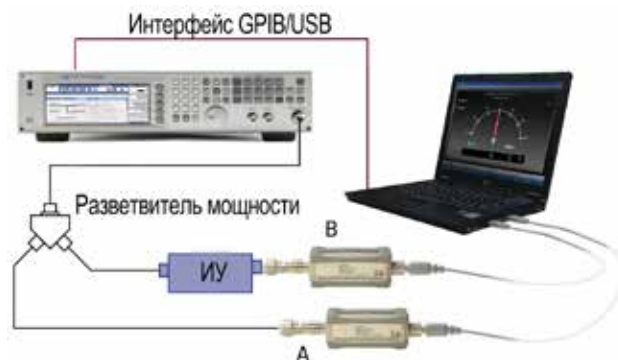


Рисунок 1 - Метод измерения параметров передачи с выравниванием по уровню предлагает преимущество более высокой точности измерения за счёт относительного измерения с использованием двух измерителей мощности

Измерение параметров передачи с поствыравниванием по уровню

В этом третьем варианте используются те же самые аппаратные средства, что и при измерении параметров передачи без выравнивания по уровню, но добавляется дополнительный шаг для калибровки потерь в тракте передачи (рисунок 2). В данной конфигурации сначала испытуемое устройство (ИУ) удаляется, и измеритель мощности измеряет уровень мощности непосредственно на выходе источника; эти данные запоминаются в качестве массива калибровочных коэффициентов в заданном диапазоне частот. Затем ИУ устанавливается на место, и на его выходе производится сбор другого набора данных. Коэффициент передачи вычисляется как разница между измеренными уровнями мощности и запомненными данными из массива калибровочных коэффициентов.

Конфигурация измерения параметров передачи с поствыравниванием по уровню является ещё одним менее затратным техническим решением, поскольку не требует ни разветвителя мощности, ни второго измерителя мощности. Точность этого технического решения должна быть лучше, чем в случае конфигурации без выравнивания по уровню, поскольку в этом случае за счёт калибровки устраняется влияние изменений выходного уровня сигнала источника в заданном диапазоне частот. Вместе с тем, точность этого технического решения может быть меньше, чем в случае измерения параметров передачи с выравниванием по уровню. Это зависит от стабильности выходного сигнала источника в течение временного интервала между соответствующей калибровкой и измерением сигнала на выходе ИУ.



Рисунок 2 - Метод измерения с поствыравниванием по уровню является менее затратным при более высокой точности

Измерение параметров отражения

Скалярное измерение параметров отражения определяет, насколько эффективно энергия передаётся к испытуемому устройству (ИУ). Оно является мерой величины рассогласования между ИУ и линией передачи с волновым сопротивлением Z_0 , обычно равным 50 Ом. Не вся энергия падающего сигнала, направленного к ИУ, поглощается ИУ. Часть энергии не поглощается и отражается обратно к источнику сигнала. Эффективность передачи энергии можно определить путём сравнения падающего и отражённого сигналов.

На рисунках 3 и 4 показаны конфигурации установок для калибровки измерения параметров отражения и измерения параметров отражения с использованием измерителя мощности с интерфейсом USB и генератора сигналов. Для измерения параметров отражения требуется устройство разделения сигналов, такое как разветвитель мощности, направленный ответвитель или мост. Разветвитель мощности используется для отбора части мощности падающего сигнала с целью измерения падающей мощности, а ответвитель используется для перенаправления отражённого сигнала с целью измерения отражённой мощности. Испытуемое устройство (ИУ) подключается к выходу ответвителя.

Для данного вида измерения необходимо сконфигурировать установки источника сигнала и измерителя мощности, такие как диапазон частот и уровень мощности. Как только эти установки настроены, они не должны изменяться в процессе измерения. Это позволит избежать внесения погрешностей, которые иначе не присутствовали бы в измерительной системе.

При калибровке системы выполняется калибровка с использованием в качестве нагрузки мер холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), чтобы установить опорный уровень обратных потерь, соответствующий 0 дБ, и запомнить данные калибровки в ПК. Данные калибровки представляют собой среднее значение калибровок с использованием мер ХХ и КЗ. Калибровка с использованием мер ХХ и КЗ предназначена для устранения ошибки калибровки, обусловленной суммой погрешности направленности и погрешности согласования в источнике. Детальное обсуждение погрешностей при измерениях параметров отражения, поскольку они связаны с погрешностью направленности, погрешностью калибровки и эффективным согласованием в источнике, приведено в заметках по применению "Scalar Network Analysis with U2000 Series USB Power Sensors" (скалярный анализ цепей с использованием измерителей мощности с интерфейсом USB серии U2000) (номер публикации 5990-7540EN).

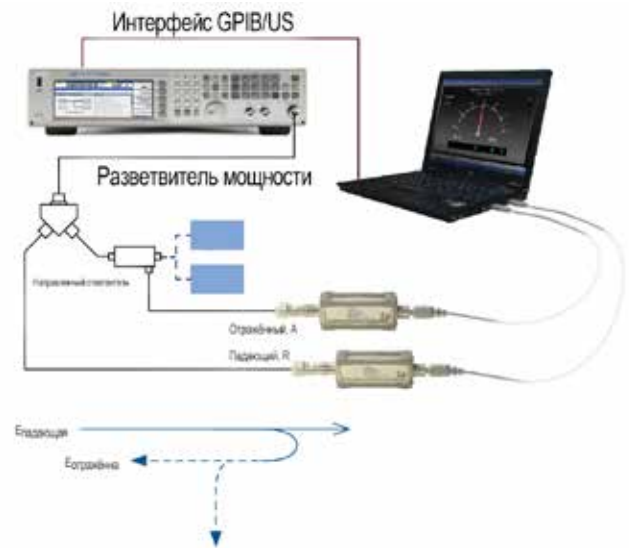


Рисунок 3 - Установка для калибровки измерения параметров отражения

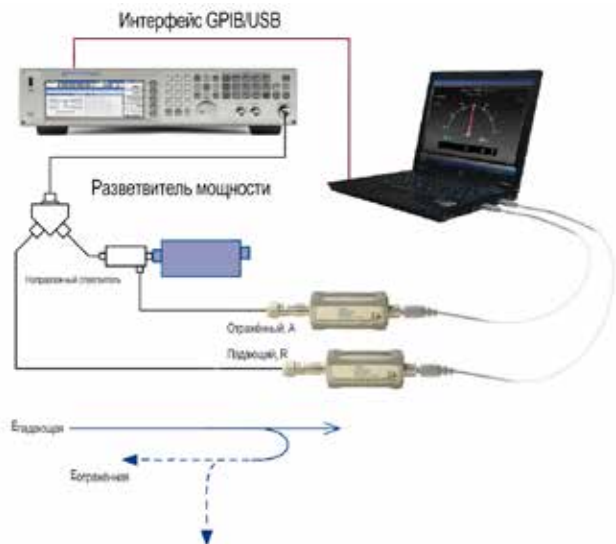


Рисунок 4 - Установка для измерения параметров отражения

Одновременное измерение параметров передачи и отражения

Имеется возможность установить три измерителя мощности с интерфейсом USB серии U2000 для одновременного измерения параметров передачи и отражения. На рисунках 5 и 6 показаны конфигурации для калибровки и измерения, соответственно. Разветвитель мощности используется для отбора части мощности падающего сигнала с целью измерения падающей мощности, а ответвитель используется для перенаправления отражённого сигнала с целью измерения отражённой мощности. Испытуемое устройство (ИУ) подключается к выходу ответвителя. Выход ИУ подключается к третьему измерителю мощности для измерения мощности, прошедшей через ИУ. Необходимо, чтобы перед измерением пользователь выполнил калибровку с использованием в качестве нагрузки мер XX, КЗ и перемычки. Как было разъяснено ранее, калибровка с использованием мер XX и КЗ требуется для обеспечения точности измерения параметров отражения. Калибровка по перемычке требуется для обеспечения точности измерения параметров передачи с целью компенсации потерь в тракте передачи, связанных с дополнительным направлением ответвителем.

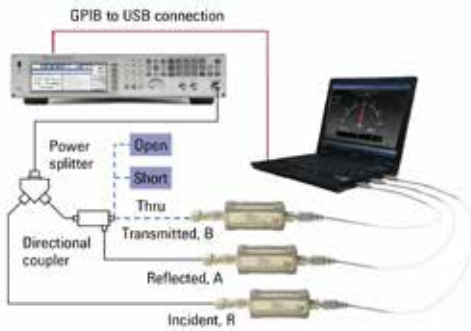


Рисунок 5 - Установка для одновременного измерения коэффициента передачи и обратных потерь

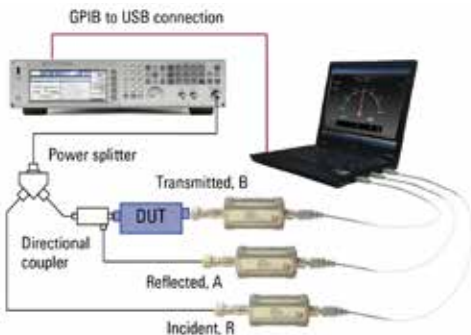


Рисунок 6 - Установка для одновременного измерения коэффициента передачи и обратных потерь

Оптимизация скорости одновременных измерений

Для приложений, в которых требуются высокие скорости измерений, можно достичь скорости измерения, равной 15 мс на отсчёт, при использовании измерителей мощности Р-серии и первичных преобразователей (датчиков) мощности с функцией внешнего запуска измерений со свипированием мощности или частоты. Эта функция позволяет источнику сигнала запускать измеритель мощности, используя внешний TTL сигнал, для захвата результата измерения. После того как результат измерения (отсчёт) будет захвачен, измеритель мощности выводит сигнал запуска к источнику сигнала для перехода к следующей частотной точке. Эта последовательность повторяется для каждой частотной точки. Такая двусторонняя связь, использующая проводные соединения между двумя измерительными приборами, способствует уменьшению неоправданных потерь времени при связи, что приводит к снижению общего времени испытаний.

На рисунке 7 показана конфигурация такой измерительной установки. Более подробная информация об использовании этой функции приведена в заметках по применению "Maximizing Measurement Speed Using P-Series Power Meters" (достижение максимальной скорости измерений при использовании измерителей мощности Р-серии) (номер публикации 5989-7678EN3).

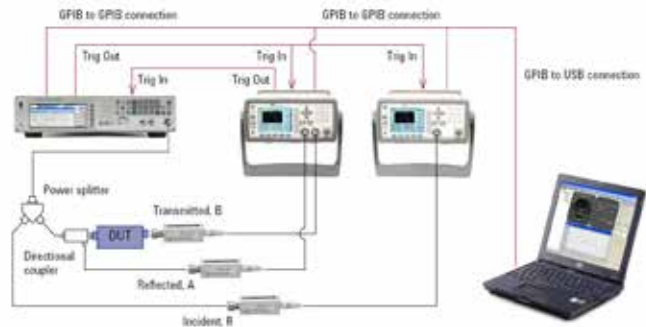


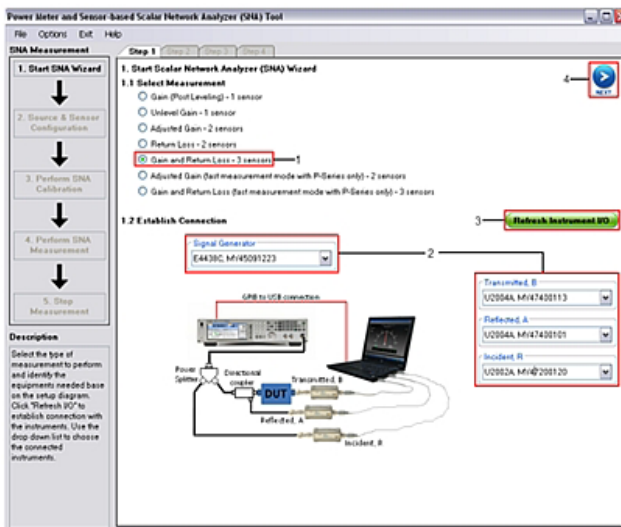
Рисунок 7 - Конфигурация установки с оптимизацией скорости измерения позволяет достичь 15 мс на отсчёт

Проведение измерений

Компания Keysight предлагает для бесплатного использования демонстрационную программу (SNA Tool) для каждой из измерительных установок, описанных в данных заметках по применению. Эта программа доступна для скачивания с веб-сайта компании Keysight². Программа SNA Tool направляет пользователя при прохождении процесса, включающего пять шагов, для установки требуемой конфигурации, выполнения любой требуемой калибровки и проведения измерения. [Примечание: изображения получены из справочной системы программы]

Шаг 1: запуск приложения SNA Wizard (показано ниже)

Это приложение включает графический экран установки конфигурации и автоматически определяет подсоединённые измерительные приборы. Программа SNA Tool совместима со всеми измерителями мощности серий EPM, EPM-P и P, а также измерителями мощности с интерфейсом USB серии U2000 компании Keysight. Кроме того, эта программа поддерживает генераторы сигналов E4438C серии ESG, N5182A серии MXG и E8267D серии PSG компании Keysight.



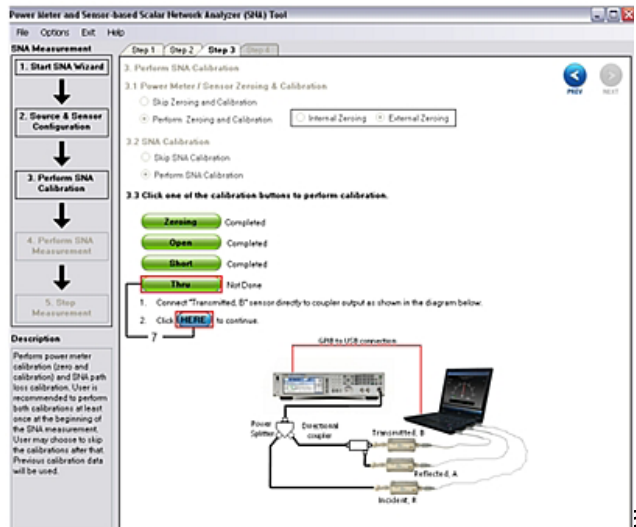
Шаг 2: конфигурирование источника сигнала и измерителя мощности

Позволяет пользователю устанавливать требуемые параметры, такие как диапазон частот, режимы усреднения и запуска.

Шаг 3: выполнение калибровки скалярного анализа цепей (SNA) (показано ниже)

На этом шаге пользователь выполняет калибровку, требуемую для выбранной конфигурации. В данном примере пользователям предлагается выполнить установку нуля для измерителей мощности, а затем - пошаговое измерение

параметров калибровочных мер (XX, K3 и перемычки).

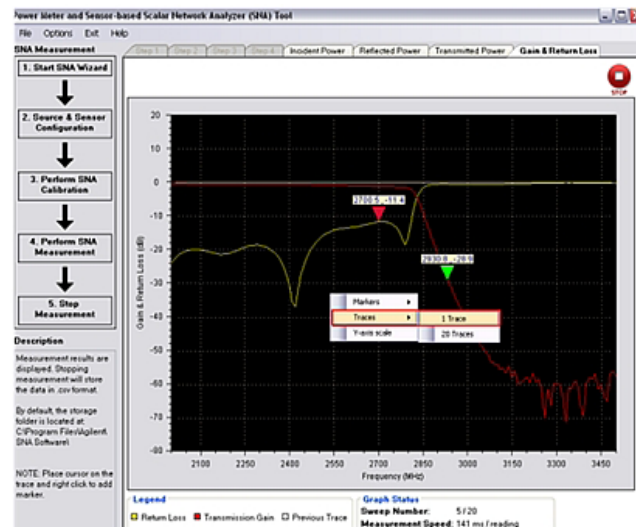


цепей (SNA)

На этом шаге начинается процесс измерения.

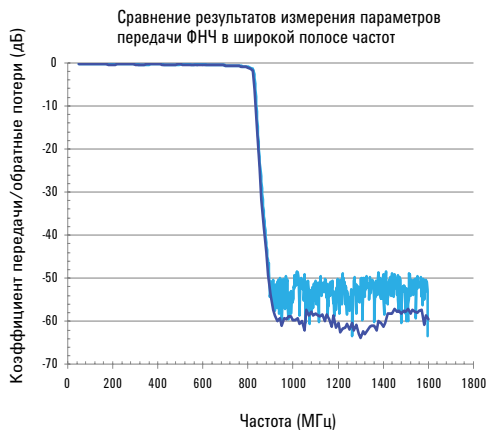
Шаг 5: завершение измерения (показано ниже)

На этом шаге процесс измерения заканчивается, и происходит анализ результатов измерения. Заметим, что закладки вдоль верхней части экрана позволяют просматривать результаты измерения мощности для каждого измерителя, а также данные расчётов коэффициента передачи и обратных потерь. Можно устанавливать маркеры, а число отображаемых графиков может изменяться. Клавиша start/stop (справа сверху) позволяет отображать результаты измерения последовательно. Номер графика и скорость измерения отображаются вдоль нижней части экрана. Данные могут быть запомнены в ячейке, определяемой пользователем.

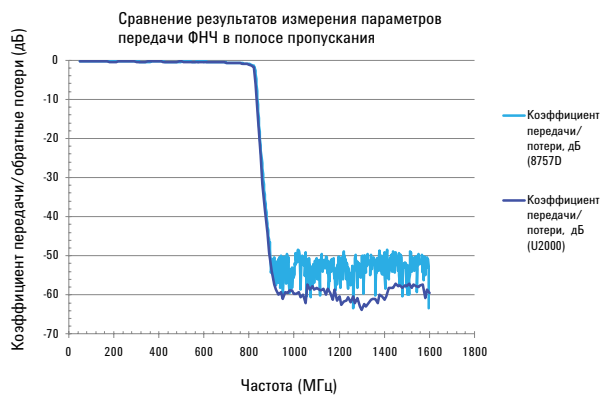


Сравнение измерительного оборудования

Интересно сравнить техническое решение для скалярного анализа цепей на базе измерителей мощности с интерфейсом USB серии U2000 с хорошо зарекомендовавшим себя скалярным анализатором цепей 8757. На рисунках 8 и 9 показан набор результатов измерения параметров передачи и отражения фильтра нижних частот (ФНЧ). Они были проведены с использованием каждого из упомянутых технических решений, и наложение результатов измерений показало их сходство.

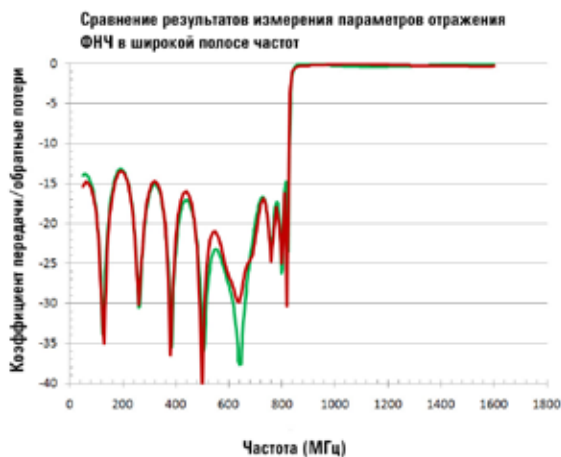


(a)

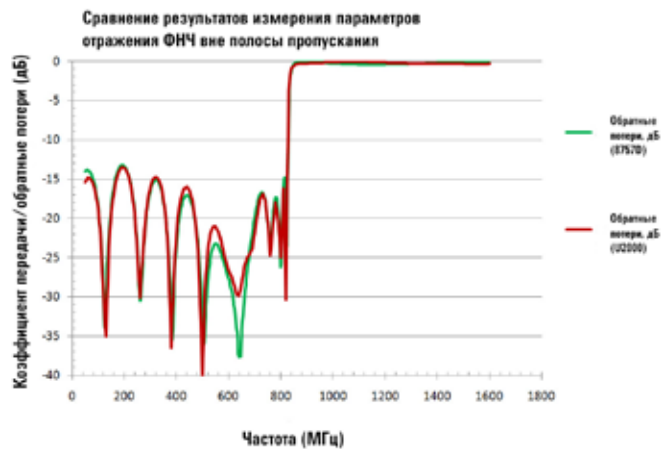


(b)

Рисунок 8 - Это сравнение показывает улучшение уровня собственных шумов (a) в характеристиках передачи фильтра нижних частот вне полосы пропускания, но при этом наблюдается сильная корреляция в полосе пропускания (b).



(a)



(b)

Рисунок 9 - Это сравнение показывает хорошую корреляцию характеристик отражения фильтра нижних частот в широкой полосе частот (a). Характеристики отражения фильтра вне полосы пропускания показывают хорошую корреляцию для скалярного измерения (b).

Таблица 1 содержит обзор, в котором производится сравнение различных типов измерительных приборов, способных выполнять скалярный анализ цепей. Это обзор включает скалярный анализ цепей с использованием снятых с производства приборов серии 8757D компании Keysight и скалярный анализ цепей следующего поколения на базе измерителя её мощности с интерфейсом USB серии U2000.

Таблица 1 - Возможные варианты оборудования для проведения измерений методом стимул/отклик

	8757D, детектор и направленный мост 85027x	Скалярный анализ цепей на базе измерителей мощности серии U2000
Динамический диапазон	от -60 до +16 дБ	от -60 до +20 дБм (U2000A) от -50 до +30 дБм (U2000H) от -30 до +44 дБм (U2000B)
Диапазон частот	от 10 МГц до 110 ГГц (зависит от детектора)	от 9 кГц до 24 ГГц (зависит от используемого измерителя мощности серии U2000) (диапазон частот до 110 ГГц доступен при использовании комбинаций измерителей мощности и первичных преобразователей (датчиков) мощности компании Keysight. См. раздел "Информация для заказа" описаний датчиков миллиметрового диапазона)
Нелинейность	Не нормируется	3%
Направленность	40 дБ до 20 ГГц 36 дБ до 26,5 ГГц 30 дБ до 40 ГГц 25 дБ до 50 ГГц (зависит от используемого моста)	Зависит от используемого ответвителя/ моста Пример: мост 86205A 40 дБ до 2 ГГц 30 дБ до 3 ГГц 20 дБ до 5 ГГц 16 дБ до 6 ГГц
Погрешность измерения параметров передачи	от ~0,5 до 2,3 дБ ¹ (динамическая погрешность + погрешность рассогласования)	от ~0,3 до 0,5 дБ (погрешность рассогласования + нелинейность)
Погрешность измерения параметров отражения	В основном зависит от направленности ответвителя/моста	В основном зависит от направленности ответвителя/моста
Обратные потери детектора/датчика (тип.) на частоте 2 ГГц	20 дБ	40 дБ
на частоте 18 ГГц	20 дБ	26 дБ
Погрешность АЧХ в диапазоне до 18 ГГц	±0,35 дБ для прецизионного детектора (до ±2 дБ для других детекторов)	±0.1 дБ
Скорость измерений	от 40 до 400 мс на цикл развёртки (75 мс для 2 графиков с 201 точкой)	~50 мс на отсчёт (~10 с на цикл развёртки для 201 точки) ²
Цена	8757D (снят с производства): \$21000 Детектор: от \$1800 до \$2600 Законченное техническое решение (18 ГГц): ~\$67000 (включая источник сигнала) ~\$35000 (без источника сигнала)	Законченное техническое решение (18 ГГц): ~\$40000 (включая источник сигнала) ~\$14000 (без источника сигнала)

1. Получено из брошюры с техническими данными 8757D (номер публикации 5091-2471E)

2. Возможно ускорение до 15 мс на отсчёт при использовании измерителей мощности P-серии компании Keysight и первичных преобразователей её (датчиков) мощности с функцией внешнего запуска измерений со свипированием. Подробнее см. в разделе "Оптимизация скорости измерений"

Краткие выводы

В течение многих лет инженеры и технические специалисты, занимающиеся испытанием оборудования РЛС, использовали скалярный анализатор цепей 8757 компании Agilent в качестве предпочтительного измерительного прибора для скалярных измерений. В настоящее время скалярный анализ цепей на базе измерителей мощности с интерфейсом USB является альтернативным техническим решением с очень низкой стоимостью и высокой точностью измерений. Для лабораторий, в которых уже имеется источник сигнала, затраты ещё больше уменьшаются, поскольку требуется приобрести только измерители мощности с интерфейсом USB, разветвитель мощности и направленный ответвитель.

Измерение параметров передачи на базе измерителей мощности серии U2000 можно облегчить при использовании программы SNA Tool. Примеры измерений включают: полоса пропускания полосового фильтра (по уровню -3 дБ), коэффициент усиления и обратные потери усилителя, обратные потери антенны, неравномерность АЧХ фильтра нижних частот и АЧХ кабеля.

Ссылки

¹ Заметки по применению “Scalar Network Analysis with U2000 Series USB Power Sensors” (скалярный анализ цепей с использованием измерителей мощности с интерфейсом USB серии U2000), 8 апреля 2011 г.; номер публикации 5990-7540E

² Программа SNA Tool, www.agilent.com/find/SNAsoftware_download

³ Заметки по применению “Maximizing Measurement Speed Using P-Series Power Meters” (достижение максимальной скорости измерений при использовании измерителей мощности P-серии), номер публикации 5989-7678EN

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированное отображение интересующей вас информации



www.lxistandard.org

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



Три Года Стандартной Заводской Гарантии

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

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



Планы Технической Поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

До пяти лет поддержки без непредвиденных расходов гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.



www.keysight.com/go/quality

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

Торговые партнёры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

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

Российское отделение

Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52,
стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб, 52,
стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-16-10-14)