

СОВМЕЩЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОВОДИМЫХ НА ПЛАСТИНЕ С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 110 ГГц

ВВЕДЕНИЕ

Описание устройств и подсистем для измерений на пластине представляет ряд трудностей. При моделировании таких устройств, как конденсаторы, катушки индуктивности и транзисторы,

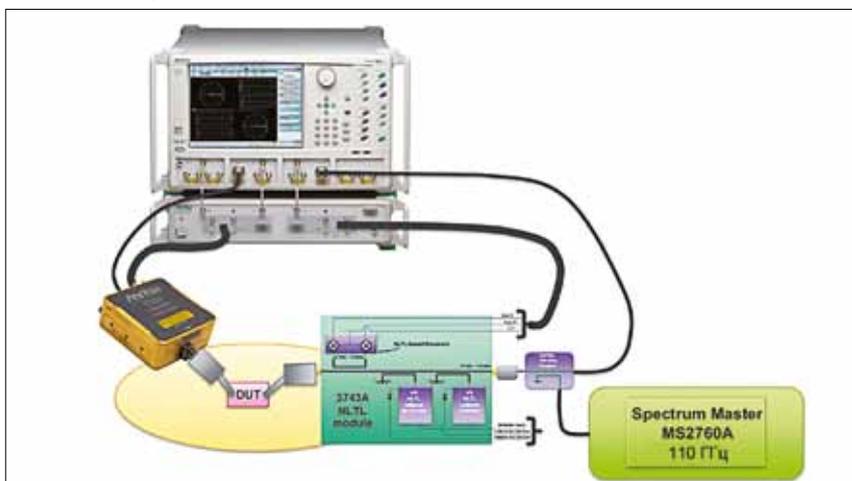
может понадобиться создание точных моделей для применения в симуляциях устройств. Точное моделирование требует проведения измерений с помощью сверхширокополосного векторного анализатора электрических цепей (ВАЦ).

При проектировании усилителя необходимо провести измерения ряда параметров: мощность насыщения, линейность, интермодуляционные искажения (IMD), гармоника, коэффициент усиления и их согласованность. Для таких подсистем как МММС нужно выполнить ряд тестов на соответствие требованиям. В любом случае, осуществление точных измерений является постоянной потребностью, и на частотах миллиметровых волн (mmWave) для достижения успеха важное значение имеют определенные факторы, которые следует учитывать при проведении общего анализа. Что касается испытательного оборудования, здесь особую роль играют следующие показатели: обеспечение общей точности измерений, возможность настройки системы изменением нескольких параметров с минимальной переконфигурацией и простота установки на зондовую станцию. В статье речь идет о том, как путем комбинации широкополосной системы VectorStar ME7838x, ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A и коаксиального прецизионного направленного ответвителя MN25110A W1 (110 ГГц) и ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A (рис. 1) решить поставленные задачи.

Настройка осуществляется за счет интеграции компактной нелинейной линии передачи (NLTL) 3743x широкополосного модуля миллиметрового диапазона mmWave и ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A с использованием одной и той же технологии (рис. 2). Такая уникальная комбинация может использоваться для проведения точных измерений S-параметров и спектрального анализа на пластине, что называется, в одно касание. Это означает, что оба параметра можно контролировать одновременно, тем самым значительно повышая качество проектирования тестируемого устройства (DUT), сокращая время тестирования и ускоряя вывод продукта на рынок.



▲ **Рис. 1.** Настройка широкополосной системы VectorStar ME7838x, коаксиального прецизионного направленного ответвителя MN25110A W1 (110 ГГц) и ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A для измерений на пластине



▲ **Рис. 2.** Блок-схема комбинированной настройки анализатора VNA и анализатора спектра с использованием системы VectorStar ME7838x, коаксиального прецизионного направленного ответвителя MN25110A W1 и ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A

ОБЩИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПОРТАТИВНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ НА ЗОНДОВЫХ СТАНЦИЯХ

Портативный анализатор спектра может работать независимо от анализатора VNA

Настройка и корректировка параметров анализатора спектра не требует изменений или переноса из меню VNA и дисплеев измерений. Благодаря ультрапортативному анализатору спектра Spectrum Master MS2760A, управляемому ноутбуком или ПК, все функции постоянно доступны для модификации конфигураций приемника и экранных окон.

Портативный анализатор спектра может быть установлен на позиционере зонда для обеспечения максимального динамического диапазона и стабильности измерений

Благодаря устройству Spectrum Master MS2760A, установленному рядом с модулем mmWave и ответвителем, короткий соединительный кабель длиной 8 см создает минимальные потери мощности. Чем короче кабель, тем меньшее влияние оказывают колебания температуры в лаборатории и, следовательно, тем меньше погрешности показаний в полосе спектра. Следует обратить внимание, что установка ответвителя не влияет на стабильность измерений S-параметра, поскольку дополнительные кабели между тестируемым устройством и приемниками VNA не требуются.

Портативный анализатор спектра можно использовать где бы то ни было без VNA

Ультрапортативный анализатор спектра Spectrum Master MS2760A можно легко и быстро отрегулировать в альтернативных установках, с минимальным влиянием на существующую настройку VNA — например, снять и использовать прибор без соединителя в другом месте. Таким образом, можно продолжать измерения S-параметров при помощи VNA без потери работоспособности.

Для выполнения анализа спектра в диапазоне 110 ГГц нет необходимости использовать VNA с программным обеспечением данной частоты

S-параметры DUT могут быть проанализированы на частоте 22 ГГц с помощью низкочастотного VNA при одновременном мониторинге 5-й гармоники посредством анализатора спектра 110 ГГц.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПЛАСТИНЕ

При измерениях на пластине существует ряд ключевых факторов, которые могут либо способствовать успеху, либо сделать анализ бесполезным из-за ненадежности результатов измерений.

- Спектральный анализ позволяет проводить, главным образом, относительные измерения. Но в некоторых ситуациях желательно получить абсолютные значения величин. В этих случаях с помощью измерителя мощности можно установить опорное напряжение, а затем уже снимать относительные показания. Следует учитывать, что точность спектрального анализа будет зависеть от линейности приемника анализатора спектра и уровня собственных шумов. В результате во время касания относительные измерения с использованием анализатора спектра могут быть выполнены с достаточной достоверностью.
- Анализаторы VNA также отличаются линейным характером приемников и могут быть откалиброваны по мощности на концах источника и приемника для дополнительного анализа (для измерения амплитудных искажений, интермодуляции, гармоник и шума). Сложность при измерениях с помощью VNA на пластине заключается в обеспечении качества и сохранности результатов калибровки, особенно на частотах

миллиметровых волн, где возможна проблема с воспроизводимостью показаний зонда. Калибровка VNA позволяет выявить и исправить системные ошибки, что дает возможность получить приемлемые погрешности измерений. При этом стабильность калибровки определяется повторяемостью результатов при соединениях (касаниях зонда), а также целостностью системных кабелей и постоянством температуры и других условий окружающей среды. Благодаря компактности модулей Anritsu NLT их можно напрямую подключать к датчикам, тем самым устраняя необходимость в кабелях в наиболее критической точке широкополосного измерения.

- Помимо этого, успех калибровки и измерений зависит от таких факторов, как окружающая подложка среда, количество слоев в подложке тестируемого устройства, близость структур к другим металлизированным слоям и применимость стандартов калибровки к среде тестируемого устройства. В свете роста частот эти дополнительные критерии становятся все более актуальными.

КАЛИБРОВКА VNA

Точность измерений S-параметра зависит от корректности калибровки VNA, которая может осуществляться различными методами. Выбор способа зависит от диапазона частот и используемой среды.

Наиболее серьезные ошибки и механизмы их возникновения (направленность, отслеживание отражения и передачи, согласование источника/нагрузки) выявляются и устраняются на основе общего подхода.

SOLT (короткое замыкание (Short) — разрыв (Open) — согласованная нагрузка (Load) — прямое соединение (Thru)) — это наиболее часто применяемый метод калибровки для подключенных систем VNA, работающих на частотах до 40 и 70 ГГц. SOLT позволяет использовать нагрузку для установления эффективной направленности системы и, таким образом, определения погрешностей измерения возвратных потерь. Некоторые калибровочные комплекты VNA не обеспечивают контакты с достаточной производительностью в диапазоне выше 40 ГГц. Для них требуется комбинация SOLT и коротких замыканий со смещением (SSST), чтобы достичь приемлемой калибровки с покрытием 70 ГГц. Калибровочные комплекты VectorStar дают высококачественные концевые контакты, что позволяет получить отличную калибровку способом SOLT в диапазоне до 70 ГГц с использованием V-образных разъемов.

Для измерений на пластине доступны калибровочные подложки стандартов SOLT, поддерживающие калибровку в диапазоне до 40 ГГц (а в некоторых случаях и до 70 ГГц). На частотах выше 40 ГГц производительность контактов и моделирование размыканий становятся более сложными. Когда измерения выходят за пределы 40 ГГц, следует рассмотреть альтернативы калибровкам посредством SOLT.

Обычно для измерений на пластине при частотах выше 40/70 ГГц и до 1 ТГц применяется резисторно-транзисторная логическая схема (TRL) и ее производные, такие как LRL, LRM и многострочная TRL (mTRL). Наличие сквозной линии позволяет определить волновое сопротивление, не полагаясь на нагрузку, — в этом и заключается преимущество семейства TRL. Однако установление воспроизводимых волновых свойств импеданса в значительной степени зависит от повторяемости соединения (т. е. от касаний зонда), поэтому человеческий фактор может оказать существенное влияние на определение погрешностей измерений.

Калибровочные подложки легко доступны для калибровки способом TRL на частотах до 110 ГГц и выше. Как правило, предпочтение отдается методу LRM (с использованием Line, Reflect, and Match — «линия, отражение и согласование»), поскольку он поддерживает частоты в диапазоне от постоянного тока до миллиметровой волны. Преимущество

LRM в том, что он не ограничен полосой пропускания, как в случае LRL, а нижнюю границу частот определяет дельта двух линий. Таким образом, если диапазон VNA изменяется от 70 кГц до 110 ГГц и выше (например, серия VectorStar ME7838x), потребуются длинные многострочные линии. Для поддержки самых низких частот длинные линии могут представлять большую ценность, особенно если стандарты cal распространяются на подложки тестируемого устройства, как это происходит сегодня в отрасли. При LRM-способе совпадение, по сути, предполагает бесконечно длинную линию и, таким образом, устанавливает низкочастотную калибровку. Существуют также расширенные версии LRM — ALARM и IRM, куда включены коэффициенты множественных отражений и стандартов для дополнительных улучшений при измерении хорошо согласованных устройств.

СТАБИЛЬНОСТЬ КАЛИБРОВКИ

После калибровки большинство систем VNA становится достаточно точным. В зависимости от качества калибровочной подложки обычно проводится калибровка характеристики направленности в диапазоне 30–40 дБ и согласование источника/нагрузки. При этом следует обратить особое внимание на факторы окружающей среды, оказывающие влияние на калибровку. Если система очень чувствительна к параметрам окружающей среды — колебаниям температуры и изгибу кабеля, ей потребуется постоянная повторная калибровка, что приведет к снижению производительности при измерениях.

Пожалуй, наибольшее влияние на стабильность калибровки оказывает исходная направленность, несмотря на то, что калибровка корректирует этот параметр. Например, в отличие от системы VectorStar, архитектурные ограничения в альтернативных широкополосных системах приводят к отрицательной исходной направленности в определенных диапазонах. Это означает, что сигнал ошибки направленности больше, чем измерительный сигнал. Следовательно, изменения окружающей среды и перемещение испытательного кабеля после калибровки с использованием систем с отрицательной исходной направленностью будут существенно влиять на калибровку, которую придется часто выполнять повторно.

СОВМЕЩЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ S-ПАРАМЕТРА И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Анализаторы VNA позволяют выполнять точные, откалиброванные, пропорциональные измерения S-параметра. Они также делают возможными различные ненормированные

измерения, такие как квазилинейные/нелинейные измерения амплитудных искажений, интермодуляционных искажений и гармоник. Эти дополнительные функции доступны благодаря калибровке мощности источника и приемников, а также программированию частоты приемника независимо от источника. На рис. 3 показан пример настройки системы VectorStar для измерения характеристик IMD-усилителя. Система VectorStar имеет опцию двойного источника с внутренними переключателями и объединителями, в том числе с программным обеспечением IMD для полной интеграции двухтональных измерений. Следует обратить внимание, что разделением тонов и мощностью тона можно управлять в режиме реального времени, отслеживая реакцию на дисплее. Поскольку система VectorStar способна осуществлять настройку частоты звуковых сигналов, компоненты интермодуляции могут быть рассчитаны, а приемник автоматически настроен на развертку и отображение интермодуляционных составляющих.

Прикладное программное обеспечение VectorStar IMDView предоставляет возможность отображать спектр, связанный с настройками IMD, при отслеживании интермодуляционных составляющих (обратите внимание на окно SpectrumView на рис. 3). Когда требуется большая управляемость при отображении спектра (например, расширение диапазона развертки, быстрая регулировка разрешения полосы пропускания, настройка маркеров поиска и т. д.), полезно иметь отдельный независимый анализатор спектра для одновременного мониторинга всего спектра или его части при выполнении измерений VNA. Включение устройства Spectrum Master MS2760A в систему измерений — это оптимальное решение, которое позволяет осуществлять полностью независимое отображение спектра, обеспечивая при этом обособленное управление VNA и анализатором спектра для оптимизации измерений.

Важным аспектом измерительной установки, особенно на частотах миллиметровых волн до 110 ГГц, становится сведение к минимуму или полное исключение тестовых кабелей. Объединение широкополосной системы VectorStar ME7838x с анализатором спектра Spectrum Master MS2760A позволяет комбинировать два ключевых элемента измерения рядом с DUT. Это дает возможность достичь наилучших результатов измерений, сохраняя оптимальный динамический диапазон и сокращая длину кабелей для улучшения стабильности. Компактный размер устройства Spectrum Master MS2760A позволяет устанавливать его рядом с VectorStar 3743x mmWave-модулем с использованием коаксиального прецизионного направленного ответвителя Anritsu MN25110A 110 ГГц W1. Сквозной канал модуля NLTL mmWave и ответвителя служит каналом постоянного тока от DUT к системе VectorStar для измерений в нижнем диапазоне частот (70 кГц — 30 ГГц), в то время как соединенный порт ответвителя становится каналом для частот 20–110 ГГц для анализатора спектра Spectrum Master MS2760A. Сигналы частотой выше 30 ГГц преобразуются в модуле mmWave с понижением до IF-частот и передаются в VNA для анализа. В результате возможно выполнение одновременных измерений, осуществляемых VNA и анализатором спектра в диапазоне до 110 ГГц.

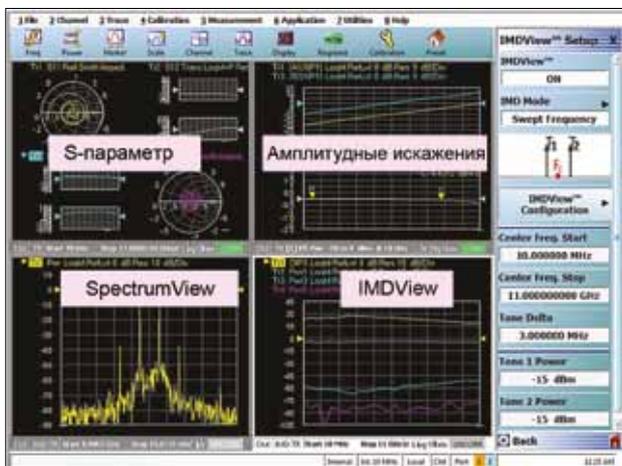
КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ

Комплект состоит из следующих элементов:

Широкополосная система VectorStar MS7838x

Может быть использована при любой из широкополосных систем VectorStar, включая системы ME7838A 110 ГГц и ME7838D 145 ГГц.

Прецизионный направленный ответвитель MN25110A 110 ГГц W1



▲ **Рис. 3.** Система Vector Star в сочетании с прикладным программным обеспечением Imovie обеспечивает отображение S-параметров, амплитудного искажения, спектра и интермодуляционных составляющих при настройке на двухтональные измерения IMD

Новый соединитель Anritsu 1.0 мм 110 ГГц имеет номинальный коэффициент связи 10 дБ и может использоваться при частотах значительно ниже 20 ГГц в зависимости от допустимых потерь на связь.

Ультрапортативный анализатор спектра Spectrum Master MS2760A

Этот легкий и компактный анализатор оптимален для установки на позиционер зондовой станции при минимальной длине кабеля, обеспечивает максимальные динамический диапазон и стабильность.

Кронштейн SC8537 в сборе

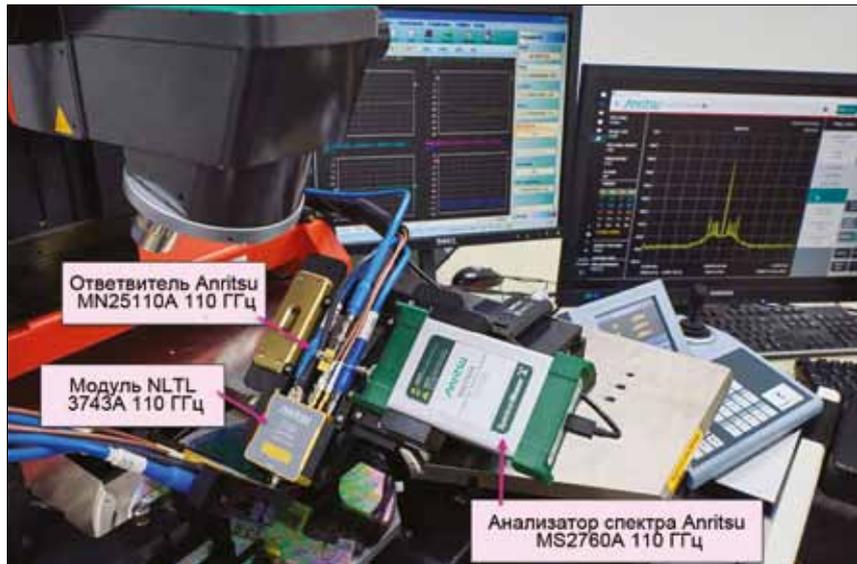
Хотя это и не обязательно, данный комплект включает монтажный кронштейн, кабель и соединитель для облегчения установки модуля 3743A NLTЛ и анализатора спектра Spectrum Master.

На рис. 4 показано, как ультрапортативный анализатор спектра Spectrum Master MS2760A может быть установлен рядом с модулем mmWave и DUT, тем самым устраняя потребность в длинных кабелях тестового порта. Модули Anritsu NLTЛ mmWave подключаются непосредственно к датчикам без кабелей для обеспечения максимального динамического диапазона, а также повышения стабильности калибровки и измерений.

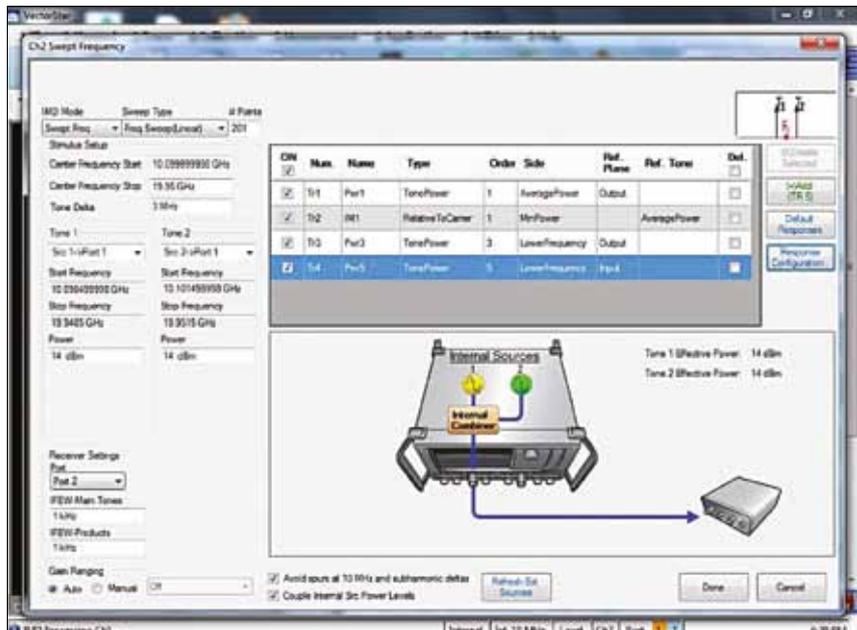
Пример. Настройка двухтонального измерения IMD с центром на частоте 20 ГГц при одновременном мониторинге до 5-й гармоники.

VectorStar IMDView (опция 44) предлагает широкий спектр настроек конфигурации для анализа IMD. Два тона могут быть установлены для определенного разделения (в данном случае 3 МГц) и измерения CW (незатухающих колебаний) при мониторинге в SpectrumView или при развертке тонов в диапазоне частот. На рис. 5 показано, как тональные сигналы могут быть запрограммированы для отображения различных параметров — таких как мощность тона, интермодуляционные составляющие до 9-го порядка, усиление тона и т. д. Следует обратить внимание на то, что с установленным внутренним объединителем VectorStar (опция 32) внутренний объединитель и переключатель можно использовать для автоматического переключения между дисплеями линейных и амплитудных искажений, мониторинга спектра и развертки IMD (рис. 3) без повторного подключения.

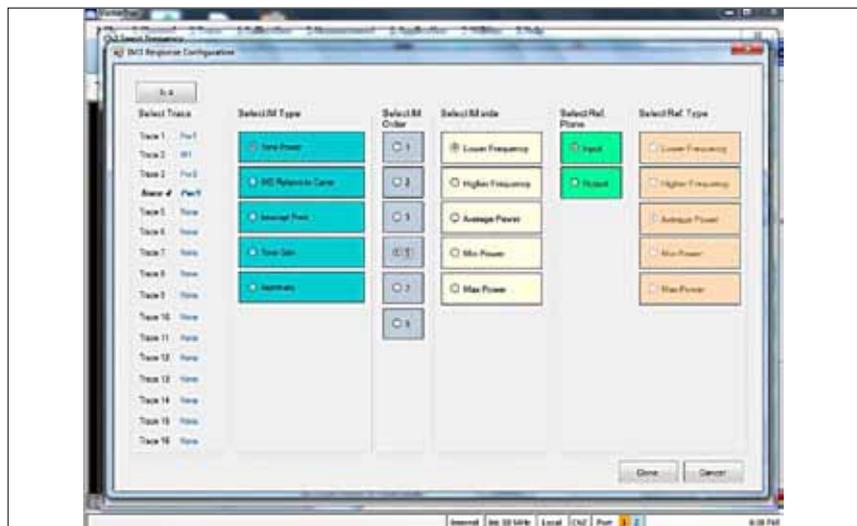
Панель конфигурации IMDView предназначена для настройки отображения трассировки, конфигурации IMD и других системных параметров. Дополнительные конфигурации трассировки возможны при использовании панели Response Configuration (конфигурация ответа) (рис. 6). Панель Response Configuration обеспечивает индивидуальную настройку каждой трассы для



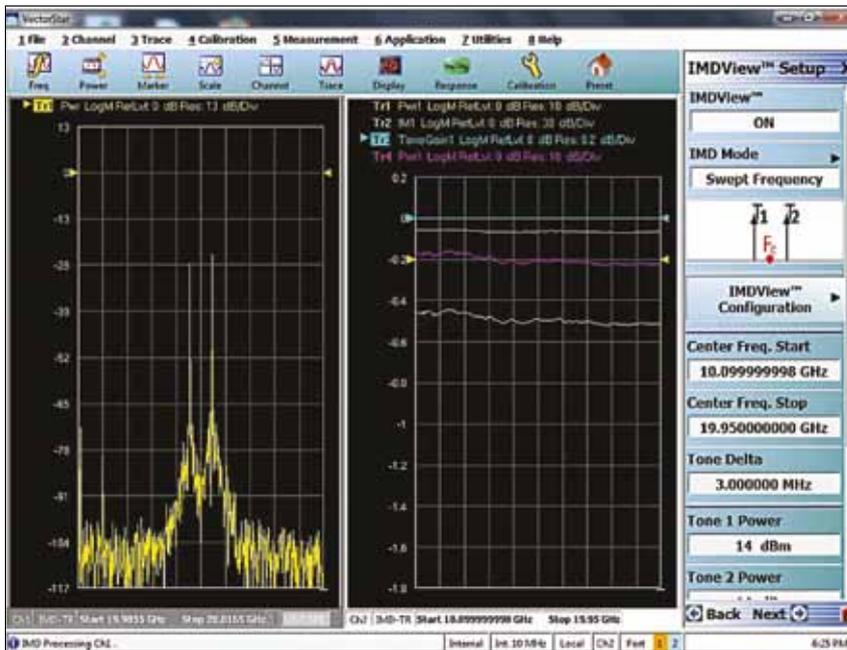
▲ Рис. 4. Объединение широкополосной системы VectorStar ME7838x, коаксиального прецизионного направленного ответвителя MN25110A W1 (110 ГГц) и ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A с минимальным количеством кабелей



▲ Рис. 5. Панель конфигурации IMDView. Используется для настройки источника при внутренней или внешней комбинации диапазона частот развертки, разделения тонов и выбора отображения трассировки



▲ Рис. 6. Панель IMD Response Configuration



▲ **Рис. 7.** Конфигурация каналов VectorStar для отображения спектрального представления двухтонального сигнала плюс отображение частоты развертки импульсов интермодуляционных составляющих



▲ **Рис. 8.** Дисплей анализатора спектра Spectrum Master MS2760A предоставляет возможность мониторить низкочастотные резонансы, отслеживая до 5-й гармоники двухтонального измерения IMD с частотой 20 ГГц

отображения мощности тона IM, точки перехвата, усиления тона и даже асимметрии тона.

После конфигурации измерения IMD может быть проведена настройка многоканальной системы VectorStar для отображения различных режимов измерения в каждом канале. На рис. 7 показано, как один канал может быть настроен на отображение спектра двухтонального сигнала, в то время как второй канал будет показывать развертки интермодуляционных тонов в представляющей интерес полосе. Также могут быть настроены каналы для отображения дополнительных параметров — S-параметров, развертки мощности для анализа амплитудных искажений, измерения гармоник и т. д.

В дополнение к тем возможностям, которые предоставляет система многоканального отображения VectorStar, может оказаться полезным отслеживать отклик

спектра в целом. Например, бывают случаи, когда тестируемое устройство имеет низкочастотные резонансы при различных условиях эксплуатации. Одним из преимуществ системы VectorStar на нижней границе частот порядка 70 кГц является возможность проверки резонансов устройства в области постоянного тока. Хотя эти резонансы могут проявляться при низкой частоте развертки, пропорциональной развертке

S-параметра, полезным будет контроль нижней границы частот с использованием анализатора спектра. Если анализатор спектра широкополосный, его можно одновременно применить и для анализа поведения гармоник.

При использовании широкополосного ответвителя для одновременного анализа нижнюю границу частот будет определять спад на подключенном порте. На рис. 8 показано, как ультрапортативный анализатор спектра Spectrum Master MS2760A с направленным ответвителем MN25110A W1 может использоваться для сканирования спектра DUT в диапазоне 300 МГц — 110 ГГц, отслеживая резонансы на нижней границе частот и гармонические характеристики, в то время как система VectorStar отображает нелинейный отклик устройства.

ВЫВОДЫ

Выполнение измерений на пластине предполагает решение уникального набора задач: тщательной разработки установки, калибровки и конфигурации измерений. При проведении общего анализа зачастую необходимо учитывать целый ряд факторов. В данной статье описывается, как можно одновременно осуществлять контроль S-параметров и анализ спектра в диапазоне 70 кГц — 110 ГГц с помощью комбинации широкополосной системы VectorStar ME7838A, ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A и коаксиального прецизионного направленного ответвителя Anritsu MN25110A W1. Настройка осуществляется интеграцией компактной нелинейной линии передачи (NLTL) широкополосного модуля mmWave и ультрапортативного анализатора спектра Spectrum Master MS2760A с использованием все той же NLTL-технологии. Такая уникальная комбинация может быть использована для проведения точных измерений S-параметров и спектрального анализа на пластине при одном касании. Осуществление подобных измерений за одно касание приводит к значительному сокращению времени тестирования без ущерба для точности измерений, способствуя успешному выполнению первого этапа проектирования и уменьшая сроки выхода продукта на рынок. ●

КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА



Сергей Шихов,
директор по управлению проектами в А-КОНТРАКТ

Использование векторного анализатора и анализатора спектра в единой измерительной установке позволяет существенно сократить временные издержки и добиться более точных результатов измерений. Вопрос выбора конкретной методики, тем не менее, остается за разработчиком устройства.