

# Методы измерения S-параметров высокоскоростных разъемов с использованием векторных анализаторов цепей

А. Крылов<sup>1</sup>, Ф. Крекотень<sup>2</sup>, А. Панков<sup>2</sup>

УДК 621.317 | ВАК 2.2.4

Рассматриваются методики измерений радиочастотных параметров разъемов, используемых в составе объединительных плат (backplane) с использованием векторных анализаторов цепей (ВАЦ). Представлены результаты измерений высокоскоростных разъемов, полученные с использованием охарактеризованного SOLR комплекта калибровочных мер и программного обеспечения исключения измерительной оснастки (AFR).

**В**озрастание скорости передачи цифровых сигналов и необходимость использования высокочастотных аналоговых сигналов требует использования новых подходов к разработке тестеров микросхем. Высокоскоростные объединительные платы являются критическим компонентом физического уровня, поэтому проектирование, сборка и определение параметров объединительных плат становится сложной задачей, включающей определение радиочастотных параметров разъемов, используемых в качестве внутрисхемных соединителей. Неоднородность импеданса в плоскости контактных площадок разъемов приводят к уменьшению согласования и возрастанию затухания передаваемого сигнала, приводя к снижению пропускной способности каналов передачи данных объединительной платы.

В связи с этим актуальными задачами являются поиск и отработка оптимальных методик измерений амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик высокоскоростных разъемов.

Современные ВАЦ производства ООО «ПЛАНАР» в сочетании с функциональными возможностями, позволяющими проводить измерение параметров компонентов, не имеющих коаксиальных соединителей, являются эффективным средством для решения поставленных задач.

В рамках публикации рассматриваются два метода измерений параметров высокоскоростных разъемов:

- с использованием набора калибровочных микрополосковых мер типа SOLR («короткое замыкание – холостой ход – согласованная нагрузка – неизвестная перемычка»), параметры которых

определены с использованием **техник преобразования** (time domain transform) и **фильтрации во временной области** (time gating), а также **функции удлинения порта** (port extension), доступных в ВАЦ;

- с использованием программного обеспечения для исключения измерительной оснастки AFR (Automatic Fixture Removal), предназначенного для определения параметров оснастки и смещения плоскости калибровки ВАЦ к контактам измеряемого компонента [1].

## КАЛИБРОВОЧНАЯ ПЛАТА

Калибровочная плата, произведенная компанией ООО «Совтест Микро» и используемая для апробирования рассматриваемых методов измерений, представлена на рис. 1. На плате изготовлены меры КЗ, ХХ, СН и мера коэффициента передачи (КП).

Каждая из мер коэффициента отражения включает коаксиальный соединитель, отрезок микрополосковой линии, необходимый для смещения плоскости калибровки ВАЦ в плоскость включения измеряемого разъема, и переходное отверстие.

**Мера СН (LOAD)** выполнена с использованием SMD-резистора с номиналом 50 Ом, замкнутого на землю на выходе переходного отверстия с обратной стороны калибровочной платы.

**Мера КЗ (SHORT)** выполнена путем замыкания на землю центрального проводника на выходе переходного отверстия с обратной стороны калибровочной платы.

**Мера ХХ (OPEN)** выполнена в виде незамкнутого центрального проводника на выходе переходного отверстия с обратной стороны калибровочной платы.

**Мера КП (THROUGH)** выполнена в виде линии передачи и пары переходных отверстий.

<sup>1</sup> ООО «Планар-Проект», Москва, Россия.

<sup>2</sup> ООО «Совтест Микро», Зеленоград, Россия

### ИЗМЕРЯЕМОЕ УСТРОЙСТВО

В качестве измеряемого устройства использовалось сочленение пары соединителей высокой плотности (High-Density Open-Pin-Field Array) – вилки и розетки. Для подключения разъемов к коаксиальному тракту использовались измерительные оснастки производства ООО «Совтест Микро». Материал печатной платы, проводников, длина микрополосковых линий и типы коаксиальных соединителей соответствуют калибровочной плате.

Измеряемые разъемы и измерительная оснастка представлены на рис. 2 и 3.

### ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

Как калибровочная, так и измерительная оснастки представляют собой устройства на основе печатных плат. Печатные платы этих устройств выполнены в составе единой панели с последующим разделением с использованием одной и той же конструкции слоев – стека печатной платы, что позволяет минимизировать разброс допусков на параметры используемых материалов, толщин финишных покрытий, параметров травления геометрии проводников и прочих технологических величин. Печатные платы состоят из четырех проводящих слоев, стек показан на рис. 4.

Измерительные каналы выполнены в виде копланарных микрополосковых линий на внешнем слое «Тор», материал проводников – медь. Проводники окружены сплошным проводником возвратной цепи, вдоль краев полигона с шагом 1,5 мм расставлены массивы переходных отверстий, которые соединяют внешние и внутренние слои земли и помогают экранировать измерительные каналы друг от друга.

В качестве диэлектрика между линией передачи и смежным опорным слоем использован материал Ro4350B – ему характерны

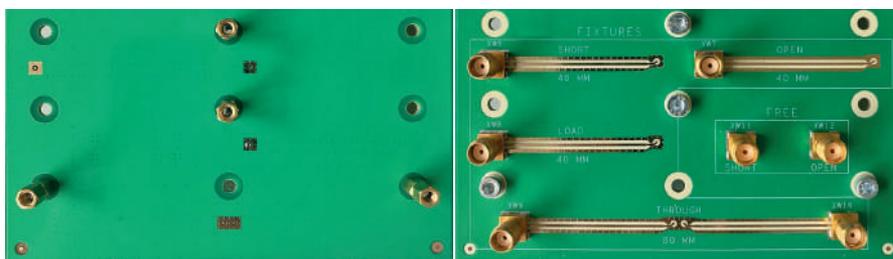


Рис. 1. Калибровочная плата производства ООО «Совтест Микро»



Рис. 2. Измерительная оснастка ООО «Совтест Микро», вид сверху. Слева: плата соединителя вилка. Справа: плата соединителя розетка

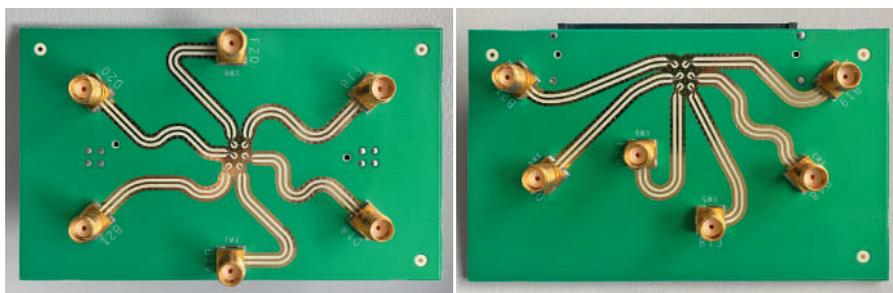


Рис. 3. Измерительная оснастка ООО «Совтест Микро», вид снизу. Слева: плата соединителя вилка. Справа: плата соединителя розетка

Top Overlay	Overlay				
Top Solder	PSR4000	Solder Mask	0.015mm	3.9	0.03
Top Surface Finish	Nickel, Gold	Surface Finish	0.004mm		
1 Top Layer	Copper	Signal	0.04mm		
Dielectric 1	Ro4350B	Core	0.254mm	3.66	0.003
2 Int1 (GND)	Copper	Plane	0.035mm		
Dielectric 2	FR4	Prepreg	1.5mm	4.5	0.015
3 Int2 (GND)	Copper	Plane	0.035mm		
Dielectric 3	FR4	Core	0.254mm	4.35	0.015
4 Bottom Layer	Copper	Signal	0.04mm		
Bottom Surface Finish	Nickel, Gold	Surface Finish	0.004mm		
Bottom Solder	PSR4000	Solder Mask	0.0154mm	3.9	0.03
Bottom Overlay		Overlay			

Рис. 4. Конструкция слоев печатной платы

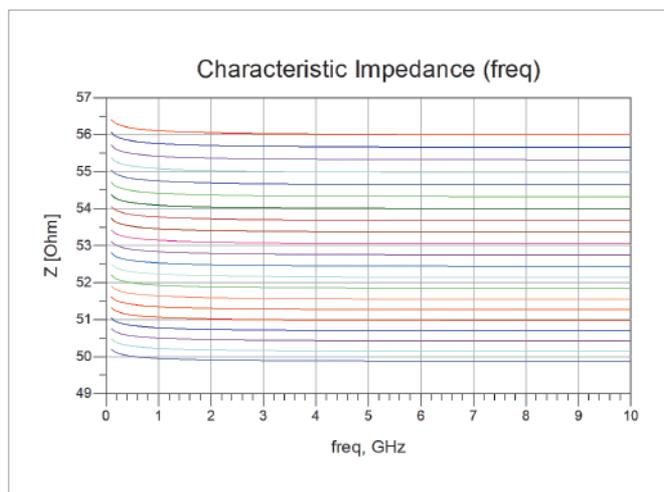


Рис. 5. Итерационный подбор ширины проводника

достаточно низкий тангенс угла диэлектрических потерь (около 0,003) и малое отклонение значений диэлектрической проницаемости в диапазоне частот до 20 ГГц. Также он без проблем может применяться в одном стеке вместе с более доступными базовыми материалами для печатных плат, поэтому он хорошо подходит для использования в многослойных конструкциях измерительной оснастки. Остальные диэлектрические слои выполнены из стеклотекстолита FR4 IT-180A.

Для того чтобы возможная неоднородность толщины паяльной маски не влияла на характеристики микрополосковых линий – маска вскрыта по всей длине проводников измерительных каналов.

В процессе проектирования оснастки отдельные элементы конструкции были оптимизированы при помощи итерационного моделирования методом конечных элементов (finite element method):

- микрополосковые линии передачи;
- структуры переходных отверстий;
- места установки коаксиальных соединителей.

Для линий передачи была выбрана ширина проводника, обеспечивающая наиболее близкое к импедансу измерительного тракта волновое сопротивление 50 Ом в широком диапазоне частот (рис. 5).

По конструктивным соображениям измеряемые устройства и измерительные разъемы SMA разнесены на разные стороны печатной платы, что потребовало применения переходных отверстий. Переходные отверстия, как правило, представляют собой существенную неоднородность в измерительном тракте, но при оптимизации геометрических параметров перехода (таких, например, как диаметр переходного отверстия, размеры вырезов в опорных внутренних слоях, расстояние до ближайших возвратных переходных отверстий и т. п.) потери на

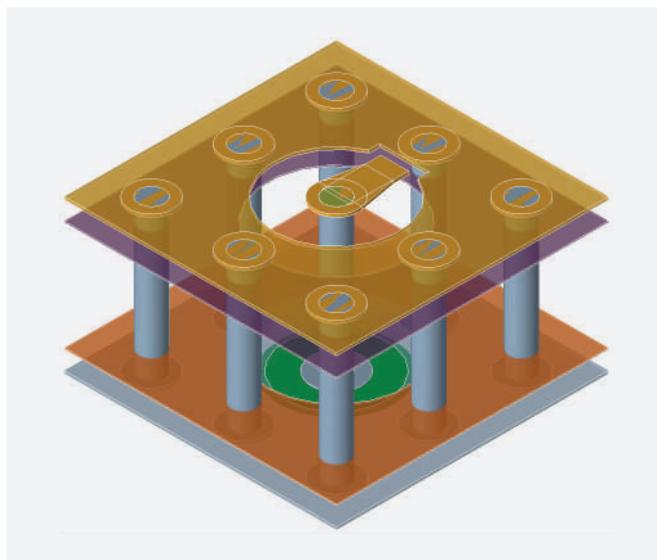


Рис. 6. Параметрическая модель переходного отверстия, диэлектрические слои не показаны

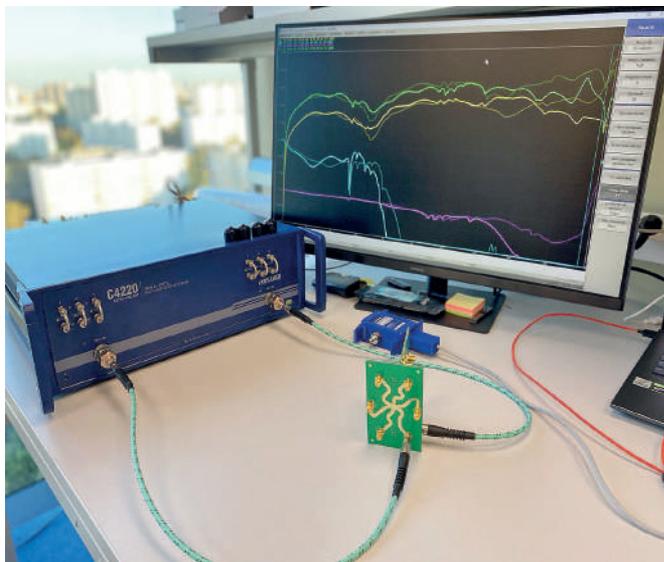
отверстиях можно минимизировать. В ходе работы над оснасткой была построена параметрическая модель перехода (рис. 6) и затем перебором конструктивных параметров получена наиболее оптимальная структура для работы в частотном диапазоне до 8 ГГц (см. рис. 6).

Под контактной площадкой сигнального проводника разъемов SMA в смежном опорном слое выполнен вырез для снижения паразитной емкости и улучшения согласования измерительного тракта (рис. 7).

Полученные в ходе моделирования структуры проводников и переходов использованы в конструкциях печатных плат всех устройств, которые исследуются в рамках данной статьи.



Рис. 7. Место установки коаксиального соединителя SMA



**Рис. 8.** Измерительный стенд на основе ВАЦ С4220 производства ООО «ПЛАНАР»

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Измерение частотных характеристик разъемов выполнялось с использованием ВАЦ С4220 серии КОБАЛЬТ производства ООО «ПЛАНАР» с диапазоном частот от 100 кГц до 20 ГГц. Для калибровки ВАЦ в коаксиальном тракте использовался автоматический калибровочный модуль АСМ2520. Фото измерительного стенда представлено на рис. 8.

### ПОВТОРЯЕМОСТЬ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

При изготовлении калибровочной платы использовались коаксиальные соединители 73251-135 фирмы Molex. Такие же соединители установлены на измерительной оснастке.

Одним из важных аспектов при работе с измерительной оснасткой является качество и повторяемость коаксиальных соединителей. Качество определяется уровнем возвратных потерь, а повторяемость – тем, насколько характеристики одного соединителя сопоставимы с другими аналогичными соединителями. Для выполнения такого анализа можно использовать режим фильтрации во временной области, выделив частотные характеристики коаксиальных соединителей и выполнив их сравнение, используя функциональные возможности ВАЦ.

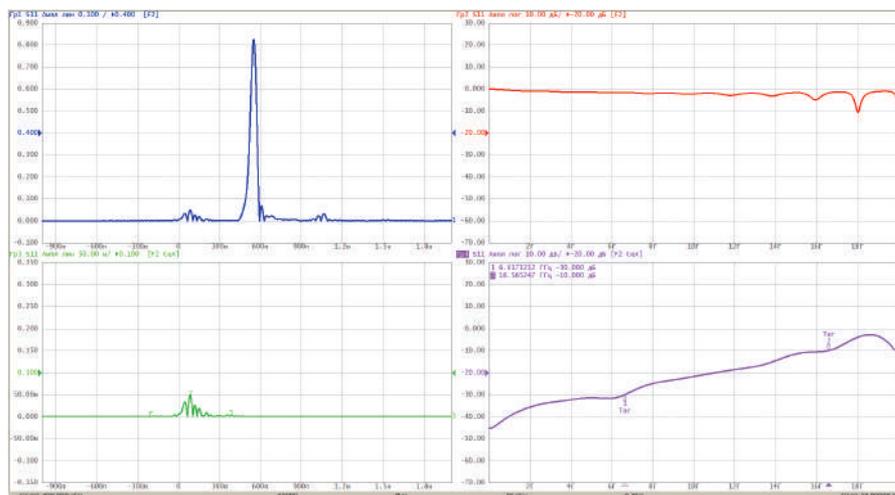
Характеристики коаксиальных соединителей мер XX и КЗ во временной и частотной областях показаны на рис. 9 и 10.

Частотные характеристики  $|S_{11}|$  показывают, что соединители имеют хорошее согласование на уровне  $-30$  дБ в диапазоне до 6,6 ГГц (показания маркера 1 на рис. 9). В этом диапазоне частот возможно получить повторяемые результаты измерений как с использованием SOLR калибровки, так и с использованием ПО АFR.

Предельная граничная частота использования коаксиальных соединителей измерительной оснастки составляет 15,36 ГГц (показания маркера 2 по уровню  $-10$  дБ на рис. 10). Проведение измерений на частотах выше указанной с высокой вероятностью будут недостоверными.

Оценка повторяемости коаксиальных соединителей выполнялась относительно частотных характеристик, полученных на предыдущем шаге. На рис. 11 показаны частотные характеристики коаксиальных соединителей мер XX и КЗ и их разность, представляющая график повторяемости коэффициента отражения исследуемых соединителей.

Повторяемость на уровне  $-40$  дБ достигается в диапазоне до 3,84 ГГц, на уровне  $-30$  дБ – в диапазоне до 8 ГГц, на что указывают соответствующие маркеры. Измерения на ВАЦ в диапазоне выше 8 ГГц может привести к недостоверным результатам, поскольку повторяемость соединителей не является систематической составляющей погрешности и не может быть минимизирована за счет проведения процедуры калибровки.



**Рис. 9.** Результаты измерения меры XX.  
 Синий:  $|S_{11}|$  меры XX во временной области.  
 Красный:  $|S_{11}|$  меры XX в частотной области.  
 Зеленый:  $|S_{11}|$  коаксиального соединителя меры XX во временной области.  
 Фиолетовый:  $|S_{11}|$  коаксиального соединителя меры XX в частотной области

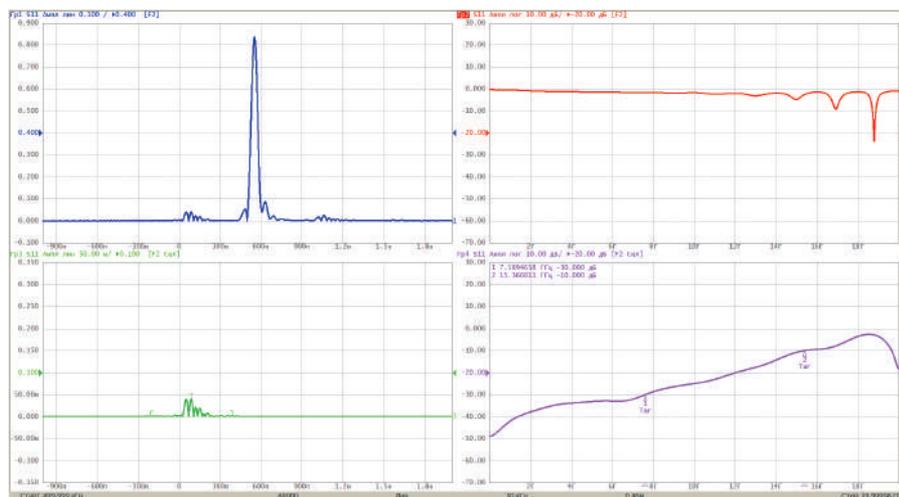


Рис. 10. Результаты измерения меры КЗ.

Синий: |S11| меры КЗ во временной области.

Красный: |S11| меры КЗ в частотной области.

Зеленый: |S11| коаксиального соединителя меры КЗ во временной области.

Фиолетовый: |S11| коаксиального соединителя меры КЗ в частотной области

## ОПИСАНИЕ МЕР SOLR КАЛИБРОВОЧНОГО НАБОРА

Метод SOLR-калибровки ВАЦ требует использования мер коэффициента отражения с известными параметрами. Однопортовые меры могут быть определены в виде эквивалентной цепи или в виде таблицы S-параметров. В данной статье для описания мер был

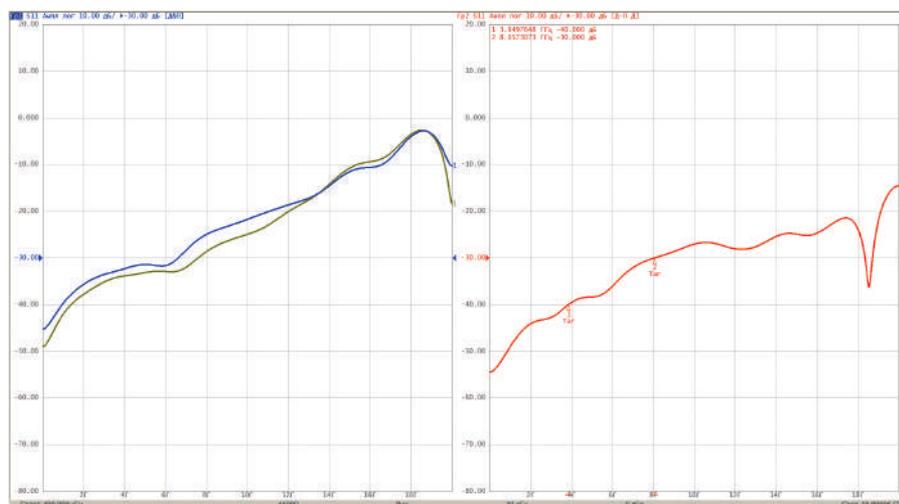


Рис. 11. Характеристики и повторяемости коаксиальных соединителей.

Синий: Частотная характеристика |S11| коаксиального соединителя меры XX.

Коричневый: Частотная характеристика |S11| коаксиального соединителя меры КЗ.

Красный: Повторяемость |S11| коаксиальных соединителей

выбран подход с использованием S-параметров, поскольку описание мер с использованием полиномиальных зависимостей в широком диапазоне частот является трудоемкой задачей.

## Описание меры XX

На рис. 12 представлены результаты измерения частотных характеристик меры XX по результатам калибровки ВАЦ С4220 в коаксиальном тракте с использованием автоматического калибровочного модуля ACM2520.

Поскольку опорная плоскость измерений должна быть смещена в плоскость установки измеряемого разъема, необходимо оценить величину задержки распространения сигнала в микрополосковой линии. Для определения электрической задержки можно использовать функцию «удлинение порта», позволяющую сместить калибровочную плоскость на длину согласованной линии [2].

Результаты измерения |S11| меры XX, полученные при использовании функции преобразования во временную область, показаны на рис. 13.

Обратите внимание, что значение амплитуды фронта характеристики во временной области по уровню 0,5 близко к нулевому значению по оси времени, что свидетельствует о корректности расчета величины электрической задержки, равной 273,722 пс.

После смещения плоскости калибровки для получения частотных характеристик меры XX необходимо исключить влияние частотных характеристик коаксиального соединителя. На рис. 14 показан результат измерения |S11| меры XX с использованием преобразования во временную область до применения фильтрации (слева) и после (справа).

В завершении выполним компенсацию потерь в микрополосковой линии применительно к характеристикам меры XX, полученным по результатам фильтрации. Частотно-зависимые потери могут быть компенсированы с использованием функции «удлинение порта» в автоматическом

**Рис. 12.** Частотные характеристики  $|S_{11}|$  меры XX. Синий: амплитудно-частотная характеристика. Красный: фазочастотная характеристика

режиме либо путем задания величины потерь [2]. В нашем примере потери были заданы на трех частотных точках: 0 дБ на частоте 0 Гц, 0,37 дБ на частоте 2 ГГц и 1,2 дБ на частоте 9,4 ГГц. Частотная и временная характеристики  $|S_{11}|$  нагрузки XX, полученные по результатам компенсации потерь, представлены на рис. 15.

Использование вышеописанного метода позволяет скомпенсировать потери в диапазоне до 7 ГГц, что, фактически, устанавливает ограничение на частотный диапазон использования характеризуемого калибровочного комплекта.

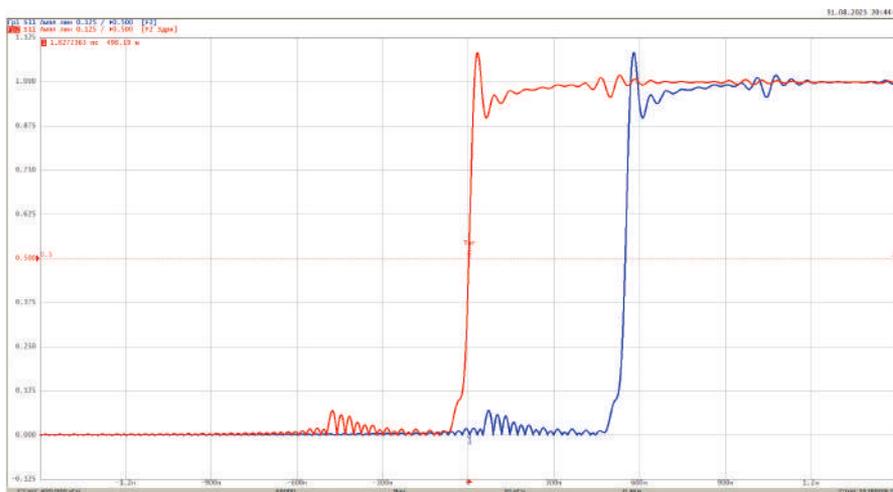
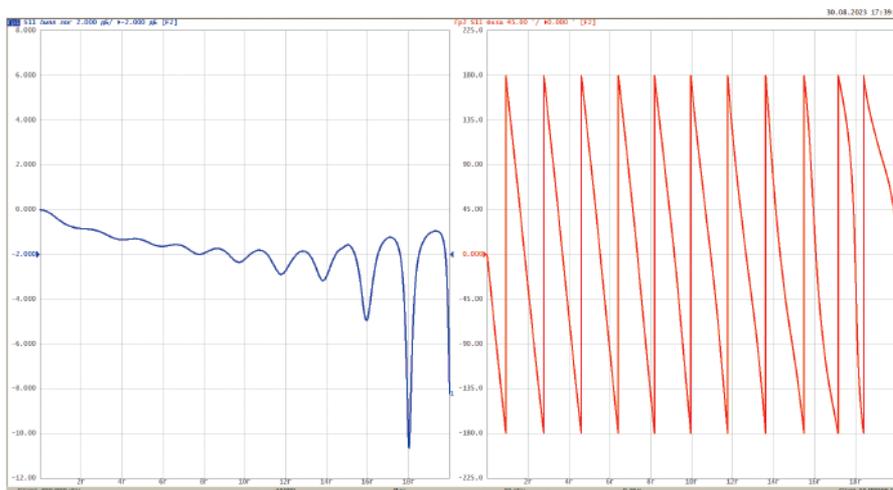
**Описание меры К3**

Проведем аналогичную процедуру характеристики меры К3 с использованием функций преобразования во временную область, фильтрации и удлинения порта.

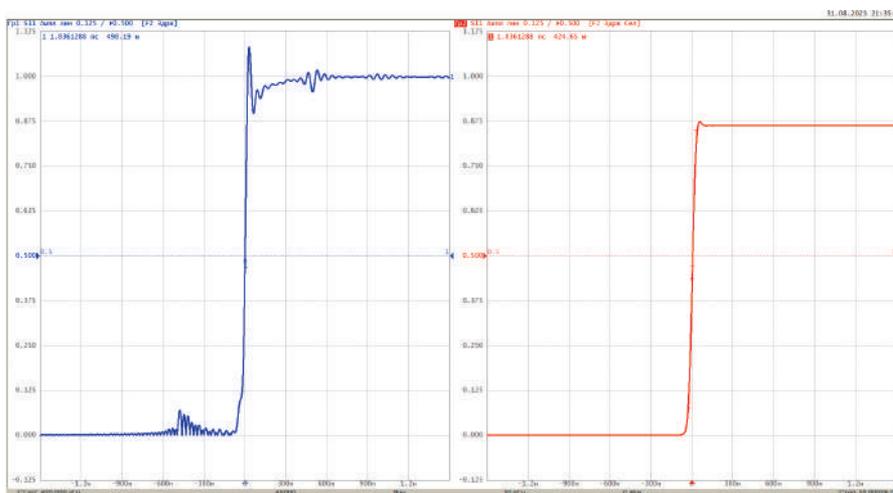
На рис. 16 представлены результаты измерений частотных характеристик меры К3, полученные с использованием ВАЦ, откалиброванного в коаксиальном тракте. Частотные и временные характеристики меры К3, полученные в ходе характеристики, представлены на рис. 17.

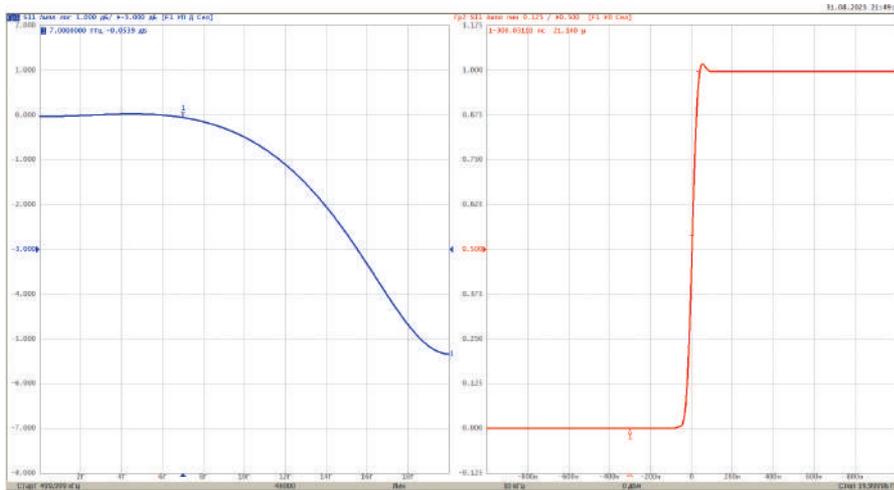
В данном случае задержка составила 273,722 пс, а величина потерь 0 дБ на частоте 0 Гц, 0,22 дБ на частоте 2 ГГц, 1,2 дБ на частоте 9,4 ГГц. Верхняя граница частотного

**Рис. 14.** Характеристики  $|S_{11}|$  меры XX во временной области. Синий:  $|S_{11}|$  в линейном масштабе до применения фильтрации. Красный:  $|S_{11}|$  в линейном масштабе после применения фильтрации



**Рис. 13.** Результат смещения опорной плоскости калибровки для меры XX. Синий:  $|S_{11}|$  в линейном масштабе до смещения опорной плоскости калибровки. Красный:  $|S_{11}|$  в линейном масштабе после смещения опорной плоскости калибровки



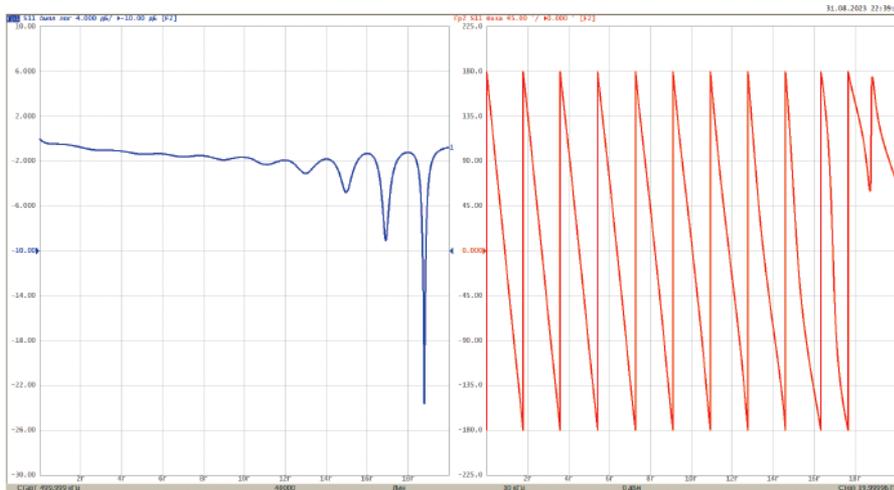


**Рис. 15.** Характеристики  $|S_{11}|$  меры XX по результатам компенсации потерь.

Синий:  $|S_{11}|$  в частотной области.  
Красный:  $|S_{11}|$  во временной области

диапазона характеристики меры составляет 6,5 ГГц.

На рис. 18 представлены фазочастотные характеристики характеризованных мер КЗ и ХХ, показывающие фазовый сдвиг, близкий к  $180^\circ$ , во всем диапазоне проводимых измерений.



**Рис. 16.** Частотные характеристики  $S_{11}$  меры КЗ до выполнения характеристики.

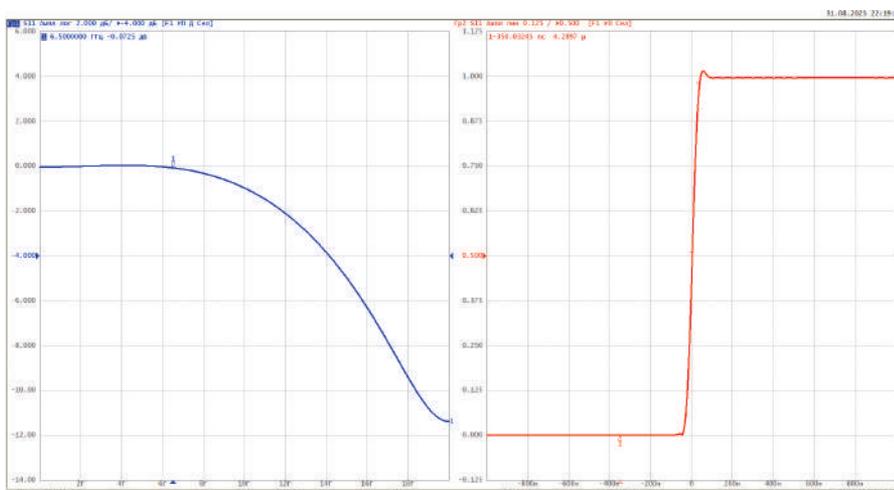
Синий: амплитудно-частотная характеристика.  
Красный: фазочастотная характеристика

### Описание меры СН

В завершении проведем характеристику меры СН. Результаты измерения меры СН до и после характеристики представлены на рис. 19 и 20. Из рисунка видно, что СН показывает достаточно хорошее согласование в диапазоне до 12 ГГц, уровень возвратных потерь не превышает  $-24$  дБ.

Результаты характеристики мер КЗ, ХХ и СН были сохранены в файле формата Touchstone и использованы при определении пользовательского калибровочного набора в программном обеспечении ВАЦ S2VNA (рис. 21).

Верхняя граница частотного диапазона калибровочных мер выбиралась равной 20 ГГц для возможности сравнительного анализа результатов измерений полученных после SOLR-калибровки с программным обеспечением для учета измерительной оснастки.

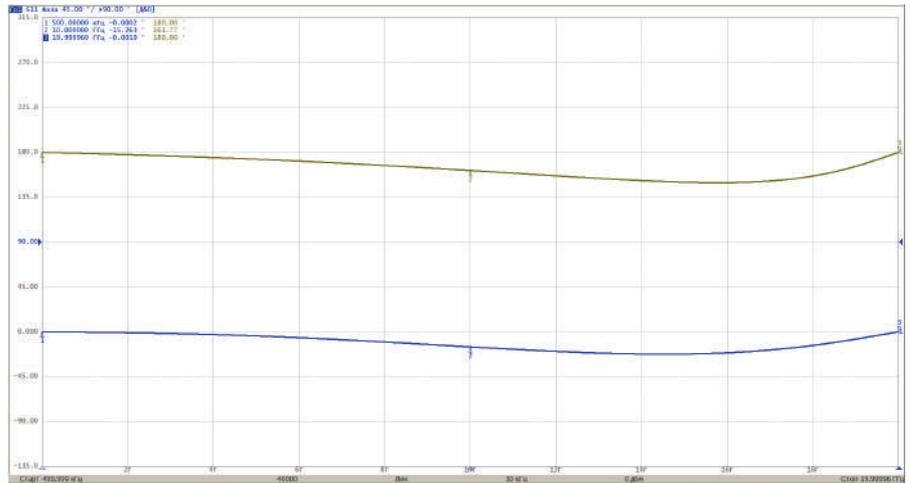


**Рис. 17.** Характеристики  $|S_{11}|$  меры КЗ по результатам смещения опорной плоскости, исключения отражений коаксиального соединителя и компенсации потерь подводящей линии.

Синий:  $|S_{11}|$  в частотной области.  
Красный:  $|S_{11}|$  во временной области

**Рис. 18.** Фазочастотные характеристики мер после характеризации.  
 Коричневый: для меры КЗ.  
 Синий: для меры ХХ

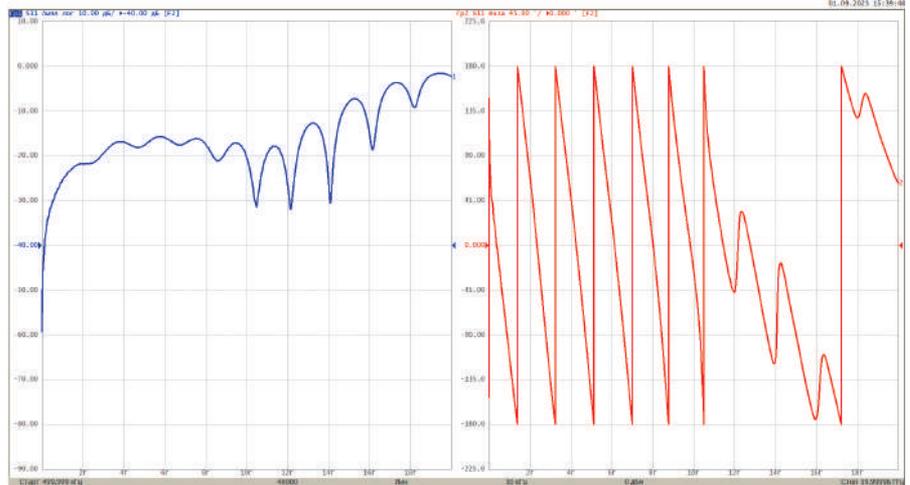
Обратите внимание, что мера коэффициента передачи описана в виде переключки с неизвестными параметрами. Параметры меры «неизвестная переключка» определяются в ходе самого процесса SOLR-калибровки [3].



**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИСКЛЮЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ (AFR)**

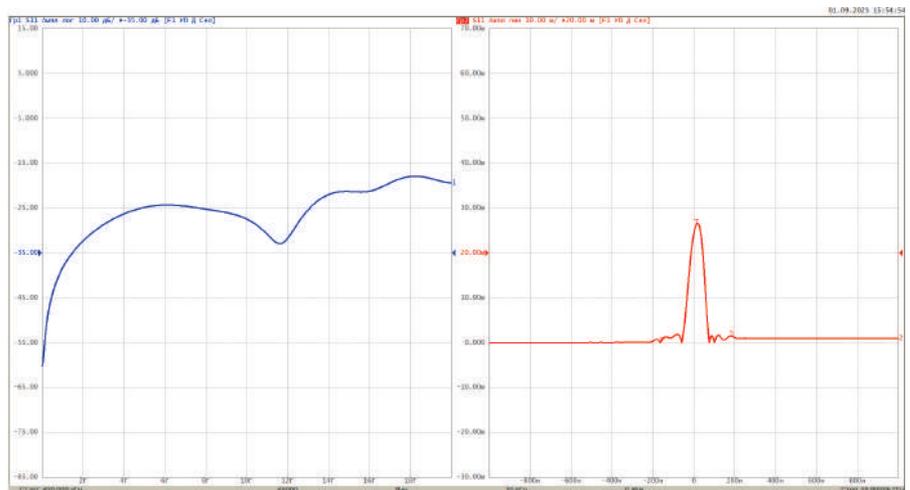
Описанная выше методика характеризации SOLR калибровочного набора требует проведения большого количества измерений, знания методов выполнения анализа и фильтрации во временной области, а также использования функции удлинения портов. Альтернативный метод переноса плоскости калибровки ВАЦ заключается в определении частотных параметров измерительных приспособлений в соответствии с моделью по результатам использования различных математических алгоритмов обработки измерений. Данный метод нашел широкое практическое применение при измерении устройств в некоаксиальных трактах за счет упрощения и снижения временных затрат на проведение измерений.

Программное обеспечение «Исключение влияния измерительной



**Рис. 19.** Частотные характеристики  $|S_{11}|$  меры СН до выполнения характеризации

**Рис. 20.** Характеристики  $|S_{11}|$  меры СН по результатам смещения опорной плоскости, исключения отражений коаксиального соединителя и компенсации потерь подводящей линии.  
 Синий:  $|S_{11}|$  в частотной области.  
 Красный:  $|S_{11}|$  во временной области



N	Мера		Частота		Задержка	Смещение		Среды	Импеданс нагрузки	C0-1e-15 Ф	C1-1e-27 Ф/Гц	C2-1e-36 Ф/Гц <sup>2</sup>	C3-1e-45 Ф/Гц <sup>3</sup>
	Тип	Наименование	F min	F max		Z0	Потери			L0-1e-12 Гн	L1-1e-24 Гн/Гц	L2-1e-33 Гн/Гц <sup>2</sup>	L3-1e-42 Гн/Гц <sup>3</sup>
1	Табл. данные	OPEN 40 mm	0 Гц	20 ГГц		50 Ω		Коакси					
2	Табл. данные	SHORT 40 mm	0 Гц	20 ГГц		50 Ω		Коакси					
3	Табл. данные	LOAD 40 mm	0 Гц	20 ГГц		50 Ω		Коакси					
4	Неизв. прич	UNKN THRU	0 Гц	20 ГГц	АВТО			Коакси					

Рис. 21. Описание комплекта калибровочных мер по результатам характеристики

оснастки» (AFR), являющееся опцией ВАЦ ПЛАНАР, включает мастер проведения измерений со встроенными инструкциями, позволяющий за несколько шагов выполнить определение и сохранение частотных параметров оснастки и исключить ее влияние из результатов измерений.

Программное обеспечение AFR поддерживает три различных метода расчета параметров оснастки в зависимости от ее электрической длины:

- селекция во временной области (Time gating);
- метод совместной оценки (Filtering);
- деление S-параметров оснастки пополам (Bisection).

Каждый из методов расчета обладает диапазоном применимости в зависимости от электрической длины оснастки и вариаций импеданса вдоль оснастки [1].

AFR позволяет определить параметры оснастки двумя способами [1]:

- **1xReflect.** Полное отражение оснастки в плоскости подключения устройства. Отражение в режиме холостого хода и/или короткого замыкания;
- **2xThrough.** Измерение двух соединенных оснасток на проход (оснастка состоит из двух половин).

В рассматриваемой задаче для определения параметров измерительной оснастки использовался метод селекции во временной области, выбранный исходя из особенностей используемой оснастки (рис. 22):

- вдоль оснастки имеются вариации импеданса вызванные уменьшением ширины полосковой линии и переходными отверстиями;
- электрическая длина подводящих линий оснастки больше чем 4 времени нарастания импульсной характеристики, определяемой как  $\approx 0,89/F_{max}$ , где  $F_{max}$  – максимальная частота анализатора при измерении. С учетом диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 2,65$  при  $F_{max} = 20$  ГГц, электрическая

длина подводящих линий оснастки должна быть более 33 мм. В нашем случае длина подводящих линий была выбрана, равной 40 мм, что соответствует предъявляемому требованию.

Последовательность выполнения измерений в ПО AFR включает следующие шаги:

- выбор конфигурации оснастки и метода расчета ее параметров;
- выбор схемы подключения оснастки;
- установка параметров анализатора;
- калибровка анализатора в плоскости подключения к оснастке;
- измерение оснастки и вычисление ее параметров;
- смещение плоскости калибровки к контактам исследуемого устройства и сохранение результатов расчета.

На рис. 23 представлены результаты характеристики оснастки, полученные по результатам измерения мер КЗ и ХХ.

Обратите внимание на совпадение величин электрической длины оснастки LA и LB, полученной в ПО AFR и полученной на предыдущем шаге при характеристике мер КЗ и ХХ для SOLR-калибровки.

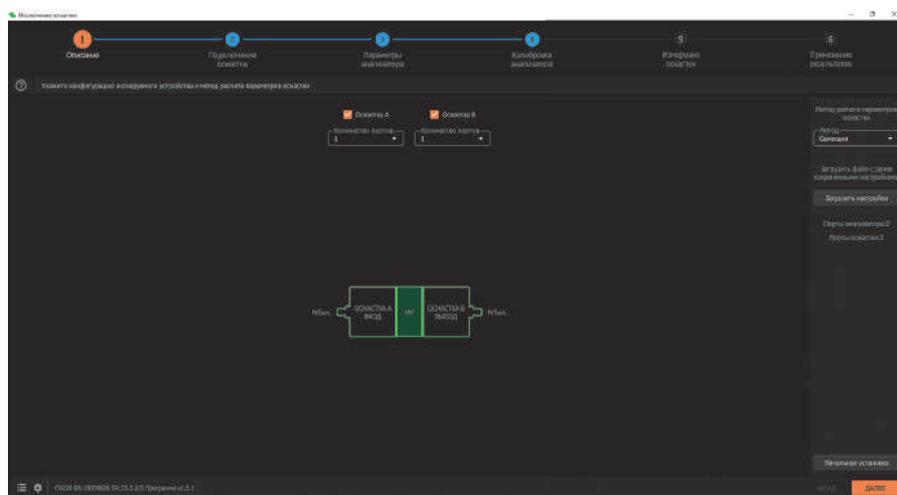


Рис. 22. Описание схемы подключения измерительной оснастки к измеряемому устройству с указанием используемого метода расчета параметров оснастки в ПО AFR

Результаты характеризации измерительной оснастки сохранялись в файлы формата Touchstone и исключались из результатов измерений S-параметров с помощью математической функции «Исключение цепи», реализованной в ПО S2VNA [2].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерения S-параметров пары сопряженных разъемов представлены на рис. 25. Измерения выполнялись для тракта B21 измерительной оснастки, представленной на рис. 3.

Результаты измерений имеют хорошую сходимость в диапазоне до 7 ГГц. Разброс величин коэффициентов отражения  $|S11|$  и  $|S22|$  в указанном диапазоне составляет не более 3 дБ на уровне  $-30$  дБ (КСВН на уровне 1,17). Разброс величин коэффициентов передачи  $|S21|$  и  $|S12|$  составляет не более 0,2 дБ, что является приемлемым результатом с учетом качества исполнения калибровочного комплекта и измерительной оснастки. Отличие результатов измерений в диапазоне свыше 7 ГГц обусловлено ограничением характеризации SOLR калибровочного набора и ухудшением характеристик измерительной оснастки. Значение  $|S11|$  свыше 0 дБ в диапазоне свыше 18 ГГц свидетельствует о некорректной работе ПО AFR по причине недостаточного согласования и отсутствия повторяемости используемых коаксиальных соединителей.

В соответствии с технической документацией параметр вносимых потерь нормируется производителем по уровню  $-3$  дБ на частоте 12,5 ГГц. Важно отметить, что частотные характеристики разъемов зависят от расположения контактов в разъемах. В дополнительном отчете об измерениях, предоставляемом производителем, показано, что вносимые потери по уровню  $-3$  дБ могут лежать в диапазоне

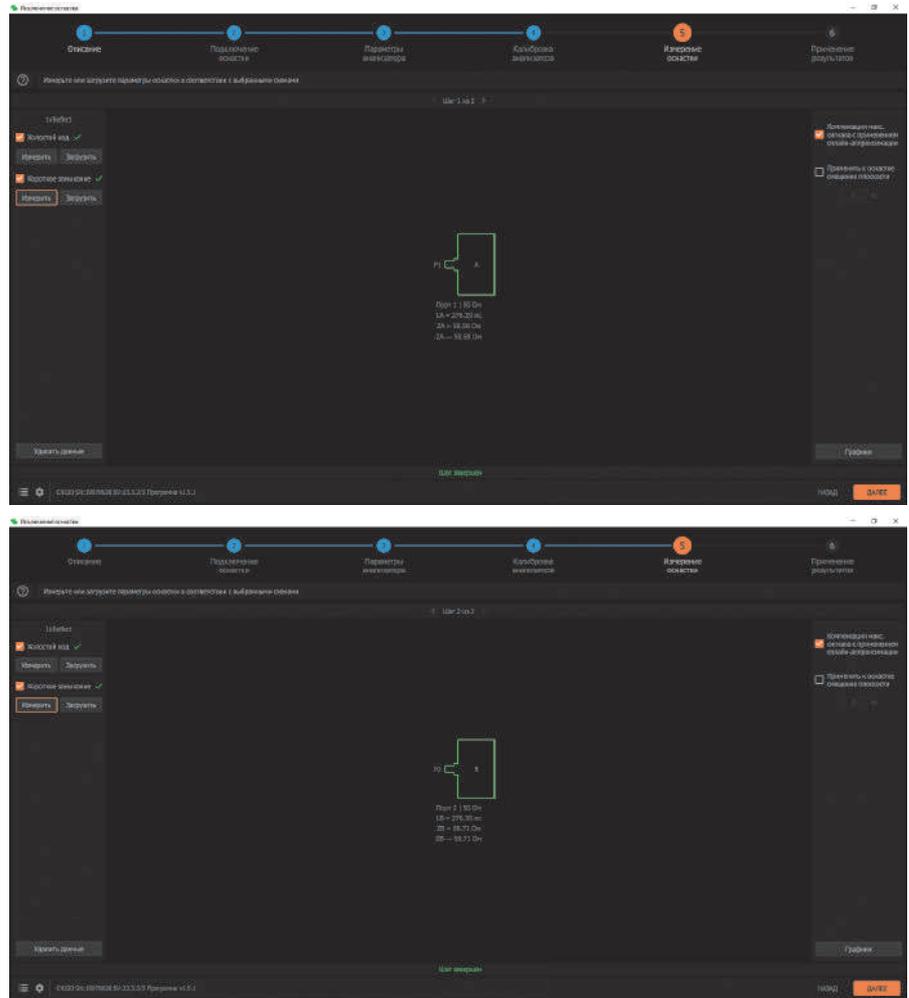


Рис. 23. Результаты характеризации измерительной оснастки в ПО AFR

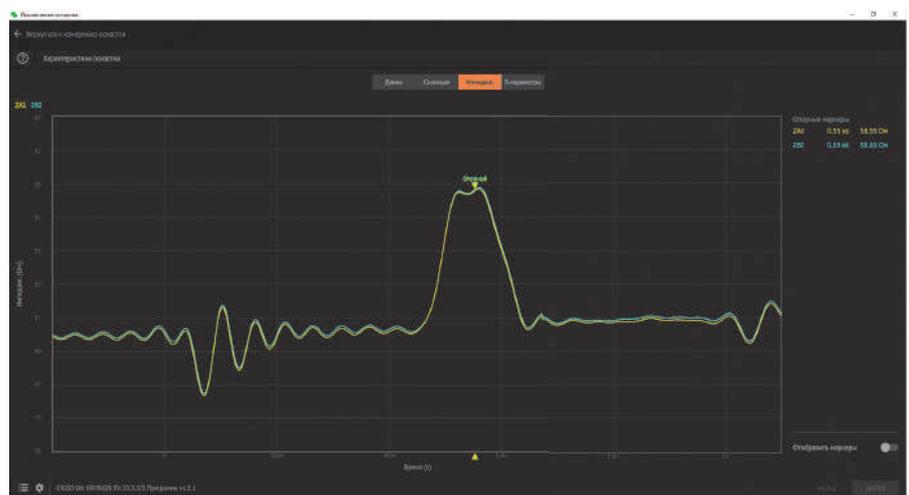
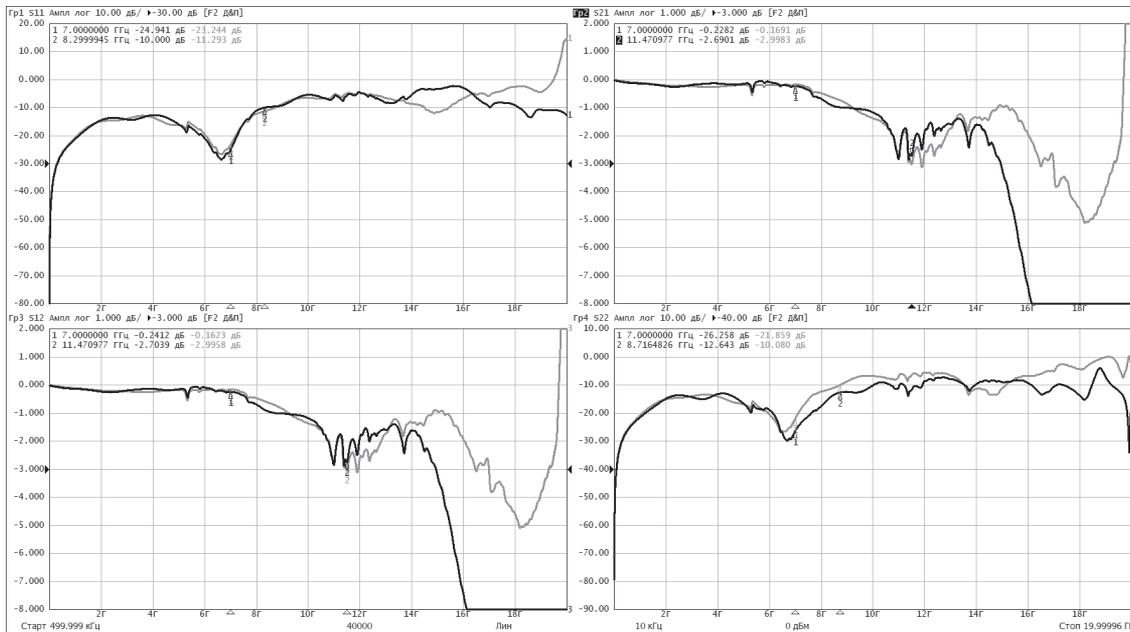
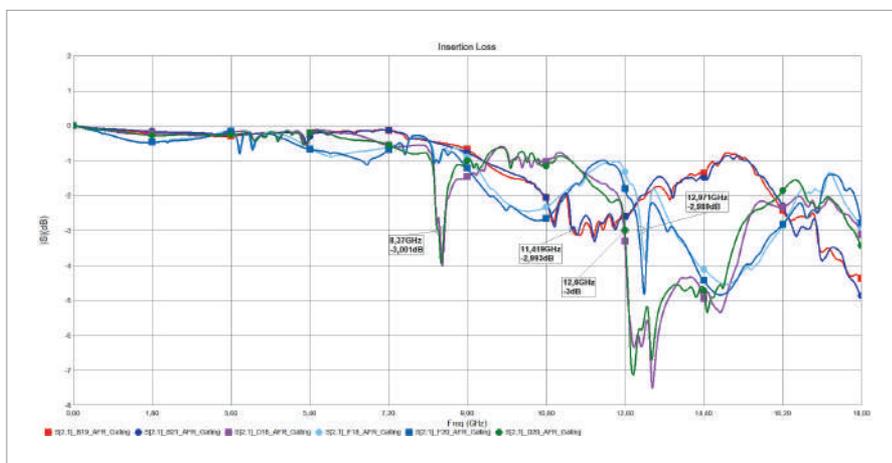


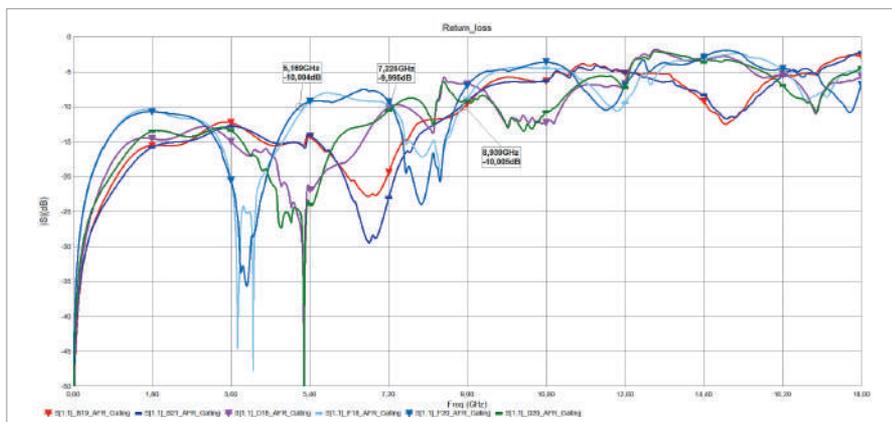
Рис. 24. Профиль импеданса измерительной оснастки по результатам характеризации в ПО AFR



**Рис. 25.** S-параметры пары сопряженных соединителей. Черный: по результатам SOLR-калибровки Серый: по результатам использования ПО AFR



**Рис. 26.** |S21| сопряженных разъемов для шести пар контактов в соответствии с топологией измерительной оснастки



частот от 5,7 до 11,9 ГГц, а параметр обратных потерь по уровню не более -10 дБ в диапазоне от 1 до 6,7 ГГц в зависимости от выбранной пары контактов. Данная информация также предоставляется производителем в дополнительном отчете об измерениях.

На рис. 26 и 27 показаны частотные характеристики вносимых и обратных потерь исследуемой пары соединителей для шести измерительных трактов, выполненных на измерительной оснастке: B19, B21, D18, F18, F20, D20. Характеристики получены по результатам использования ПО AFR.

Из графиков видно, что вносимые потери по уровню -3 дБ лежат в диапазоне от 8,37 до 12,97 ГГц, а вносимые потери по уровню -10 дБ в диапазоне от 5,17 до 8,94 ГГц. Результаты измерений хорошо согласуются с характеристиками, предоставляемыми производителем разъемов.

**Рис. 27.** |S11| сопряженных разъемов для шести пар контактов в соответствии с топологией измерительной оснастки



ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ РАЗРАБОТЧИК и ПРОИЗВОДИТЕЛЬ  
ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ МИРОВОГО УРОВНЯ



 Полный цикл  
собственного производства  
с центрами разработки в Челябинске и Томске

 Высококвалифицированная команда  
инженеров-разработчиков

 Гарантия и сервисное обслуживание

 Серийное производство ВАЦ  
и разработка специализированных  
измерительных решений

 Широкая линейка  
аксессуаров и принадлежностей

 Приемлемые сроки поставки

planarchel.ru  
8 800 222 12 11



\*\*\*

Полученные результаты измерений подтверждают применимость SOLR-калибровки и математического аппарата ПО AFR для определения радиочастотных характеристик высокоскоростных разъемов в широком диапазоне частот относительно их физических границ.

Определение параметров калибровочных мер типа SOLR является трудоемкой задачей, требующей большого числа измерений и знания современных техник векторного анализа цепей.

ПО AFR упрощает проведение измерений устройств, не имеющих коаксиальных соединителей, позволяя определить частотные параметры измерительных приспособлений без необходимости определения характеристик комплекта калибровочных мер.

Вне зависимости от используемого метода измерений важным аспектом при исследовании радиочастотных характеристик высокоскоростных разъемов является качество изготовления калибровочной и измерительной оснастки: малый уровень вносимых и обратных потерь, повторяемость коаксиальных соединителей.

Дальнейшие направления работ могут заключаться в исследовании частотных характеристик разъемов в балансных (дифференциальных) режимах с возможностью построения глазковых диаграмм для оценки пропускной способности радиочастотного канала в зависимости от параметров модулирующего сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Программное обеспечение для автоматического исключения оснастки. Руководство по эксплуатации. // <https://planarchel.ru> URL: [https://planarchel.ru/upload/uf/810/s45a5qsvsvzh5o0yus049ou4o80n2bq2/AFR\\_rus\\_ver\\_23.1.pdf](https://planarchel.ru/upload/uf/810/s45a5qsvsvzh5o0yus049ou4o80n2bq2/AFR_rus_ver_23.1.pdf)
2. Анализаторы цепей векторные. Руководство по эксплуатации. Программное обеспечение. // <https://planarchel.ru> URL: [https://planarchel.ru/upload/medialibrary/9cfe/hl13hjbz7hleox06te2he0h1c9wo4xy/Part2\\_S2VNA\\_ver\\_23.2.pdf](https://planarchel.ru/upload/medialibrary/9cfe/hl13hjbz7hleox06te2he0h1c9wo4xy/Part2_S2VNA_ver_23.2.pdf)
3. Калибровка векторных анализаторов цепей переменной с неизвестными параметрами. // <https://planarchel.ru> URL: <https://planarchel.ru/upload/iblock/858/d9i51w8x50gae4afb1pugn6udhjtkyu5/Калибровка%20ВАЦ%20переменной%20с%20неизвестными%20параметрами.pdf>

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

### НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

Дансмор Джоэль П.

Пер. с англ. и науч. ред. Е. Ю. Харитонова, Е. В. Андропова, А. С. Бондаренко

Издание осуществлено при поддержке компании Keysight Technologies

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2019. – 736 с.,  
ISBN 978-5-94836-505-3

В книге рассмотрен широкий круг измерительных задач в СВЧ-диапазоне. В центре внимания – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов. Приведены практические примеры измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители и др.

Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне: от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ- / СВЧ-устройств, занимающихся моделированием и тестированием как отдельных узлов радиоэлектронной аппаратуры, так и законченных изделий, к примеру систем спутниковой связи, радиолокации и радионавигации. Крайне полезной данная книга будет и в процессе обучения студентов радиотехнических специальностей.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru), [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)

## РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

### оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

К50-15, К50-17, К50-27, К50-29, К50-37,  
К50-68, К50-77, К50-80, К50-81, К50-83,  
К50-84, К50-85, К50-86, К50-87, К50-88,  
К50-89, К50-90, К50-91, К50-92, К50-93,  
К50-94, К50-95(чип), К50-96, К50-97(чип),  
К50-98, К50-99, К50-100, К50-101(чип),  
К50-102, К50-103, К50-104, К50-105, К50-106



### объемно-пористые танталовые конденсаторы

К52-1, К52-1М, К52-1БМ, К52-1Б, К52-9,  
К52-11, К52-17, К52-18, К52-19, К52-20,  
К52-21, К52-24, К52-26(чип), К52-27(чип),  
К52-28, К52-29, К52-30



### оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

К53-1А, К53-7, К53-65(чип), К53-66,  
К53-68(чип), К53-69(чип), К53-71(чип),  
К53-72(чип), К53-74(чип), К53-77(чип),  
К53-78(чип), К53-82



### суперконденсаторы (ионисторы)

К58-26, К58-27, К58-28,  
К58-29, К58-30, К58-31



### накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов

НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ



Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

