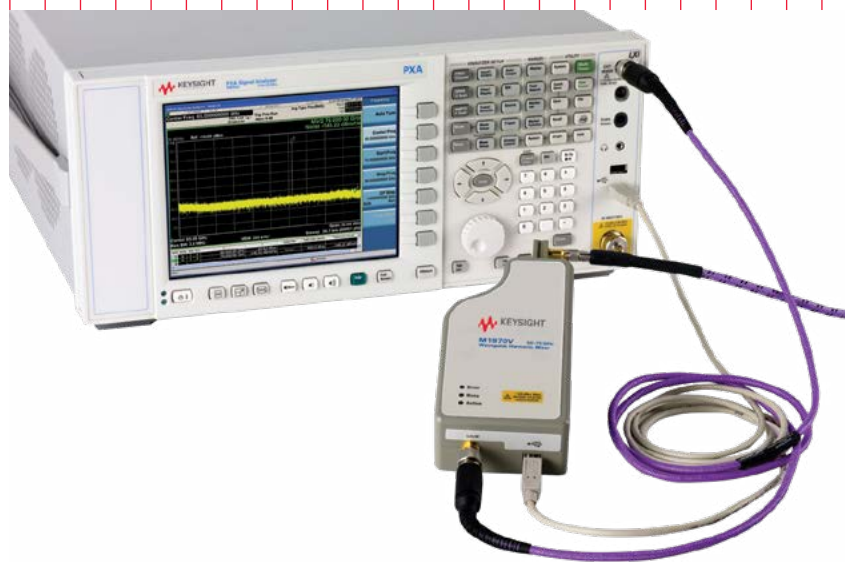


Keysight Technologies

Измерения сигналов СВЧ и миллиметрового диапазона

Приборы и передовые методы

Рекомендации
по применению



Точные измерения параметров сигналов СВЧ и миллиметрового диапазона играют важную роль при решении различных прикладных задач. Настоящие рекомендации помогут вам сделать правильный выбор и предпринять шаги в нужном направлении для выполнения точных, достоверных и экономически эффективных измерений.

Введение

С ростом частоты анализ спектра и анализ векторных параметров сигналов, например, требующих демодуляции, становится все труднее, причем наиболее проблематичным является миллиметровый диапазон и более высокие частоты. В этих рекомендациях по применению обсуждается выбор измерительных приборов и описываются методы, которые помогут вам с минимальными затратами выполнять точные измерения в разных рабочих условиях.

СВЧ?

Миллиметровый диапазон?

Терагерцы?

Определения могут отличаться, но большинство нормативных документов сходятся на том, что диапазон сверхвысоких частот (СВЧ) охватывает частоты от 3 до 30 ГГц, тогда как миллиметровый диапазон, или крайне высокие частоты (КВЧ), занимают участок спектра от 30 до 300 ГГц. Частоты выше 300 ГГц часто называют гипервысокими (ГВЧ).

Содержание

Введение	2
Выбор места установки первого смесителя	2
Выбор решения для широкополосного анализа.	6
Сравнение коаксиальных и волноводных соединений	8
Выбор и применение кабелей и соединителей	9
Риск электрических и механических повреждений	11
Повышение качества измерений с помощью встроенных функций анализатора и возможностей по обработке сигнала	15
Автокоррекция для оптимизации характеристик анализатора	17
Новые исследования в области учета погрешности из-за рассогласования позволяют повысить точность	18
Дополнительная информация	19

Выбор места установки первого смесителя

В анализаторах сигналов одним из входных элементов сигнального тракта является смеситель, который используется для преобразования частоты. При анализе СВЧ-сигналов и сигналов миллиметрового диапазона входной смеситель является первым из нескольких этапов преобразования сигнала до частоты, на которой его можно измерять, как правило, до конечной промежуточной частоты (ПЧ). Этот смеситель размещают в непосредственной близости от входного разъема, поскольку потери в сигнальном тракте быстро растут с увеличением частоты, и добиться оптимальной чувствительности удастся лишь в том случае, если преобразователь частоты стоит как можно ближе к входу. Этот «первый смеситель» не обязательно должен располагаться внутри анализатора. Для оптимизации метрологических характеристик, снижения затрат и повышения удобства работы можно рассмотреть альтернативные варианты в свете последних достижений в области разработки анализаторов сигналов, смесителей и технологий сверхширокополосной оцифровки сигналов.

Выбор типа смесителя

Большинство вариантов выбора, связанных с подачей сигнала и включением смесителя, можно свести к трём категориям: встроенный смеситель, внешний смесителя и «без смесителя». Каждый из этих вариантов стоит рассмотреть подробнее.

Встроенный смеситель

Представляет собой наиболее распространённый вариант, особенно для СВЧ-измерений (в отличие от миллиметрового диапазона). Первый смеситель находится внутри анализатора в непосредственной близости от входного разъема. Перед ним часто устанавливается аттенюатор и иногда предусилитель. Такой интегрированный подход предполагает одну соединительную линию с испытуемым устройством, в качестве которой обычно используется коаксиальный кабель. Все операции, включая преобразование частоты, оцифровку, анализ и отображение, выполняет сам анализатор. Для СВЧ и миллиметрового диапазона используется встроенный в анализатор смеситель на гармониках, и во многих случаях применяется полосовой фильтр – преселектор (внутри анализатора), настроенный на частоту исследуемого сигнала, во избежание генерации или отображения побочных продуктов смесителя.

Внешний смеситель

В этом случае возможно два варианта – автономный внешний смеситель или отдельный узел для преобразования частоты. Как и следует из его названия, первый смеситель является внешним по отношению к анализатору и обычно не содержит аттенюатора, предусилителя или преселектора (встречаются некоторые внешние смесители с преселектором). Анализатор подаёт на внешний смеситель сигнал СВЧ-гетеродина (LO) и получает от смесителя сигнал промежуточной частоты (ПЧ). Этот сигнал ПЧ получается в результате смешения исследуемого сигнала с гармониками сигнала гетеродина. Внешний смеситель часто подключается непосредственно к источнику исследуемого сигнала с помощью волноводного или коаксиального соединения. Анализатор дополнительно обрабатывает сигнал ПЧ, выполняя фильтрацию, оцифровку, анализ и отображение аналогично тому, как это делается в случае встроенного смесителя.

Без смесителя

Появление осциллографов с аналоговой полосой пропускания, охватывающей СВЧ и миллиметровый диапазон, расширило выбор доступных решений. В совокупности с программным обеспечением (ПО) для анализа сигналов (как правило, ПО векторного анализа сигналов VSA) такие осциллографы могут выполнять традиционные функции анализа сигналов, такие как анализ спектра, анализ во временной области и анализ параметров демодуляции или модуляции. В осциллографах СВЧ и миллиметрового диапазона оцифровывается непосредственно исследуемый сигнал, причём оцифрованный сигнал представляет весь частотный диапазон, а не узкую полосу частот вблизи интересующего сигнала. Хотя такой подход можно охарактеризовать, как схему без смесителя, при выполнении большинства измерений по-прежнему применяется метод селективного анализа в частотной области, при этом преобразование частоты (смещение), фильтрацию и обработку данных выполняет не аналоговое оборудование, а ПО VSA.

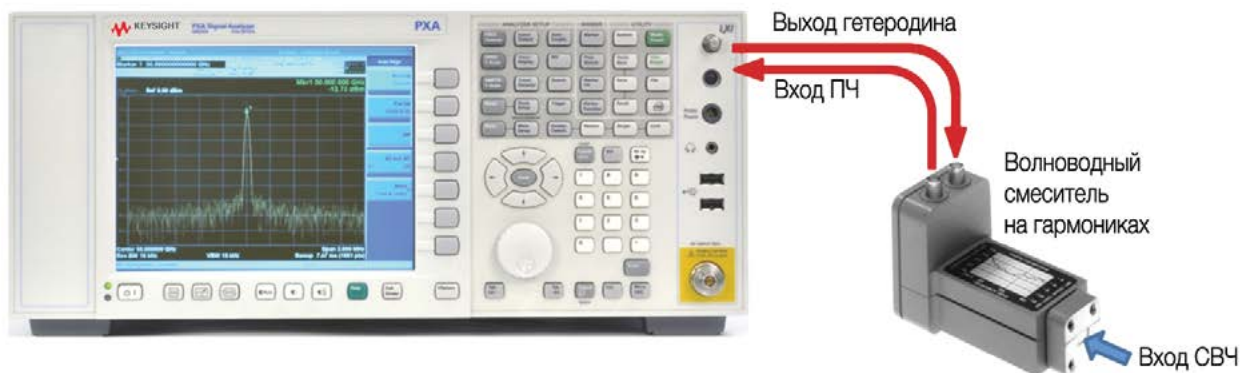


Рисунок 1. Внешний смеситель, показанный здесь с анализатором сигналов Keysight PXA, осуществляет первое преобразование (понижение) частоты за пределами анализатора. При этом на внешний смеситель подаётся настраиваемый сигнал гетеродина, а со смесителя поступает сигнал ПЧ. Дальнейшая обработка сигнала выполняется так же, как и в схемах с встроенным смесителем.

Потенциальные преимущества внешнего смесителя

Цена

Как правило, с ростом диапазона частот растёт и цена анализатора, при этом охват и СВЧ, и миллиметрового диапазона может понадобиться лишь в редких случаях. Соответствующий внешний смеситель позволяет использовать анализатор, работающий на ВЧ или в нижней части СВЧ-диапазона для анализа сигналов любой частоты.

Удобство и чувствительность

Некоторые сигналы подаются через волноводы, которые обладают сравнительно малыми потерями, но имеют жёсткую конструкцию и сложные способы присоединения. Внешний смеситель может закрепляться непосредственно на волноводе, передающем исследуемый сигнал, а затем подключаться к анализатору гибким, недорогим и (сравнительно) низкочастотным кабелем с малыми потерями.

Диапазон рабочих частот

Некоторые диапазоны частот удаётся охватить только внешними смесителями. Некоторые сигналы невозможно подать на одноприборные решения из-за ограничений по расстоянию, несовместимости физической конструкции и больших потерь на передачу.

Характеристики

Непосредственное подключение смесителя к линии передачи исследуемого сигнала может снизить коэффициент шума измерительной системы и повысить точность. Также может понизиться и фазовый шум благодаря более высокой частоте гетеродина современных анализаторов, позволяющей использовать для внешнего смещения гармоника меньшего порядка. В некоторых случаях при использовании внешнего смесителя можно добиться существенно меньшего фазового шума по сравнению с одноприборными решениями.

Расширенные функции смесителей, используемых в качестве выносной измерительной головки

Подключение внешнего смесителя к анализатору спектра или сигналов выполняется сравнительно просто с использованием всего одного или двух относительно низкочастотных кабелей (≤ 10 ГГц). Точные измерения требуют настройки анализатора на нужную выходную частоту (номер гармоники смесителя) и учёта потерь преобразования в смесителе. Потери преобразования в смесителе описываются кривыми АЧХ, поставляемыми производителем смесителя, и вводятся в анализатор в виде поправочных коэффициентов. Эти поправочные коэффициенты вводятся вручную или загружаются с диска или USB-накопителя.

В процессе настройки анализатора на конкретный смеситель могут возникать ошибки, например, при вводе значений потерь преобразования, привязке этих значений к конкретному смесителю или в результате проблем подключения, таких как неправильный уровень сигнала гетеродина или неравномерность его АЧХ.

Все эти проблемы может решить простой цифровой интерфейс между анализатором и интеллектуальным смесителем. Например, новые волноводные смесители на гармониках Keysight M1970V/W (рисунок 2) хранят во встроенной памяти измеренные на заводе-изготовителе значения потерь преобразования, а также номер модели и серийный номер.

Кроме того, эти смесители имеют цепь измерения/мониторинга мощности гетеродина, которая помогает оптимизировать уровень гетеродина во всём частотном диапазоне и выявляет все проблемы подключения. Такие измерительные приборы, как анализаторы сигналов N9030A серии PXA, способны автоматически определять подключенные через USB-кабель смесители, загружать таблицу значений потерь на преобразование, выполнять соответствующие настройки для работы с конкретным смесителем и производить коррекцию уровня сигнала гетеродина для оптимизации точности измерений.

В результате улучшаются характеристики, повышается удобство измерений, снижается вероятность ошибок и реализуется простая схема с выносной измерительной головкой, которую можно устанавливать в непосредственной близости от тракта исследуемого сигнала.

Преимущества внешних смесителей

- Низкая цена
- Удобство применения
- Высокая чувствительность
- Перекрытие широкого диапазона частот
- Оптимальные характеристики

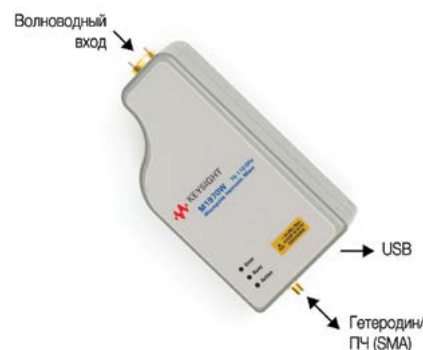


Рисунок 2. Интеллектуальный внешний смеситель упрощает подключение и настройку, требуя лишь одного мультиплексируемого подключения сигнала (вход гетеродина и выход АЧ) и подключения по USB для обнаружения смесителя анализатором, автоматической загрузки информации о потерях преобразования, мониторинга уровня гетеродина и других операций.

Сравнение методов реализации первого смесителя

Критерии	Встроенный смеситель	Внешний смеситель	Непосредственная дискретизация входного сигнала
Диапазон рабочих частот	Ограничен максимальными частотами 50-70 ГГц	От СВЧ до 1 ТГц и выше	110 ГГц с одним частотным диапазоном
Удобство измерительной схемы	Простое одноприборное решение с одним соединением	Необходимо подключение смесителя и загрузка информации о потерях на преобразование (в интеллектуальных смесителях выполняется автоматически)	Одноприборное решение; для анализа сигналов обычно используется ПО VSA
Гибкость подключения: коаксиальный кабель	Простое подключение, однако имеется ограничение по длине кабеля	Смесители, как правило, имеют волноводный входной соединитель, поэтому для них требуется коаксиально-волноводный переход	Простое подключение, однако имеется ограничение по длине кабеля
Гибкость подключения: волновод	Подключение может быть сложным, в зависимости от конфигурации ИУ	Непосредственное, гибкое подключение к линии передачи исследуемого сигнала	Подключение может быть сложным, в зависимости от конфигурации ИУ
Точность, простота калибровки	Одноприборное, полностью специфицированное решение, как правило, самое точное	Характеристики зависят от параметров анализатора и внешнего смесителя; могут быть подобны характеристикам встроенного смесителя	Одноприборное решение, хотя характеристики могут косвенно зависеть от ПО VSA. Точность зависит от АЦП.
Идентификация сигнала (распознавание сигналов зеркальных каналов, возникающих в процессе преобразования частоты)	Благодаря преселекции отдельная обработка не требуется	Широкополосные измерения (≥ 600 МГц или 2х ПЧ) могут потребовать применения ручной или автоматической обработки	Благодаря ограничению входной полосы и цифровой фильтрации в ПО VSA, отдельная обработка не требуется
Чувствительность	Наилучшая, благодаря предусилителю, малому шумящему тракту и малому уровню собственных шумов	Предусилителя нет, но короткое/ прямое подключение к тракту исследуемого сигнала может повысить чувствительность	Умеренная (в связи с широкой полосой и ограниченной разрядностью дискретизации)
Цена	От умеренной до высокой	Умеренная	Самая высокая
Полоса мгновенного анализа	160 МГц со встроенным дискретизатором, 900 МГц с внешним дискретизатором по выходу ПЧ	120 МГц и выше со встроенным дискретизатором, 700 МГц и выше с внешним дискретизатором по выходу ПЧ	110 ГГц с дискретизацией в одном частотном диапазоне

Таблица 1. Сравнение методов реализации первого смесителя

Выбор решения для широкополосного анализа

Традиционные измерения спектра требуют максимальной полосы ПЧ анализатора, которая должна соответствовать минимальному требуемому разрешению по частоте или превышать его. Другие виды измерений, такие как анализ импульсных сигналов или демодуляция, могут потребовать значительно более широкой полосы и соответствующей возможности дискретизации сигнала.

Одноприборные решения для анализа сигналов

Полоса ПЧ и полоса дискретизации анализаторов спектра и сигналов расширялись с ростом частоты измеряемого сигнала. Наиболее часто используются полосы 25 и 40 МГц, а самая широкая на сегодняшний день полоса 160 МГц и более реализована в таких анализаторах, как Keysight PXA. Дискретизаторы ПЧ, используемые в современных анализаторах сигналов, в сочетании с полностью цифровой обработкой сигнала ПЧ позволяют охватить весь диапазон спектральных и других измерений как внутри полосы, так и за её пределами.

Многие интегрированные одноприборные решения, такие как анализаторы Keysight серии X, поддерживают широкий выбор измерительных приложений, например, для измерения фазового шума и мощности в канале, а также специализированные приложения, касающиеся современных коммуникационных стандартов. Кроме того, на анализаторах серии X можно запускать ПО векторного анализа сигналов Keysight 89600 VSA, которое выполняет всевозможные векторные измерения и измерения параметров модуляции, включая поддержку вновь появляющихся коммуникационных стандартов.

Преселекторы анализаторов сигналов СВЧ и миллиметрового диапазона настроены на отслеживание центральной частоты для традиционных измерений спектра, а их полоса пропускания превышает минимальное разрешение по частоте. Однако для анализа спектра широкополосных сигналов может оказаться важным исключить преселектор из сигнального тракта. Это выполняется с помощью функции «обхода преселектора» (как правило, опциональной), которая активируется с передней панели или дистанционно.

Благодаря сочетанию удобства, высокого разрешения и наличия программных решений, широкополосные дискретизаторы современных анализаторов сигналов часто являются наилучшим выбором для любого анализа широкополосных сигналов. Но если полосы анализатора сигналов оказывается недостаточно, то часто рассматриваются альтернативные варианты, некоторые из которых описаны ниже.

Анализаторы сигналов в роли широкополосных понижающих преобразователей частоты

Некоторые анализаторы спектра и сигналов, такие как Keysight PXA, могут использоваться в качестве настраиваемых понижающих преобразователей частоты и/или детекторов СВЧ и миллиметрового диапазона. Анализатор PXA имеет выходы ПЧ и видеосигналов, включая действующий видеовыход с логарифмическим детектированием огибающей (длительность фронта от 14 нс) для анализа временных параметров импульсов, например, импульсов РЛС и систем РЭБ. Благодаря полосе ПЧ свыше 1 ГГц (что значительно шире максимальной полосы дискретизации), PXA можно использовать с широкополосными дискретизаторами для преобразования частоты, как показано на рис. 3. Анализ сигналов может выполняться дискретизирующим прибором, таким как осциллограф Keysight Infiniium, с помощью ПО Keysight 89600 VSA.

Осциллографы и другие широкополосные дискретизаторы обычно значительно отличаются по характеристикам (динамический диапазон, линейность, эквивалентная разрядность) от встроенных дискретизаторов анализаторов сигналов. Уровень искажений может составлять 40–45 дБ в отличие от 75–80 дБ, свойственных встроенным дискретизаторам. Это делает внешние дискретизаторы предпочтительными для внутриполосных измерений, таких как анализ качества модуляции и измерения импульсных характеристик широкополосных сигналов. Затем можно выполнять внеполосные измерения с помощью обычных функций анализа спектра анализатора сигналов.

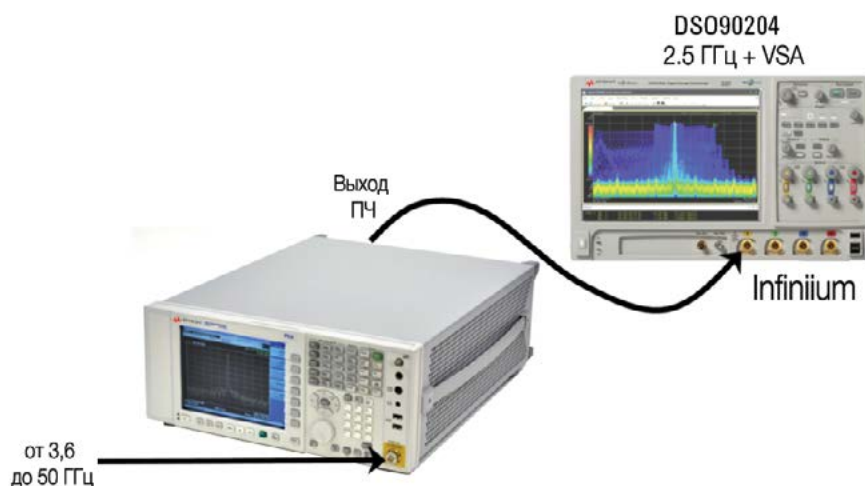


Рисунок 3. Анализатор сигналов Keysight PXA используется в качестве широкополосного понижающего преобразователя частот. Для дискретизации широкополосной ПЧ (до 900 МГц) используется внешний прибор, например, осциллограф. Обработка сигнала для анализа спектра, демодуляции и векторных измерений выполняется с помощью ПО векторного анализа сигналов Keysight 89600 VSA, работающем на осциллографе или на ПК.

Специальные преобразователи, повышающие и понижающие частоту

Некоторые сверхширокополосные сигналы (обычно в миллиметровом диапазоне) требуют сочетания полосы пропускания, чувствительности и рабочей частоты, недоступного в анализаторах сигналов, непосредственно выполняющих анализ или работающих в качестве понижающих преобразователей частоты. Полоса модуляции таких сигналов может достигать 2 ГГц и более, существенно сужая диапазон решений.

Для решения подобных измерительных задач компания Keysight предлагает специальные повышающие и понижающие преобразователи частот, доступные по специальному заказу. Эти решения изготавливаются на заказ с учетом необходимых характеристик и не предлагаются в качестве серийно выпускаемых изделий. Такие специализированные преобразователи обладают высокой чувствительностью (малыми потерями преобразования) и применяются в приложениях, в которых отсутствует внешний разъём и, следовательно, сигнал подается через антенну. Высокая чувствительность дополняется очень широкой полосой, необходимой для измерения параметров сверхширокополосных сигналов.

Специальные понижающие преобразователи имеют целый ряд ограничений, в том числе по диапазону частот. Зато они точно настроены на определенную рабочую частоту конкретного приложения. Они не имеют преселектора и, следовательно, неоптимальны для внеполосных измерений, таких как измерения паразитных излучений. Эти понижающие преобразователи миллиметрового диапазона не являются интегрированными решениями и требуют применения отдельных гетеродинов.

Выходной сигнал таких понижающих преобразователей миллиметрового диапазона оцифровывается широкополосным дискретизатором, в роли которого выступает обычно осциллограф. Измерения параметров спектра и демодуляция выполняются специальным ПО, таким как Keysight 89600 VSA.

Пример такого специализированного понижающего преобразователя показан на рисунке 4. Данный понижающий преобразователь частот миллиметрового диапазона имеет волноводный вход и, как видно на рисунке, оборудован рупорной антенной для анализа сигналов ближнего поля, недоступных при использовании волноводных или коаксиальных соединителей.



Рисунок 4. Сверхширокополосный понижающий преобразователь миллиметрового диапазона компании Keysight Technologies. В правой верхней части виден волноводный вход с рупорной антенной. Этот понижающий преобразователь использует сигнал внешнего СВЧ-гетеродина, а его выходной сигнал подаётся на внешний дискретизатор, например, на осциллограф.

Сравнение коаксиальных и волноводных соединений

Обычно анализаторы спектра и сигналов оснащены коаксиальными соединителями, и эти соединители выбираются в соответствии с максимальной частотой анализатора. Широкая доступность коаксиально-волноводных переходов и возможность применения внешних смесителей (обычно с волноводными входами) означает, что пользователь может сам выбирать способ подачи сигнала.

Волновод обычно представляет собой жесткую пустотелую металлическую конструкцию с прямоугольным поперечным сечением, имеющим пропорции 2:1. Рабочая частота волновода охватывает примерно одну октаву, причём с ростом частоты размеры волновода уменьшаются. Волновод использует один режим распространения. Частотой среза называется минимальная частота нужного режима распространения, и волновод ведёт себя, как фильтр верхних частот с этой частотой среза. Выше номинального рабочего частотного диапазона возможно несколько режимов распространения, каждый из которых обладает разными передаточными характеристиками.

И коаксиальные, и волноводные линии имеют свои достоинства и недостатки. В частности, волновод обычно выбирают в тех случаях, когда необходима большая мощность сигнала или малые потери. В верхней части миллиметрового диапазона и в ГВЧ-диапазоне волновод может оказаться единственным приемлемым решением. Преимущества и недостатки этих методов подачи сигнала перечислены в таблице 2.

Критерии	Коаксиальный кабель	Волновод
Преимущества	Гибкость, простота изменения схемы соединений	Малые потери сигнала
	Широкий диапазон частот	Возможность работы с большой мощностью
	Малая масса	Механическая прочность
	Возможность передачи постоянного напряжения для питания или управления	—
	Меньшая стоимость	—
	Пригодность для использования с пробником или для измерения параметров компонентов	—
Недостатки	Большие потери, увеличивающиеся с ростом частоты	Жёсткость
	Требует аккуратного отношения (из-за малых геометрических размеров высокочастотных кабелей и соединителей)	Может потребоваться изготовление на заказ (ведет к повышению стоимости)
	—	Большие временные затраты на изготовление и изменение конфигурации
	—	Диапазон частот ≤ 1 октавы
	—	Для подключения к анализаторам и другим приборам с коаксиальным входом нужен переход

Таблица 2. Сравнение коаксиальных и волноводных соединений

Выбор и применение кабелей и соединителей

Кабели, соединители и переходы

Точность и согласованность измерений зависит от правильного выбора кабелей и переходов, рассчитанных на частоту измеряемого сигнала. Их материалы и конструкция специально рассчитаны на определённый частотный диапазон для обеспечения согласования импеданса и снижения потерь в этом диапазоне. Использование кабелей и элементов соединения плохого качества в дорогостоящей измерительной системе может привести к значительному ухудшению ее характеристик.

Поскольку большинство анализаторов спектра миллиметрового диапазона применяется для отладки оборудования, использующего также и более низкие частоты, может возникнуть соблазн использовать оснастку, рассчитанную на эти низкие частоты. Однако меньшая длина волны требует применения меньших по размеру кабелей и соединителей. Чтобы избежать явления, получившего название «возникновение высших мод» (появление первой высшей моды для круглого волновода в коаксиальной структуре), диаметр коаксиальных соединителей и кабелей должен быть значительно меньше длины волны сигнала. Для измерений в миллиметровом диапазоне это означает недопустимость применения широко распространённых измерительных принадлежностей с соединителями типов SMA и прецизионных 3,5 мм. На рис. 5 выполнено сравнение вносимых потерь соединителей типа SMA и соединителей диаметром 2,4 мм в диапазоне частот от 30 до 50 ГГц.

Интересно отметить, что, как показано на рисунке 5, вносимые потери кабельной сборки с соединителями SMA почти везде немного меньше потерь сборки с соединителями 2,4 мм, но зато их зависимость значительно менее равномерна. На частоте чуть ниже 36 ГГц вносимые потери имеют хорошо заметный очень узкополосный пик, амплитуда, частота и фаза которого могут меняться непредсказуемым образом. Это создаёт проблему для любого измерения в этом частотном диапазоне. Например, нестабильность амплитуды и фазы этого пика могут исказить любой модулированный сигнал, совпадающий с ним по частоте.

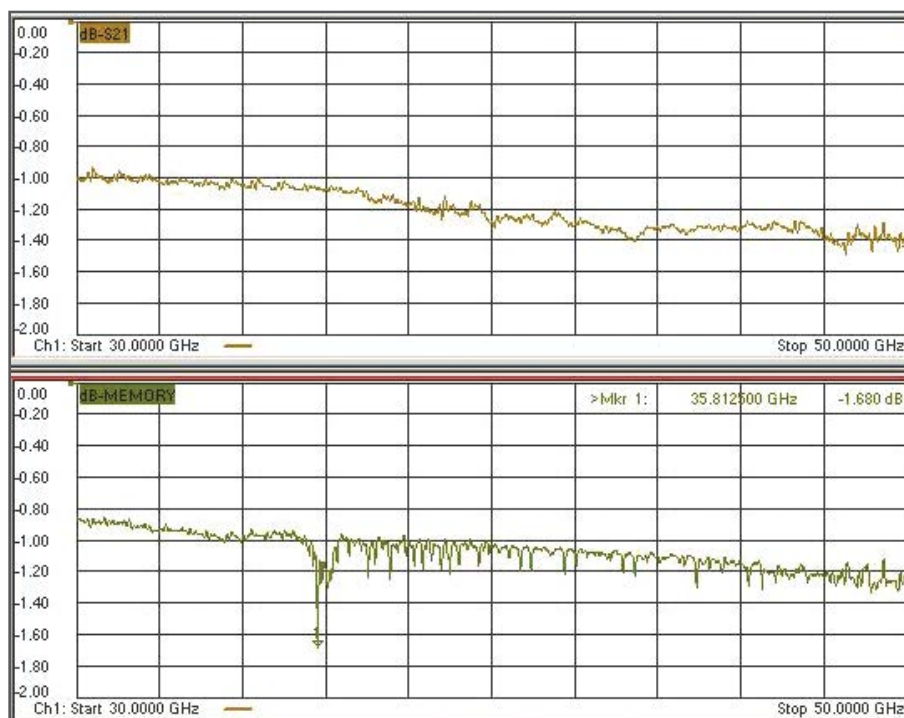


Рис.5. Правильный выбор кабелей и соединителей имеет большое значение. Данные результаты измерений получены в полосе частот от 30 до 50 ГГц и показывают отличия кабелей и переходов с соединителями SMA от аналогов с соединителями 2,4 мм. Обратите внимание на множественные провалы амплитуды на нижней кривой примерно на частоте 36 ГГц и выше. Это явление порождает большие погрешности измерения сигнала и параметров цепи.

В таблице 3 перечислены широко распространённые соединители СВЧ и миллиметрового диапазонов, указаны их частотные диапазоны и взаимная совместимость.

Вы можете рассмотреть возможность применения соединителей типа 2,92 мм на частотах до 40 ГГц и выгодно воспользоваться тем фактом, что соединители 2,92-мм совместимы с соединителями типов SMA и 3,5-мм при выполнении измерений на более низких частотах. Однако для достижения лучших характеристик и повторяемости на частотах до 50 ГГц рекомендуется применять принадлежности с соединителями 2,4 мм.

Если требуется проводить измерения на различных участках частотного диапазона, то стоит рассмотреть использование принадлежностей с соединителями типа 2,4 мм и различных переходов для обеспечения подключения к ИУ. И хотя эти принадлежности имеют несколько большие вносимые потери по сравнению с соединителями типа SMA и 3,5 мм (в основном, выше 30 ГГц), принадлежности с соединителями 2,4 мм могут использоваться для охвата всех нижних частот и обеспечивают превосходную воспроизводимость измерений.

Особенно важно учитывать потери, вносимые кабелями и переходами, в миллиметровом диапазоне. Как будет описано ниже, одиночный переход может иметь вносимые потери от 0,5 до 1 дБ на частотах близких к 50 ГГц. Для более точных измерений эти потери нужно учитывать и по возможности компенсировать, поскольку характеристики анализаторов нормируются в плоскости соединителя измерительного порта без учета переходов.

Тип соединителя	Диапазон частот	Совместим с	Не рекомендуется совмещать с
SMA	Варируется, 18-24 ГГц	3,5 мм, 2,92 мм	2,4 мм
3,5 мм (APC 3,5)	34 ГГц	SMA, 2,92 мм	2,4 мм
2,92 мм или “К”	до 40 ГГц	SMA, 3,5 мм	2,4 мм
2,4 мм	до 50 ГГц	только 1,85 мм	SMA, 2,92 мм, 3,5 мм
1,85 мм	65-70 ГГц	только 2,4 мм	—
1 мм	110 ГГц	—	—

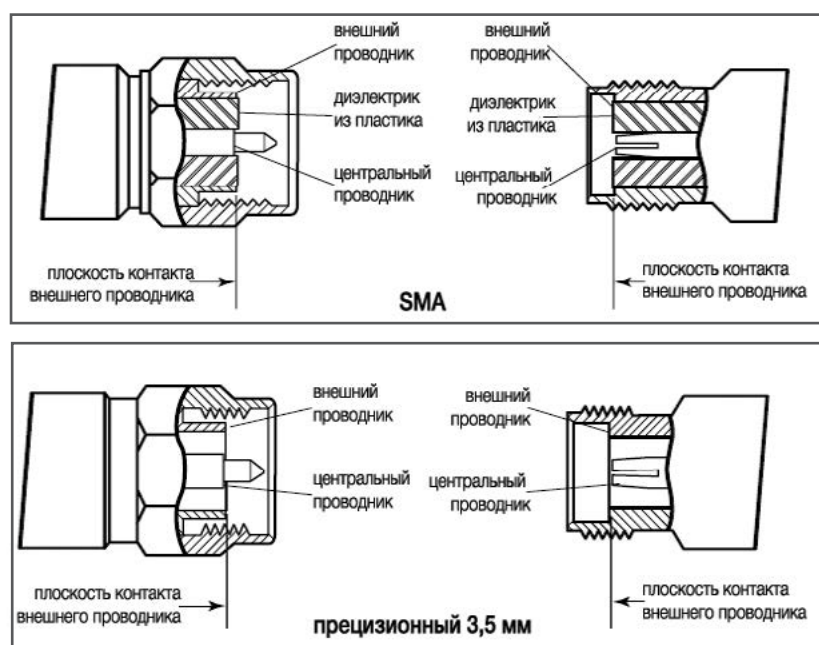
Таблица 3. Типы СВЧ-соединителей

Примечание: соединители типа SMA широко распространены и недороги, но недостаточная точность их изготовления влияет на качество и характеристики соединения. Это может вызвать повышенный износ при подключении к другим прецизионным соединителям. Соединители SMA допускают лишь очень ограниченное число циклов переподключения и должны обследоваться перед каждым применением.

Классы и конструктивные особенности кабелей и соединителей

Соединители и принадлежности СВЧ и миллиметрового диапазона изготавливаются из различных материалов с очень малыми допусками. Материалы и конструкция этих кабелей и переходов специально рассчитаны на высокие частоты. Точность изготовления соответствует малой длине волны передаваемых сигналов, за счет чего обеспечивается оптимальное согласование импеданса и снижаются флуктуации вносимых потерь.

Например, осмотрев соединитель SMA, можно заметить, что в нем применяется диэлектрик из политетрафторэтилена (ПТФЭ), тогда как в прецизионных соединителях типов 3,5 и 2,4 мм применяется воздушный диэлектрик, как правило, с малозаметными шайбами, поддерживающими центральный проводник. Однако вы не сможете оценить более точные допуски габаритных размеров этих принадлежностей. Также сложно заметить отличия в конструкции контакт-деталей, втулок и их конусов и буртиков из-за очень малого размера.



Сравнение соединителей SMA и прецизионного 3,5 мм

Приведенные чертежи поперечных сечений наглядно демонстрируют различия между соединителями типов SMA и прецизионным 3,5 мм. Особо стоит отметить, что в конструкции соединителей SMA в качестве диэлектрика используется пластик, а в соединителе типа 3,5 мм — воздух.

Кроме того, существуют отличия между соединителями общего назначения, приборного и метрологического классов, но они выходят за рамки рассмотрения настоящего документа.

Точность и малые габариты принадлежностей миллиметрового диапазона неизбежно снижают их механическую прочность и делают их значительно более дорогими по сравнению с низкочастотными версиями. Для высокочастотных измерений очень важно не ухудшать характеристики дорогих контрольно-измерительных систем, используя низкокачественные или неподходящие кабели и принадлежности.

Момент силы при затяжке соединителя

Применение специального динамометрического ключа обеспечивает затяжку соединителя с нужным усилием, улучшая воспроизводимость измерений и продлевая срок службы соединителя. Хотя металлические корпуса соединителей и переходов выглядят довольно прочными, они тем не менее обладают некоторой гибкостью. Малая длина волны сигналов миллиметрового диапазона делает их очень чувствительными к таким изгибам. Для обеспечения повторяемости измерений нужно использовать одинаковые моменты затяжки от измерения к измерению и для всех однотипных соединителей в измерительной схеме. Кроме того, динамометрический ключ предотвращает повреждения, связанные с чрезмерной затяжкой, не сокращая номинального срока службы соединителей. Малые размеры высокочастотных соединителей означают, что они не обладают большой механической прочностью и могут деформироваться или даже повреждаться при чрезмерной затяжке.

Для измерений на частотах ниже 70 ГГц широко применяются два момента затяжки: 90 Н·см для соединителей 2,4 мм, 1,85 мм и прецизионных 3,5 мм, 56 Н·см для соединителей SMA. Выпускаются специальные динамометрические ключи, настроенные на эти значения.

Благодаря своей совместимости, соединители SMA часто используются в сочетании с соединителями 3,5 мм и/или 2,92 мм. В этом случае соответствующий момент затяжки таких смешанных конструкций зависит от типа вилки. Динамометрический ключ с усилием затяжки 56 Н·см следует применять при подключении соединителя типа SMA "вилка" к "розетке" одного из типов 3,5 мм или 2,92 мм (К) или другой «розетке» типа SMA, а динамометрический ключ с усилием затяжки 90 Н·см – при подключении соединителей типов 3,5 мм или 2,92 мм "вилка" к соответствующим розеткам, включая SMA.

Примечание: выполняя соединение, вращайте только гайку и никогда не вращайте корпуса соединителей, когда их контактные поверхности соприкасаются. Во избежание вращения удерживайте второй соединитель другим ключом.

Выигрыш от соответствующей затяжки может быть менее дБ на одно соединение, но погрешности или потери на нескольких соединениях могут сложиться и стать значительными на фоне высокой точности современных анализаторов и методов измерений. Достижение высокой точности в миллиметровом диапазоне весьма проблематично, и соответствующий момент затяжки устраняет один из источников дополнительной погрешности.

Согласованность соединений

Для получения стабильных и повторяемых результатов измерений, везде, где возможно, используйте одинаковые соединители, кабели и способы их прокладки. Даже лучшие кабели и соединители обладают заметными вносимыми и возвратными потерями. Причём эти эффекты, как правило, растут с частотой. Малые размеры кабелей и оборудования миллиметрового диапазона предотвращают снижение амплитуды из-за «возникновения высших мод», но приводят к увеличению потерь сигнала. На частоте 40 ГГц потери в коаксиальном кабеле могут превышать 3 дБ на метр (без учёта соединителей) и более 0,5 дБ на переход или разъёмное соединение. Даже в тех ситуациях, где используются соединительные линии сравнимой длины, применение разных комбинаций кабелей и соединителей может порождать различия во вносимых потерях и потерях на отражение.

Аналогичная ситуация возникает при использовании разных типов или марок кабелей и даже при сравнении хороших кабелей с изношенными или повреждёнными. Изгиб, скручивание и растяжение кабелей тоже могут повлиять на результаты – в некоторых случаях можно увидеть разницу в реальном времени, изогнув кабель в процессе измерений. Поскольку во многих измерениях воспроизводимость не менее важна, чем абсолютная погрешность (особенно там, где для повышения точности может использоваться разного рода компенсация), нужно стараться использовать во всех измерениях одинаковые кабели и соединители в одной и той же конфигурации. Неудивительно, что применение полужесткого коаксиального кабеля может улучшить многие измерения, снижая риск случайных перемещений и обеспечивая более стабильное соединение.

Для подключения анализатора к ИУ сигнальные тракты должны быть как можно короче, с минимумом соединений и переходов. Чем короче кабели и меньше соединений и переходов, тем меньше вероятность возникновения проблем из-за неидеальности их характеристик. Впрочем, кабели не должны быть такими короткими, чтобы скручиваться или изгибаться с радиусом, меньшим, чем рекомендует производитель. Изгибы под острыми углами могут создавать физические неоднородности, которые способны привести к локальным перепадам импеданса, повреждению кабеля или нарушению контакта в области соединителей кабельной сборки.

Если при выполнении измерений производится несколько подключений, особенно при относительных измерениях, важно учитывать концепцию опорной плоскости измерений. Для этого необходимо знать, в какой части измерительной схемы происходят изменения от измерения к измерению.

Риск электрических и механических повреждений

Электрические повреждения

Электрические повреждения особенно опасны для входов анализаторов. В их входных цепях используются высокочастотные компоненты, которые имеют малые физические размеры и не могут рассеивать большую мощность или выдерживать высокие напряжения. Эта проблема становится ещё острее в миллиметровом диапазоне, поскольку на этих частотах обычно не используются такие защитные меры, как блокировка постоянной составляющей, из-за их влияния на характеристики анализатора. Если исследуемый сигнал содержит постоянную составляющую, то пользователь должен сам обеспечить ее блокировку, возможно, в виде описанного ниже защитного перехода.

Электростатический разряд создает серьезные проблемы на высоких частотах, поскольку малые размеры компонентов СВЧ и миллиметрового диапазонов делают их более уязвимыми. Типичные меры защиты от электростатического разряда включают настольные антистатические коврики, антистатические браслеты и защитное заземление анализатора.

Некоторые источники сигналов, несмотря на малую номинальную мощность, могут представлять опасность из-за значительных перепадов уровней при включении. Если используемый источник сигналов обладает такой особенностью, можно увеличить ослабление по входу анализатора во время коммутации источника.

Главная неприятность электрического повреждения заключается в том, что результирующее ухудшение характеристик может быть незначительным и обнаружится не сразу. Некоторые повреждения могут существенно ухудшить характеристики анализатора, но так, что это будет неочевидно.

Механические повреждения

Малые размеры и высокая точность изготовления СВЧ-соединителей делает их уязвимыми к механическим повреждениям. К сожалению, некоторая степень повреждения и определённый износ неизбежны после многих циклов подключений. Одно из практических решений заключается в защите соединителей передней панели анализатора за счёт применения внешнего соединения через специальный переход, называемый защитным переходом. Как правило, в качестве защитного перехода на таких частотах используется переход с соединителями типа 2,4 мм (розетка-розетка). Вот почему на передней панели анализаторов спектра миллиметрового диапазона часто устанавливаются соединители типа "вилка". Кроме того, соединитель типа "вилка" более прочен и меньше подвержен повреждениям при подключении несовместимых соединителей другого типа или поврежденных соединителей.

Защитный переход обычно оставляют подключенным к передней панели анализатора, и все подключения выполняют через него, а не напрямую к штатному соединителю анализатора. Это существенно уменьшает число подключений непосредственно к соединителю анализатора и помогает избежать сравнительно дорогой замены этого соединителя (и последующей калибровки). Некоторые примеры переходов, применяемых в качестве защитных, показаны на рисунке 6.

В схемах, где используются разные типы соединителей, например 2,4 мм (или 1,85 мм) и SMA, возникает опасность повреждения при попытке сочленения соединителей разных типов. Соединитель SMA механически подобен соединителям 2,4 мм или 1,85 мм, и подключение вилки SMA предотвращается лишь тем, что гайка SMA слишком мала для резьбы более высокочастотного соединителя. Защита, обеспечиваемая такой разницей размеров, перестаёт действовать, если гайка соединителя SMA ничем не фиксируется и может соскочить с соединителя. Эта опасность наглядно иллюстрируется на рисунке 7.

Вилка SMA на этих рисунках имеет съёмную гайку, что позволяет вставлять её в меньшую гильзу соединителя 2,4 мм "розетка", вызывая повреждение. Это справедливо и для соединителей 1,85 мм. Обратите внимание на отличие шага резьбы и длины торцевого среза на концах переходов 2,4 мм и 3,5 мм.



Рисунок 6. При работе с сигналами миллиметрового диапазона часто применяются защитные переходы с соединителями «розетка-розетка». Здесь показаны переходы для подключения анализатора с входными соединителями 2,4 мм к принадлежностям, имеющим соединители типов N и 2,4 мм.



Рисунок 7. На рисунке 7а показан переход с 2,4 мм на 3,5 мм, причём соединитель 2,4 мм расположен справа. Справа от него показана вилка SMA. Вилка SMA на рисунке 7б имеет съёмную гайку и смещенный по оси (слишком длинный) и слегка изогнутый центральный вывод, вероятно, из-за подключения к соединителю полужесткого кабеля.

Повышение качества измерений с помощью встроенных функций анализатора и возможностей по обработке сигнала

Современные анализаторы спектра и сигналов имеют множество функций, комплектаций и регулировок, которые позволяют оптимизировать характеристики анализатора для разных задач. Некоторые из них, такие как автоматическая настройка, универсальны и используются во всех измерениях. Другие являются опциональными, выбираемыми пользователем функциями или запускаемыми пользователем процедурами. Здесь мы обсудим некоторые наиболее характерные примеры.

Когда следует применять предусилитель, аттенюатор или оба эти устройства

Максимальная чувствительность анализатора сигналов достигается при установке ослабления входного аттенюатора на 0 дБ. Дополнительно чувствительность можно повысить с помощью встроенного или внешнего предусилителя, поскольку предусилитель с большим коэффициентом усиления и малым коэффициентом шума может существенно улучшить эффективную чувствительность или снизить коэффициент шума анализатора. Встроенные предусилители во многих случаях являются не самым оптимальным решением, но они удобны, и их характеристики учитываются при калибровке или регулировке анализатора.

Хотя предусилители обычно обеспечивают наилучшую чувствительность при установке входного аттенюатора анализатора на 0 дБ, сочетание входного аттенюатора с предварительным усилением до некоторой степени снижает точность и чувствительность и порождает искажения. Например, если аттенюатор установлен на 0 дБ, исследуемый сигнал поступает непосредственно на первый смеситель анализатора. Входное сопротивление смесителя не столь точно соответствует 50 Ом, как сопротивление аттенюатора, поэтому при отключенном аттенюаторе коэффициент отражения анализатора будет выше. Такой повышенный коэффициент отражения потенциально может привести к большему рассогласованию при измерениях с максимальной чувствительностью.

Применение входного аттенюатора улучшает согласование по входу анализатора, причём согласование улучшается (а погрешность рассогласования снижается) с ростом ослабления аттенюатора. Безусловно, недостатком применения аттенюатора является потеря чувствительности. При увеличении входного затухания на 1 дБ на это же значение снижается чувствительность.

Встроенный предусилитель анализатора (если таковой имеется) может помочь повысить чувствительность и снизить погрешность рассогласования. Если предусилитель с фиксированным усилением включен после аттенюатора, ослабление аттенюатора можно увеличить до значения, обеспечивающего адекватную чувствительность, одновременно снижая коэффициент отражения. При этом уменьшается погрешность измерений амплитуды, вызванная рассогласованием.

Применение альтернативных входных трактов для оптимизации зависимости чувствительности от искажений и других параметров

Некоторые общие улучшения функциональности и надежности анализатора спектра могут немного снизить коэффициент шума или средний уровень собственных шумов. В качестве примера можно привести коммутационные и вносимые потери при подключении встроенного СВЧ-предусилителя, при переключении в нижнюю часть рабочего диапазона частот (негармоническое смещение) и включение предусилителя низкочастотной части диапазона. Другим примером (например, в Keysight PXA) является переход на полупроводниковые входные коммутаторы для повышения надёжности и воспроизводимости результатов измерений. Полупроводниковые коммутаторы обычно имеют немного большие вносимые потери в СВЧ-диапазоне по сравнению с механическими коммутаторами. Потери на коммутацию и вносимые потери увеличиваются с ростом частоты, и хотя для повышения точности их можно измерить и компенсировать, они все-таки влияют на уровень шумов анализатора и, следовательно, на точность измерений низкоуровневых сигналов.

Предусилители могут компенсировать эти потери и улучшать отношение сигнал/шум для малых сигналов, обычно обладая меньшим уровнем собственных шумов или коэффициентом шума в СВЧ и миллиметровом диапазоне. Но обычно они могут применяться только при отсутствии сигналов большого уровня на входе анализатора. Сигналы большого уровня могут порождать нелинейные искажения в предусилителях, создавая паразитные сигналы, которые ошибочно можно принять за исследуемый сигнал. Такие мощные сигналы могут создать искажения, даже будучи за пределами выбранной полосы обзора.

В анализаторах сигналов серии PXA эта проблема решена за счет опционального малошумящего тракта, который использует аппаратный коммутатор для обхода элементов входных цепей, вносящих потери. В результате удается достичь максимальной чувствительности без предусилителя и получить конфигурацию, пригодную для работы с сигналами большого уровня. Малошумящий тракт работает на высоких частотах (3,6 ГГц), пример снижения собственных шумов показан на рисунке 8.

Вычитание собственных шумов анализатора

В некоторых измерениях ограничивающим фактором является уровень собственных шумов анализатора, а потери на преобразование смесителя на гармониках приводят к тому, что эти собственные шумы растут с ростом частоты. Шум поднимает нижнюю границу динамического диапазона и снижает точность измерений слабых сигналов. В присутствии сигналов большого уровня приходится увеличивать ослабление по входу анализатора, чтобы уменьшить искажения, вызванные перегрузкой, но это приближает малые сигналы к уровню собственных шумов анализатора. Таким образом, уровень собственных шумов анализатора ограничивает допустимое ослабление сигнала. Кроме того, шум может серьезно влиять на скорость измерений, потенциально требуя более высокого разрешения по частоте для таких измерений, как поиск паразитных составляющих спектра сигнала, поскольку в этом случае необходима меньшая скорость сканирования частоты из-за большего времени установления фильтра ПЧ.

В результате снижения вклада анализатора в общий уровень шумов можно повысить качество измерений как малых, так и больших сигналов. К тому же это позволяет выполнять измерения низких уровней без дополнительных затрат и потенциальных искажений, связанных с применением предусилителя.

Стандартной функцией анализаторов серии PXA является функция снижения уровня собственных шумов (NFE). Эта функция автоматически выполняет скалярное вычитание мощности шума анализатора из результатов измерений параметров спектра. PXA сочетает обработку результатов измерений в режиме реального времени со встроенной моделью шумов анализатора для всех измерительных конфигураций. Это позволяет ему вычитать большую часть собственных шумов без необходимости их отдельного измерения. Такое вычитание не влияет на скорость измерений, а выигрыш достигается на всех частотах, охватываемых анализатором. Пример улучшений при вычитании собственных шумов и применении малошумящего тракта показан на рисунке 9.

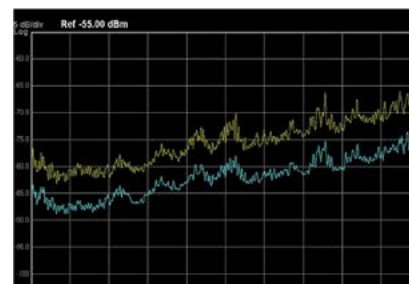


Рисунок 8. Данный результат измерений, выполненных в диапазоне от 3,6 до 50 ГГц при чувствительности 5 дБ/дел. демонстрирует снижение собственных шумов при выборе малошумящего тракта PXA.

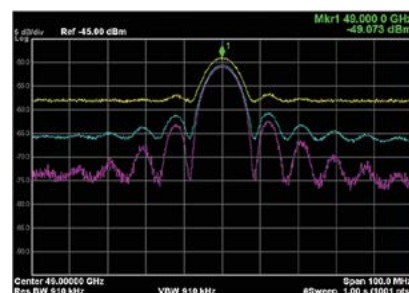


Рисунок 9. Качество измерений параметров низкоуровневого сигнала на частоте 49 ГГц значительно улучшено за счет применения малошумящего сигнального тракта и функции снижения собственных шумов анализатора Keysight PXA. Верхняя трасса соответствует обычному измерению, средняя трасса получена с малошумящим сигнальным трактом, а нижняя трасса демонстрирует эффект включения функции снижения собственных шумов.

Обход преселектора

Как уже говорилось, некоторые анализаторы СВЧ и миллиметрового диапазона оборудованы функцией обхода СВЧ-преселектора. Такой обход исключает настраиваемый фильтр преселектора из измерительного тракта, что очень важно для широкополосных измерений.

Выигрыш в динамическом диапазоне и цена обхода преселектора зависят от специфики конкретных измерений. Хотя обход преселектора устраняет связанные с его использованием вносимые потери, он частично ухудшает и фильтрацию широкополосного шума. Если основное внимание уделяется шумам, то влияние обхода преселектора на коэффициент шума анализатора надо оценивать отдельно в каждом конкретном случае. Кроме того, в результате обхода преселектора в сигнале ПЧ могут проявиться сигналы зеркального канала смесителя и другие паразитные составляющие спектра. Если вы столкнетесь с проблемами идентификации сигнала, попробуйте настроиться на нужный сигнал с включенным преселектором, а потом отключить преселектор для окончательного измерения.

Автокоррекция для оптимизации характеристик анализатора

Периодическая автонастройка является важным фактором, улучшающим характеристики анализаторов сигналов СВЧ и миллиметрового диапазона. Такая коррекция выполняется автоматически по времени и при изменении температуры, которая контролируется самим прибором. В некоторых ситуациях пользователь может запретить автонастройку, чтобы не допустить прерывания измерений. В таких случаях пользователь сам несёт ответственность за активацию автонастроек, когда это станет возможным. В общем случае лучших результатов измерений удаётся достичь, когда температура анализатора стабилизировалась, и непосредственно перед измерением выполнена калибровка или регулировка.

Регулировка, или центрирование, преселектора

Фильтры (перестраиваемые ЖИГ-фильтры), используемые в качестве преселектора в большинстве анализаторов спектра СВЧ и миллиметрового диапазона, работают без обратной связи и, следовательно, подвержены некоторому дрейфу. Поэтому операция центрирования преселектора очень важна и должна выполняться при каждом изменении центральной частоты. И хотя анализатор сам выполняет центрирование, оператор должен запустить этот процесс перед финальными измерениями. В ходе регулировки преселектора анализатор оптимизирует общие параметры преселектора во всем рабочем диапазоне, и такую регулировку можно выполнять не очень часто.

Новые исследования в области учета ошибки рассогласования позволяют повысить точность

Оценка и оптимизация точности измерений особенно сложна в СВЧ и миллиметровом диапазоне. Основные характеристики, такие как погрешность амплитуды и частоты (или фазовый шум), неравномерность АЧХ и воспроизводимость измерений, ухудшаются с ростом частоты. Конструктивные изменения внутри анализаторов, такие как использование гармоник более высокого порядка, обычно расширяют полосу измерений и снижают чувствительность. Кабели и соединители вносят вклад в ослабление сигнала и неравномерность АЧХ, связанные с погрешностью импеданса и потерями на отражение. К этим источникам погрешностей добавляются еще и погрешности, связанные с неидеальностью импеданса самого ИУ.

Понять причины снижения точности измерений мощности в СВЧ и миллиметровом диапазоне может быть довольно трудно, но имеются автоматические калькуляторы погрешностей, способные упростить эту задачу. Прочтите статью *«Расчет погрешности измерений мощности согласно международным рекомендациям»*, ссылка на которую приведена в разделе «Дополнительная информация» в конце настоящего документа.

Особенно важным параметром является погрешность рассогласования, которая часто является доминирующим фактором при расчете суммарной погрешности измерений амплитуды. Недавно опубликованные исследования компании Keysight Technologies позволяют лучше понять влияние погрешности из-за рассогласования на точность измерений. В прошлом эта погрешность моделировалась несколькими способами, которые давали завышенную оценку ошибки, связанной с рассогласованием. Экспериментальные исследования показали, что новый статистический метод, основанный на распределении Релея, даёт более точную оценку погрешности рассогласования. Этот метод снижает вклад ошибки рассогласования на результат от одной трети до одной шестой от прежнего значения.

Этот новый метод может применяться к обычному скалярному анализатору, где фаза коэффициента отражения неизвестна, и величина коэффициента отражения должна определяться на основе данных производителя в широком диапазоне частот.

Полную информацию и ссылку на программу расчета можно найти в рекомендациях по применению Keysight *«Расчет погрешности измерений мощности согласно международным рекомендациям»*.

Дополнительная информация

Информация в интернете

Анализаторы сигналов серии PXA:
www.keysight.com/find/pxa

Интеллектуальные смесители на гармониках:
www.keysight.com/find/smartmixers

Обзор коаксиальных соединителей:
www.home.keysight.com/upload/cmc_upload/All/CoaxialConnectorOverview.pdf

Что с чем соединяется, сравнительный анализ:
http://na.tm.keysight.com/pna/connectorcare/What_mates_with_what.htm

Классы соединителей:
http://na.tm.keysight.com/pna/connectorcare/Connector_Grades.htm

Совместимость соединителей типов SMA, 3,5 мм и 2,92 мм, *Microwave Journal* (Приложение о кабелях и соединителях), март 2007 года, доступен по ссылке www.gore.com

Калькулятор погрешностей измерений с помощью датчиков средней мощности:
www.home.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Average_Power_Sensor_Uncertainty_calculator_Rev6.xlsx

Литература

Основы измерения мощности в ВЧ- и СВЧ-диапазоне (часть 3) Расчет погрешности измерений мощности согласно международным рекомендациям, номер документа 5988-9215EN

Уход за соединителями, краткий справочник, номер документа 08510-90360

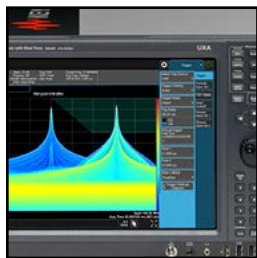
Основные правила ухода за соединителями, номер документа 5954-1566

Широкополосные измерения: применение анализатора сигналов серии PXA в качестве понижающего преобразователя частот с осциллографами Infiniium и ПО 89600 VSA, рекомендации по применению

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительств приведен на сайте:

www.keysight.com/find/contactus

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-9-7-17)

DEKRA Certified
ISO 9001 Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

Система управления качеством
Keysight Technologies, Inc.
сертифицирована DEKRA
по ISO 9001:2015

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Индивидуальная подборка наиболее важной для вас информации.

http://www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомления о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

www.keysight.com/find/pxa