

Калибровка контрольно-измерительных систем миллиметрового диапазона

Цель калибровки в миллиметровом диапазоне, как и в диапазонах более длинных волн, – исключение основных составляющих погрешности измерений. Процесс калибровки в этом диапазоне существенно отличается от традиционных методов.

При испытаниях устройств миллиметрового диапазона необходимо учитывать особые проблемы, возникающие при калибровке на частотах от 30 до 300 ГГц.



Рис. 1. Анализатор цепей с контроллером измерительного блока и модулями расширения частотного диапазона

Даже наилучшее контрольно-измерительное оборудование не может исключить все потенциальные ошибки в процессе испытаний устройств. Любой измерительный прибор имеет собственную погрешность. В миллиметровом диапазоне длины волн меньше, поэтому при сравнительно небольших смещениях в плоскости измерения появляется больше источников погрешности измерения. Другими словами, сдвиг всего на несколько миллиметров может привести к большим изменениям фазы сигнала. При столь малых допусках важно минимизировать эти составляющие погрешности, выполнив точную калибровку.

Вероятно, вы знакомы со стандартной калибровкой анализатора цепей и измерениями с использованием векторной модели коррекции погрешности. Часто эти процедуры выполняются для обеспечения максимальной точности измерений (посредством минимизации собственной погрешности анализатора цепей). Но в миллиметровом диапазоне необходимы специальные виды калибровки, обеспечивающие получение точных и воспроизводимых результатов измерений. Какие изменения потребуются для работы в этом диапазоне? Как гарантировать высокую достоверность измерений и предотвратить дорогостоящие ошибки при испытаниях устройств?

Качество векторного анализатора цепей определяется его калибровкой

Векторные анализаторы цепей обеспечивают высокую точность измерений. Но для достижения высокой точности потребуется калибровка анализатора с использованием математического метода, основанного на векторной модели коррекции погрешности. Этот тип калибровки отличается от ежегодной калибровки, выполняемой в калибровочной лаборатории с целью гарантировать корректную работу прибора и его соответствие техническим характеристикам, таким как выходная мощность и уровень собственных шумов приёмника.

Калибровка контрольно-измерительной системы на базе векторного анализатора цепей позволяет локализовать основной источник погрешности измерений - систематическую погрешность. Систематическая погрешность – это повторяющиеся неслучайные составляющие общей погрешности, которые можно измерить и исключить математическим методом. Причиной появления систематической погрешности является сама архитектура анализатора цепей, а также все кабели, переходы, измерительные принадлежности и (или) пробники, соединяющие испытуемое устройство с анализатором. Коррекция погрешности позволяет устранить систематическую погрешность. Контрольно-измерительная система на базе векторного анализатора цепей с векторной моделью коррекции погрешности дает реальную картину характеристик испытуемого устройства. Это означает, что только после калибровки анализатор цепей выдаст достоверные результаты измерений.

Без правильной калибровки выполнить точные измерения невозможно. В некоторых случаях погрешность может быть незначительной. Но в миллиметровом диапазоне длины волн очень короткие, поэтому даже небольшое отклонение влияет на результаты измерений. Погрешность может привести к отказу устройства или несоответствию его характеристик требованиям стандартов. Для выполнения измерений с помощью векторного анализатора цепей очень важно использовать правильные методы калибровки.

Новые проблемы калибровки

Калибровка позволит минимизировать расходы на повторные испытания и замену неисправных частей, а также повысить вероятность успешных испытаний в миллиметровом диапазоне. Для работы с системами этого диапазона вам потребуется выполнить калибровку в широком диапазоне частот – как правило, от 500 МГц до 125 ГГц или выше. При калибровке в этом диапазоне появляются проблемы, которых нет в диапазонах более низких частот.

Для эффективной калибровки анализатора цепей в миллиметровом диапазоне потребуется нагрузка, работающая в широком диапазоне частот. Используя такую

нагрузку, вы можете получить требуемую точность. Однако, подвижную нагрузку нежелательно использовать в миллиметровом диапазоне. Рассмотрим другие способы достижения высокой точности измерений. Например, на более низких частотах часто применяется полиномиальная модель. В этой модели в качестве параметров используются только индуктивность и обратные потери нагрузок. Для реализации модели потребуются нагрузки нижнего и верхнего диапазонов частот, а также широкополосная подвижная нагрузка. Обычно этого достаточно для выполнения надёжной калибровки на частотах ниже 30 ГГц. Однако при попытке применить этот метод для сигналов с более высокой частотой вы столкнетесь с проблемами.

Старая модель: полиномиальная модель калибровки

На рис. 2 дано краткое представление о трех полиномиальных моделях нагрузок нижнего, верхнего и широкого диапазонов частот с отклонениями от текущей физической модели. Красная трасса представляет модель, оптимизированную для нижнего диапазона частот. Модель имеет хорошую нагрузку, но потенциально ограничена перемычками. Для сигнала с частотой порядка 40 ГГц модель становится неработоспособной и погрешность начинает увеличиваться.

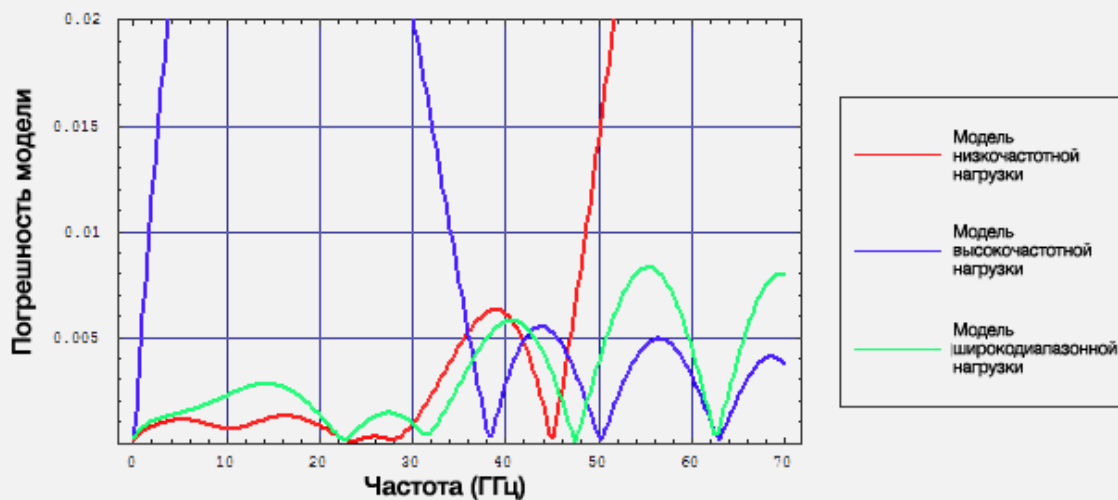


Рис. 2. Поведение моделей нагрузок нижнего, верхнего и широкого диапазонов частот в полосе от 0 до 70 ГГц

Синяя трасса представляет случай, когда используются только перемычки без нагрузки нижнего диапазона. В этом случае характеристика ограничена на частоте 40 ГГц и выше.

Однако, если вы создадите широкополосную модель, использующую преимущества модели нагрузки более низких частот (красная трасса) и корректируемой перемычками модели нагрузки верхних частот (синяя трасса), то получите зеленую кривую.

При этом появляется новая проблема для работы в миллиметровом диапазоне. Получив широкую полосу частот, вам понадобится исключить нагрузку. Для этого нужно использовать несколько перемычек, чтобы охватить широкий диапазон частот, в котором вы в данный момент работаете. Итак, полиномиальная модель в миллиметровом диапазоне неприемлема. Требуется новое решение.

Новая модель, использующая базу данных калибровки

Теперь мы знаем, что нужно использовать несколько перемычек для покрытия широкого диапазона рабочих частот. Но как это сделать? Как это выглядит на практике?

Вам понадобится калибровочный комплект (рис. 3), который устраняет необходимость в широкополосной нагрузке и реализует несколько перемычек для покрытия рабочего диапазона частот. Например, Keysight выпускает коаксиальный калибровочный комплект с нагрузкой диапазона нижних частот, четырьмя калибровочными мерами КЗ и одной ХХ. При использовании нагрузки этот комплект позволяет перекрыть диапазон от более низких частот до 50 ГГц. Перемычки со смещением позволяют получать на диаграмме Смита состояния, представляющие разные параметры импеданса.



Рис. 3. Калибровочный комплект

В этом случае вместо полиномиальной модели используется модель с базой данных калибровки. Пример, приведённый на рис. 2, показывает, что полиномиальная модель не работает в миллиметровом диапазоне, поэтому требуется другой метод.

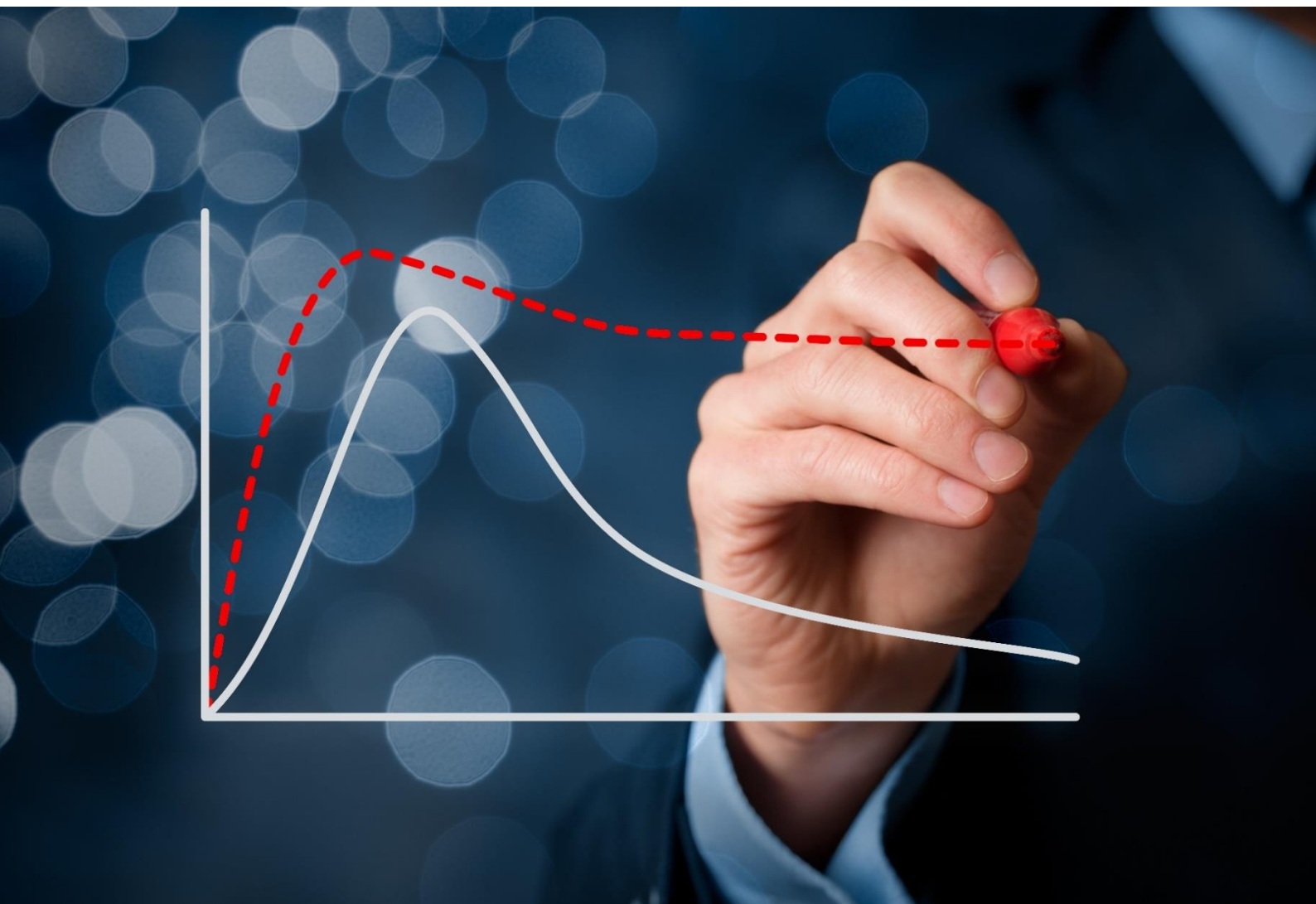
Отлично подойдет модель с базой данных калибровки. Она позволяет получать характеристики каждого устройства с использованием конкретного набора данных. Эта модель использует диаграмму Смита с известными данными различных компонентов в определённом диапазоне частот. Например, для измерения типа согласования с источником сигнала рассмотрим устройство с высоким отражением. Что представляет собой хорошая перемычка на этой частоте? Мы делаем построение и используем его в качестве калибровочной модели. Вы можете выполнить это для любого типа измерений: определите идеальные условия и используйте в качестве модели. С помощью полученного на основе модели набора данных можно откалибровать измерительную систему.

Для улучшения калибровки используйте метод наименьших квадратов, применяемый при вычислении поправочных коэффициентов. Отметим, что при этом используется весовая обработка, гарантирующая применение правильного стандарта при определении погрешности калибровки.

Калибровочный комплект компании Keysight, показанный на рис. 3 и использующий эти методы, позволяет эффективно калибровать систему для испытаний в миллиметровом диапазоне. Важно понимать, что калибровочные комплекты и методы, применяемые в области более низких частот, не работают в широкой полосе частот. Вам потребуется применить новый набор средств калибровки, который оптимизирует точность измерительной системы миллиметрового диапазона.

Типы интерфейсов

Очень важно иметь полное представление о типе калибровки, которая требуется в миллиметровом диапазоне, но при калибровке могут возникнуть сложности из-за использования соединителей различных типов. Испытуемое устройство (ИУ) взаимодействует с контрольно-измерительным оборудованием миллиметрового диапазона через коаксиальный кабель, полупроводниковую пластину, волновод или по радиоэффиру. Для каждого варианта требуется особая калибровка. Чаще всего используют коаксиальный кабель и полупроводниковую пластину, поэтому рассмотрим эти случаи подробнее.



Коаксиальный кабель

Коаксиальное соединение – традиционный интерфейс. Серийно выпускаемые соединители 1 мм могут работать на частотах до 120 ГГц, поэтому их целесообразно использовать при переходе к испытаниям в диапазонах более высоких частот.

Коаксиальные соединители 1 мм регламентированы стандартом IEEE 287-2007, что дает два основных преимущества:

1. **Результаты измерений будут прослеживаемы**, что имеет решающее значение для отслеживания калибровки и погрешности измерения. На рис. 4 показана погрешность, вычисленная в реальном времени, при использовании соответствующего соединителя 1,00 мм.
2. **Вы можете выполнять измерения для проверки соответствия стандартам.** Эти измерения часто необходимы для удовлетворения требований промышленных регламентов и нормативных документов.

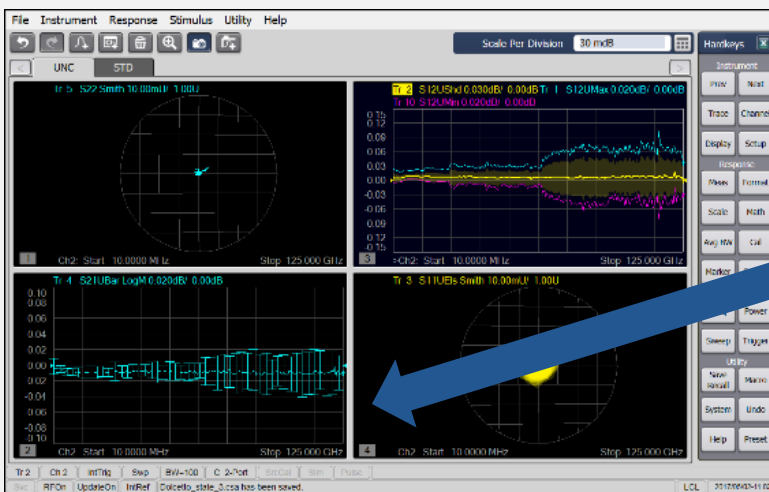


Рис. 4. Погрешность, вычисленная в реальном времени, при использовании соответствующего соединителя 1,00 мм

Полупроводниковая пластина

В то время как коаксиальные соединения широко используются в большинстве лабораторий, измерения на полупроводниковой пластине широко и успешно применяются в области разработки и измерения характеристик компонентов миллиметрового диапазона. Калибровочные меры для измерений на полупроводниковой пластине аналогичны используемым для коаксиальных интерфейсов (XX, K3 и нагрузка), но реализованы на подложке в виде эталона импеданса подложки (ISS).

Обычно на пластине выполняют калибровку SOLT (калибровка мерами K3, XX, «согласованная нагрузка» и «сквозное соединение»). Возможно, вы знакомы с одним из других поддерживаемых методов калибровки: SOLR (калибровка мерами K3, XX, «согласованная нагрузка» и «двунаправленная мера»), LRM («линия-отражение-согласование»), LRRM («линия-отражение-отражение-согласование»), и TRL («сквозное соединение-отражение-линия»)

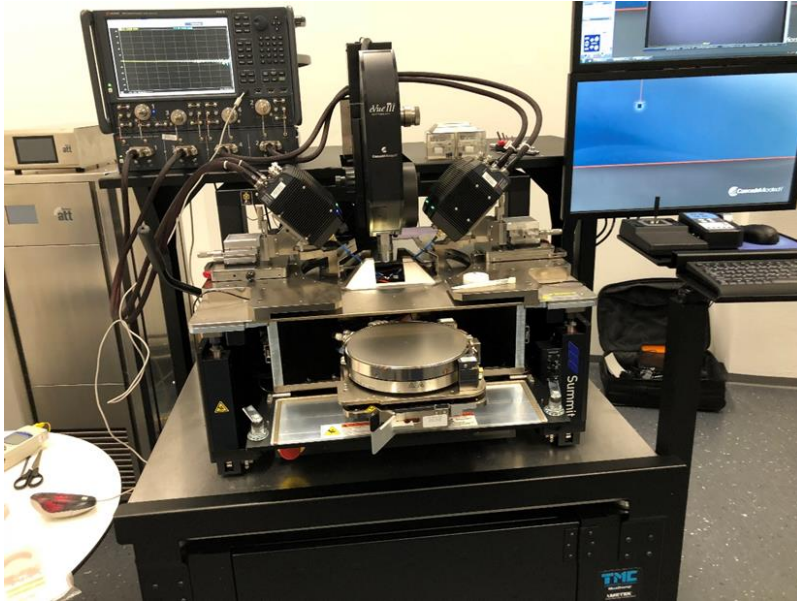


Рис. 5. Установка для измерений на полупроводниковой пластине

Независимо от используемого метода калибровки, при испытаниях на частотах выше 50 ГГц вы, скорее всего, будете использовать ISS. Для испытаний нужно будет уменьшить толщину ISS до 0,25 мм. Выполнив это, вы получите моды, управлять которыми трудно. Наличие таких мод может привести к появлению паразитной связи с землей. Моды высшего порядка нестабильны, поэтому их нельзя характеризовать и, следовательно, компенсировать. Если паразитная связь с землей создается при измерении отражения, то на частоте 50 ГГц появится значительное искажение.

В этом случае результаты измерений будут неправильными. Погрешность на рабочих частотах значительно увеличится. Для точной калибровки потребуются поглотитель. Поглотитель минимизирует генерацию мод высшего порядка в подложке, поэтому вы сможете выполнить более точные измерения.

Калибровка мощности

Приступая к испытаниям устройств миллиметрового диапазона, следует понимать, что для проверки приёмопередатчиков и преобразователей потребуется векторный анализатор цепей. Кроме того, вам необходимо точно определять мощность, подаваемую на испытываемое устройство. Например, если вы анализируете гармоники усилителя, то измерение мощности очень важно для понимания поведения усилителя.

Старая модель калибровки мощности

Раньше для калибровки мощности в миллиметровом диапазоне использовали множество измерителей мощности, чтобы охватить требуемый диапазон частот. В качестве измерителей мощности использовали широкополосные волноводные измерители, поскольку в коаксиальных линиях применялись только диодные измерители. Необходимость выполнения множества калибровок для охвата широкого диапазона частот (от 50 до 120 ГГц) затрудняла получение точных результатов измерений. При реализации метода могли появляться различные ошибки, поэтому его нельзя рассматривать как идеальное решение.

Новая модель калибровки мощности

Предложенный инновационный метод заключается в использовании технологии широкополосного измерителя мощности. Применение термопары упрощает калибровку мощности в широкой полосе частот. Использование только одного соединения исключает множество потенциальных составляющих погрешности, возникающих при подключении нескольких измерителей.

Измеритель мощности, в котором реализована эта новая технология, показан на рис. 6. Измеритель имеет соединитель 1,0 мм и работает в диапазоне частот от 0 до 120 ГГц. При выполнении калибровки для измерений мощности важно учитывать погрешность измерений, присущую используемому измерителю мощности, и оценивать её значимость.



Рис. 6. Измеритель мощности U8489A компании Keysight

Заключение

Выполнение точных и воспроизводимых измерений позволяет исключить ошибки при проектировании и соблюдать сроки сдачи проекта. Малые допуски в миллиметровом диапазоне приводят к необходимости применения новых и более точных методов калибровки. Ваш успех во многом зависит от понимания различий между методами калибровки в разных диапазонах частот. Важно обеспечить не только качество контрольно-измерительного оборудования, но и точность калибровки измерительной схемы. Правильная калибровка – важнейший фактор получения надёжной измерительной схемы.

Теперь, когда у вас достаточно информации о калибровке в миллиметровом диапазоне, ещё раз оцените измерительную схему, методы и средства калибровки. Узнайте больше об измерительных схемах и средствах калибровки в миллиметровом диапазоне компании Keysight:

- [Анализатор сигналов N9041B серии UXA](#)
- [Векторный анализатор цепей миллиметрового диапазона N5291A серии PNA, от 900 Гц до 120 ГГц](#)
- [Термопарный измеритель мощности с шиной USB U8489A, от 0 до 120 ГГц](#)

Дополнительная информация представлена на сайте www.keysight.com

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.

