

# Преимущества распределённой архитектуры при анализе цепей миллиметрового диапазона

## Keysight Technologies

Практически во всех областях применения миллиметровых волн возникают уникальные задачи, связанные с испытаниями устройств. Источники ошибок, такие как потери в кабелях, рассогласование соединений и фазовые сдвиги, которыми можно пренебречь на нижних частотных диапазонах, становятся значимыми на более высоких частотах. Высокопроизводительные векторные анализаторы цепей обычно работают с частотами до 67 ГГц, поэтому для многих приложений требуется тестирование за пределами возможностей контрольно-измерительного оборудования. Для решения этой проблемы существуют способы расширения частотного диапазона векторных анализаторов цепей.

### ВВЕДЕНИЕ

Для глобального взаимодействия требуется передавать всё больше информации с большей скоростью, что стимулирует инженеров к переходу в миллиметровый диапазон (30–300 ГГц), что соответствует длинам волн от 1 до 10 мм. Скорость передачи информации в СВЧ-диапазоне достигает 1 Гбит/с, в то время как в мм-диапазоне – 10 Гбит/с и выше. Это предоставляет новые возможности для научных исследований и разработок для потребительского рынка.

Одна из самых важных областей применения технологии миллиметровых волн – системы беспроводной связи 5-го поколения 5G. В настоящее время всё большее число устройств работают с данными в ограниченных диапазонах сотовой связи 6 ГГц или ниже.

Технология 5G нацелена на использование преимуществ мм-диапазона для обслуживания растущего числа устройств интернета вещей (IoT). Это можно сделать, например, заменив большие централизованные мачты сотовой связи на более мелкие точки доступа, называемые «сотами». Мачта может поддерживать ограниченное число устройств, поэтому увеличение числа точек доступа обеспечит разгрузку сотовых сетей.

Другая потенциальная область использования мм-диапазона – поддержка технологии WiGig.

Альянс гигабитной беспроводной связи (WiGig) работает над тем, чтобы увеличить скорость передачи данных устройств Wi-Fi на несколько Гбит/с за счёт использования диапазона частот

60 ГГц. Устройства WiGig работают в стандартных диапазонах частот 2,4 и 5 ГГц, а также в дополнительном диапазоне 60 ГГц для взаимодействия с соседними устройствами WiGig. В диапазоне 60 ГГц данные передаются со скоростью до 7 Гбит/с за счёт формирования сфокусированных лучей, не влияющих друг на друга.

Кроме того, технология миллиметровых волн обеспечивает небольшое время задержки. Это очень важно для автомобильных радаров, в работе которых имеют значение доли секунд. Контроль полосы движения, адаптивный круиз-контроль и многие другие функции зависят от точности ВЧ-радаров. Как правило, эти радары работают в диапазоне 24 ГГц, но к 2022 году они будут сняты с производства и заменены на приборы с диапазоном частот 77–81 ГГц. Радары с широкой полосой частот и малой длиной волны обеспечивают более высокие разрешение и точность, чем работающие на более низких частотах. Эта точность имеет решающее значение, поскольку автомобили становятся всё более автономными.

Миллиметровые волны также широко используются в аэрокосмической и оборонной отраслях промышленности. Системы формирования изображений объектов мм-диапазона, используемые для досмотра пассажиров в аэропорту, работают на частотах от 35 до 325 ГГц. Более высокие частоты и более широкие полосы пропускания используются в целях увеличения разрешения изображений для обнаружения потенциальных угроз. Полосы частот защищённой радиосвязи перемещаются из

перегруженных нижних диапазонов частот в мм-диапазон.

### Анализ цепей в миллиметровом диапазоне: распределённая архитектура

Компания Keysight использовала свой многолетний опыт производства измерительной техники при создании расширителя частотного диапазона для анализаторов цепей.

Измерительное решение для анализа миллиметровых цепей представляет собой распределённую систему, имеющую в своём составе векторный анализатор цепей (VNA), измерительный контроллер и блоки расширения частотного диапазона.

Распределённая система состоит из отдельных компонентов, которые обмениваются данными и работают как единое целое. Блоки расширения частотного диапазона взаимодействуют с исследуемым устройством и являются единственной частью системы, работающей в КВЧ-диапазоне. Это позволяет тестировать устройства данного диапазона без необходимости полной модернизации векторных анализаторов цепей для работы на более высоких частотах.

Каждая часть распределённой конфигурации имеет преимущества при измерениях. В следующем разделе будет показано, что небольшие модули расширения частотного диапазона позволяют минимизировать влияние потерь в кабелях на результаты измерений. Измерительный контроллер N5292A включён между векторным анализатором цепей и модулями расширения частотного диапазона. В его состав входят коммутаторы и усилители, с помощью которых векторный анализатор цепей выполняет непрерывные свипирования во всём интересующем диапазоне частот, что без использования контроллера было бы невозможно.

Решение Keysight с распределённой архитектурой основано на применении блока расширения частотного диапазона N5295AX03, который можно подключить к имеющемуся совместимому векторному анализатору цепей (серии PNA



Рис. 1. Потери в кабеле

или PNA-X с максимальной частотой 26,5 ГГц или выше), уменьшив затраты на тестирование за счёт модернизации анализатора вместо его замены.

Блоки расширения частотного диапазона соединяются с измерительным контроллером N5292A, который взаимодействует с измерительными портами векторного анализатора цепей. При этом новая максимальная частота векторного анализатора достигнет 120 ГГц, и его можно будет использовать для тестирования современных устройств мм-диапазона.

### Предотвращение ошибок при измерениях в миллиметровом диапазоне

Распределённая система решает проблемы, появляющиеся при измерениях на высоких частотах. К ним относятся, в первую очередь, потери в кабелях и температурная стабильность.

#### Потери в кабеле

На рисунке 1 показана зависимость потерь в кабеле от частоты. Потери в кабеле в мм-диапазоне могут оказать существенное влияние на результаты измерений. Даже при использовании хорошего кабеля с потерями от 1,1 до 1,5 дБ при длине 8 см на частоте 110 ГГц и выше измерения с помощью кабелей длиной 0,5 м приведут к потерям 9 дБ между исследуемым устройством и прибором. В связи с этим важно разместить исследуемое устройство как можно ближе к прибору, используя кабель минимальной длины. Внешние блоки расширения частотного диапазона могут быть расположены намного ближе к устройствам, чем векторный анализатор цепей и его измерительные порты, что позволяет уменьшить потери в кабелях на несколько дБ.

Более короткие кабели в меньшей степени подвержены перемещениям и обе-

спечивают большую стабильность фазы. На длине волны 2,7 мм перемещение кабеля в плоскости измерения всего на 1,35 мм приводит к фазовому сдвигу 180°.

#### Температурная стабильность

Температурная стабильность важна для систем, работающих в течение многих часов. При повышении температуры число носителей заряда увеличивается, что приводит к появлению теплового шума. Мощность теплового шума в дБ определяется по следующей формуле:

$$P_{dBm} = 10 \log_{10}(k \times T \times B \times 1000),$$

где  $k$  – постоянная Больцмана в Дж/К,  $T$  – температура в градусах Кельвина и  $B$  – полоса измерения в Гц. Из этого уравнения видно, что мощность теплового шума увеличивается при повышении температуры. При измерениях в условиях повышения температуры тепловой шум и тепловое расширение кабельных разъемов приводят к появлению погрешностей, обусловленных дрейфом. Эти погрешности связаны с изменениями в системе после калибровки.

На рисунке 2 показаны результаты однопортовых измерений согласования, выполненных двумя системами, работавшими в течение 8 ч. Система для анализа цепей миллиметрового диапазона N5291A (результаты измерений показаны синим цветом) содержит модули расширения частотного диапазона N529AX03. Другая система, результаты измерений которой показаны красным цветом, основана на другом решении расширения частотного диапазона. Блоки N529AX03 обеспечивают намного меньший дрейф, особенно на высоких частотах. Основным критерием обеспечения малого дрейфа является автоматическая регулировка температуры внутри модулей.



Рис. 2. Влияние дрейфа на результаты измерений после калибровки

Блок N5295AX03 разработан с учётом этой необходимости. Размеры блоков достаточно малы, чтобы их можно было размещать близко к исследуемому устройству, но при этом не настолько малы, чтобы им требовался дополнительный контроль температуры. В процессе измерений конвекционное охлаждение поддерживает одинаковую температуру блоков, чтобы минимизировать дрейф. В течение 24-часового периода изменение амплитуды сигналов модулей расширения частотного диапазона составляет менее 0,015 дБ, а фазы – менее 0,15°. Это сопоставимо со стабильностью полнофункционального СВЧ-анализатора цепей серии PNA-X.

Распределённая архитектура системы позволяет приблизить измерительный прибор к исследуемому устройству, чтобы минимизировать потери в кабелях, фазовые ошибки и температурный дрейф. Эти преимущества дают возможность выполнять точные и полностью отслеживаемые измерения.

#### Реализация системы

На рисунке 3а представлена структурная схема высокого уровня измерительной системы мм-диапазона. На рисунке 3б показано, как может выглядеть эта система в готовом к работе состоянии.

Рассмотрим каждый блок подробнее.

#### Векторный анализатор цепей

В рассматриваемой системе векторный анализатор цепей выполняет функции измерения и вычисления. Универсальный векторный анализатор цепей предназначен для тестирования монолитных ИС СВЧ-диапазона, которые содержат множество компонентов, работающих в разных диапазонах частот. Архитектура векторного анализатора цепей серии PNA-X

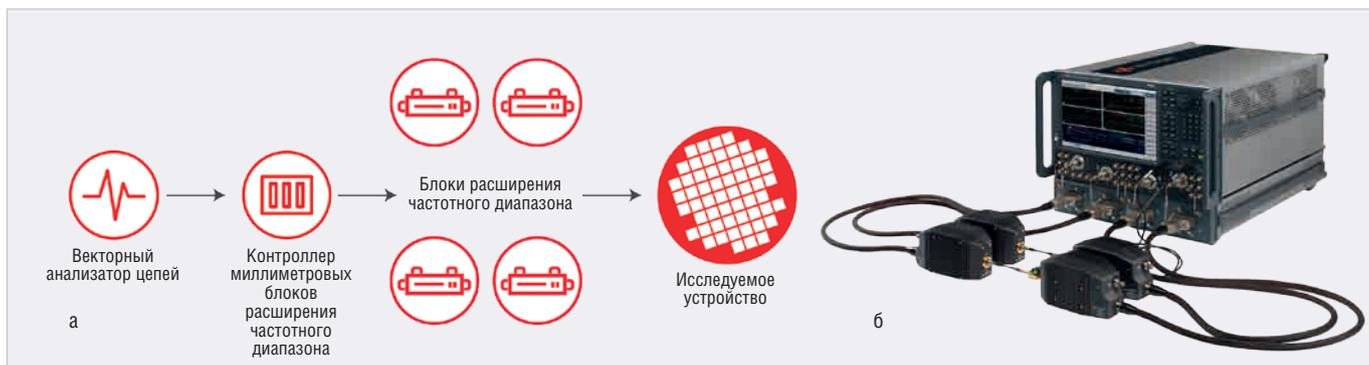


Рис. 3. Система векторного анализатора цепей мм-диапазона: а) структурная схема; б) внешний вид



Рис. 4. Выполнение нескольких измерений векторным анализатором серии PNA-X за одно подключение

для выполнения целого ряда измерений за одно подключение позволяет измерять S-параметры, коэффициент шума, компрессию усиления, коэффициент нелинейных искажений, интермодуляционные искажения и анализировать спектр за одно соединение (см. рис. 4).

Блоки N5295AX03 совместимы с анализаторами цепей серий PNA и PNA-X, которые работают в диапазоне частот, требуемом для управления блоками N5295AX03 и измерения выходных сигналов.

Анализаторы совместимы с оснасткой, необходимой для подключения к блокам N5295AX03.

**Блоки расширения частотного диапазона**

Блоки расширения частотного диапазона выполняют перенос частоты сигнала 26,5 ГГц измерительных портов анализатора цепей для подачи на входы исследуемых устройств мм-диапазона. На структурной схеме блока расширения частотного диапазона N5295AX03 (см. рис. 5) показан принцип переноса частоты. В схеме используются 3 каскада умножения частоты, преобразующие частоту входного ВЧ-сигнала до 120 ГГц. Эта частота лежит в миллиметровом диапазоне, что позволяет измерять характеристики самых современных мм-устройств.

На активные устройства, такие как транзисторы и усилители, необходимо подавать напряжение смещения. Тройник смещения объединяет сигналы постоянного и переменного тока так, чтобы одновременно подавать питание на активные устройства и тестировать их. На рисунке 6 показана упрощённая эквивалентная схема тройника смеще-

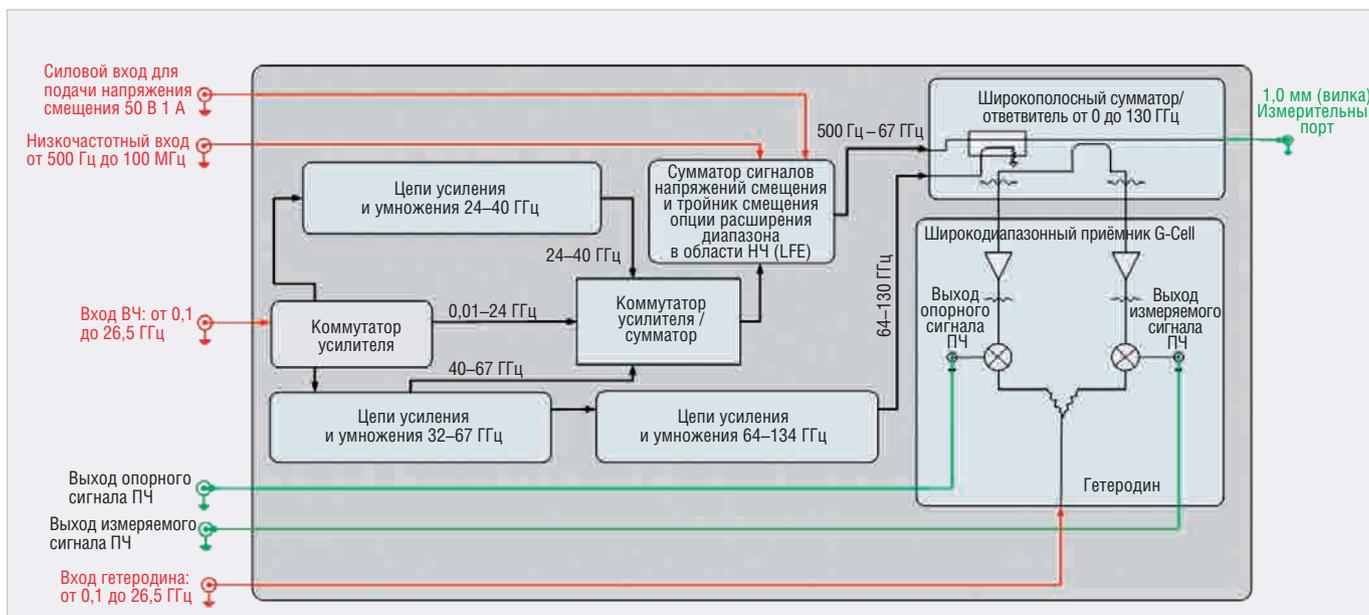


Рис. 5. Структурная схема блока расширения частотного диапазона N5295AX03

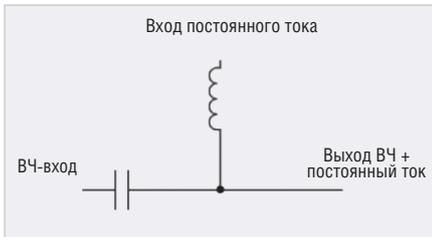


Рис. 6. Эквивалентная схема тройника смещения

ния. Катушка индуктивности и конденсатор предотвращают взаимодействие источника постоянного тока и источника ВЧ-сигнала. Блоки расширения частотного диапазона N5295AX03 имеют встроенную схему смещения для обеспечения минимального расстояния до тестируемого устройства. Это позволит минимизировать длинные паразитные контуры. Земляные петли, появляющиеся при наличии более одного пути протекания тока на землю, могут создавать нежелательные помехи, особенно если длина контура велика. Тройник смещения обеспечивает подключение «земли» как можно ближе к исследуемому устройству, чтобы минимизировать помехи.

Выход модуля расширения частотного диапазона соединён через широкополосный направленный ответвитель с интерфейсом 1 мм. Высокая направленность ответвителя обеспечивает хорошую развязку сигналов, передаваемых в противоположных направлениях: опорного сигнала, подаваемого на исследуемое устройство, и измеряемого сигнала, поступающего от этого устройства. Опорный и измеряемый сигналы дискретизируются широкополосным смесителем Гилберта. Смесители Гилберта подавляют нежелательные продукты смещения, чтобы получить максимально чистый выходной сигнал. Смеситель преобразует опорный и измеряемый сигналы в сигналы ПЧ, чтобы анализатор цепей мог выполнить их анализ.

**Измерительный контроллер**

Измерительный контроллер (см. рис. 7) включён между векторным анализатором цепей и блоками расширения частотного диапазона. С помощью контроллера можно выполнять широкополосное свипирование во всём частотном диапазоне модулей расширения. Без контроллера векторный анализатор цепей выполняет измерения только в отдельных полосах частот. Измерения во всей полосе частот в таком случае достигаются её делением путём последовательного свипирования частей. Такие измерения полезны



Рис. 7. Измерительный контроллер N5292A

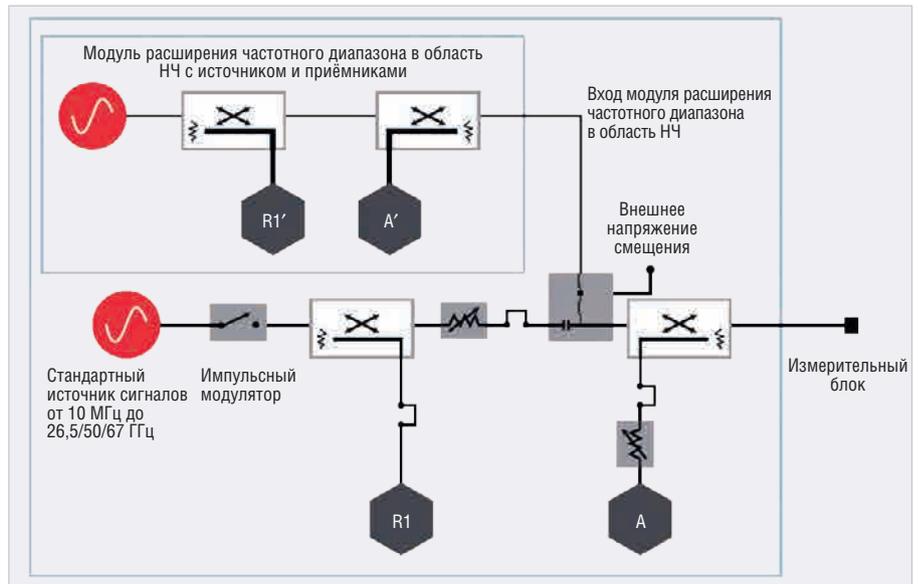


Рис. 8. Реализация расширения частотного диапазона в область низких частот

для просмотра характеристик исследуемого устройства на конкретных частотах, но широкополосное свипирование предпочтительнее, если требуется полная характеристика устройства.

Измерительный контроллер усиливает сигнал гетеродина (LO) анализатора цепей для управления смесителями блоков расширения во всём частотном диапазоне. Контроллер также корректирует ошибки и выходной сигнал блока расширения частотного диапазона так, чтобы его частота была равна ПЧ векторного анализатора цепей. Контроллер упрощает схему измерений за счёт подачи сигналов ВЧ, гетеродина и ПЧ по одному кабелю. Это позволяет проводить измерения с использованием портов векторного анализатора цепей без необходимости изменения технической конфигурации устройства.

**Расширение частотного диапазона в область низких частот**

Минимальная частота, поддерживаемая анализаторами цепей серий PNA и PNA-X, равна 10 МГц. Для получения более низких частот предлагается использовать расширение частотного диапазона в область низких частот (LFE), в частно-

сти опцию 205/425 для векторного анализатора цепей Keysight, обеспечивающую минимальную частоту до 900 Гц. Как показано на рисунке 8, для расширения частотного диапазона в область низких частот потребуются отдельные источник и приёмник, разработанные для низких частот.

Тестирование на низких частотах позволяет точнее моделировать устройство за счёт более полного определения его характеристик. Блок расширения частотного диапазона имеет вход для LFE, чтобы получить результирующий диапазон частот от 900 Гц до 120 ГГц.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Увеличение числа возможных приложений миллиметрового диапазона требует систем, измеряющих характеристики устройств этого диапазона с высокой точностью.

Распределённая архитектура Keysight позволяет использовать векторные анализаторы цепей для следования этой тенденции – проведения точных и воспроизводимых измерений на частотах до 120 ГГц.

Материал подготовил  
Павел Байбаков