

**Данилов А.Б.¹, Лавричев О.В.², Никулин С.М.³,
Торгованов А.И.⁴, Шипунов А.С.⁵**

¹АО «НПП «Алмаз»

²Арзамасский приборостроительный завод им. П.А. Пландина

³Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

⁴ООО «Роде и Шварц Рус»

⁵НПП «Прима»

Контроль параметров устройств с нестандартными волноводными и коаксиальными соединителями

Обсуждается задача контроля параметров устройств с нестандартными волноводными и коаксиальными соединителями с помощью векторных анализаторов СВЧ цепей, основанная на известной процедуре исключения окружающих цепей из результатов измерений в стандартном коаксиальном канале. Предложен оригинальный LTR-метод определения параметров рассеяния переходов с нестандартными соединителями, основанный на итерационной процедуре обработки данных измерений электрически длинного отрезка нестандартного волновода, сквозного соединения переходов и переходов в режиме с отражающей нагрузкой. Приведены результаты контроля параметров устройств с миниатюрными коаксиальными SMP соединителями и с П-образными волноводами.

Ключевые слова: Коаксиально-волноводный переход, нестандартный волновод, параметры рассеяния, анализатор цепей, исключение цепей.

При проектировании и изготовлении устройств СВЧ диапазона различного функционального назначения возникает задача контроля параметров объектов с нестандартными волноводными и коаксиальными соединителями. Примерами таких объектов являются широкополосные усилители СВЧ мощности на основе лампы бегущей волны с П- либо Н-образными волноводами в выходном сечении, приемо-передающие модули систем с фазированными антенными решетками с миниатюрными коаксиальными врубными SMP-разъемами и другие устройства. Контроль параметров устройств с нестандартными соединителями выполняют векторными анализаторами цепей, используя функцию «исключения цепи» при известных S-параметрах переходов [1-4].

Известные способы определения S-параметров нестандартных переходов несовершенны [5,6] поэтому побуждают исследователей к поиску альтернативных решений, удовлетворяющих следующим требованиям:

- перекрытие широкого диапазона частот;
- доступность, дешевизна и минимальное количество калибровочных мер волнового сопротивления;
- представление S-параметров переходов файлами формата *Touchstone* (с расширением *s2p*).

В настоящей работе рассмотрен оригинальный LTR-метод определения параметров рассеяния переходов с нестандартными соединителями, основанный на итерационной процедуре обработки данных измерений электрически длинного отрезка нестандартного

волновода, сквозного соединения переходов и переходов в режиме с отражающей нагрузкой.

Предлагаемый метод, как и известный TRL-метод основан на использовании минимального комплекта мер волнового сопротивления, состоящего из отрезка волновода, отражающей нагрузки и сквозного соединителя. В случае, например, П-образного волновода комплект мер состоит из короткозамыкающей пластины и отрезка волновода, а в случае коаксиального тракта с мини SMP-разъемами это отрезок кабеля с разъемами и соединитель типа «розетка»-«розетка», как показано на рисунке 1.

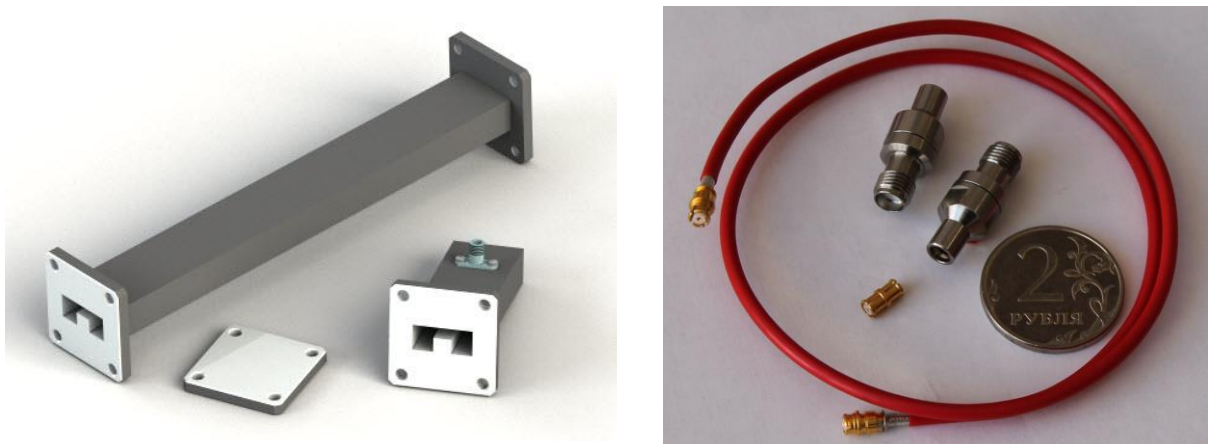


Рис. 1. Переходы и калибровочные меры для П-образного волновода и коаксиального тракта с мини SMP-разъемами

Графическая иллюстрация предлагаемого решения для волноводного тракта с переходами А и В показана на рисунке 2.

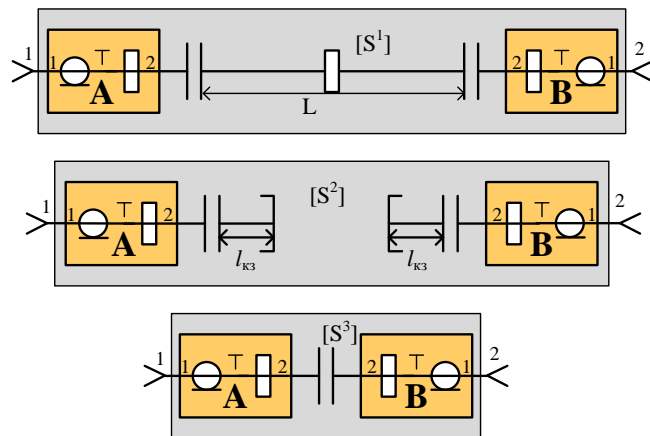


Рис. 2. Иллюстрация LRT-метода

Комплексные коэффициенты отражения S_{11}^1, S_{22}^1 и передачи S_{21}^1, S_{12}^1 каскадного соединения переходов отрезком волновода длиной L связаны с коэффициентами отражения переходов $S_{ik}^{a,b}$ соотношением:

$$\begin{aligned}
 S_{11}^1(f) &= S_{11}^a(f) + S_{21}^1(f) \left(\frac{S_{12}^a(f)}{S_{21}^b(f)} \right) S_{22}^b(f) \exp(-i\gamma(f)L), \\
 S_{22}^1(f) &= S_{11}^b(f) + S_{12}^1(f) \left(\frac{S_{21}^b(f)}{S_{12}^a(f)} \right) S_{22}^a(f) \exp(-i\gamma(f)L),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь $\gamma(f)$ - коэффициент распространения электромагнитной волны в волноводе.

Использование электрически длинного по отношению к переходам отрезка волновода позволяет определить коэффициенты отражения от переходов $S_{11}^a(f)$ и $S_{11}^b(f)$ со стороны коаксиальных разъемов как средние линии квазипериодических быстро осциллирующих функций. Существуют различные способы решения этой задачи: - метод скользящего среднего, метод наименьших квадратов и пр. Наилучший результат был получен с помощью сочетания «минимаксного алгоритма» с поиском скользящего среднего. Предлагаемое решение предполагает:

- определение максимума и минимума в частотном окне, определяемом электрической длиной волновода,
- вычисление среднего от значений соседних максимумов и минимумов,
- обработку скользящим средним ступенчатой функции с окном, равным периоду пространственной гармоники.

Эффективность алгоритма демонстрирует рисунок 3 на примере восстановления по результатам измерений $S_{11}^1(f)$ реальной и мнимой части $S_{11}^a(f)$ (слева) коаксиально-волноводного перехода с П-образным сечением в диапазоне частот от 8 до 18 ГГц и реальной части $S_{11}^a(f)$ (справа) перехода с SMP-разъемом в диапазоне от 1 до 26 ГГц.

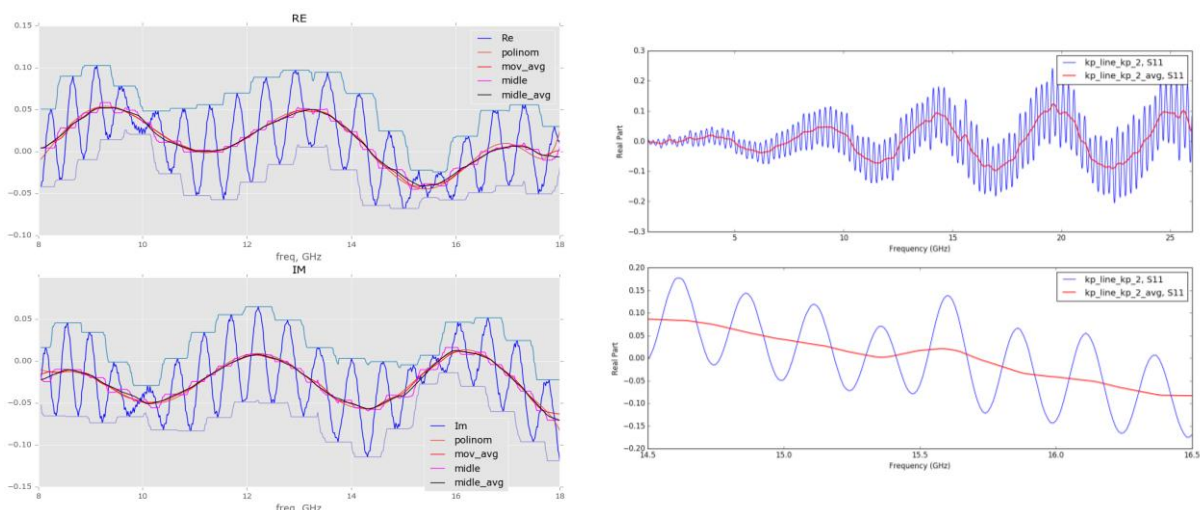


Рис. 3. Графики частотных зависимостей $S_{11}^1(f)$ и $S_{11}^a(f)$ коаксиально-волноводного перехода с П-образным сечением и перехода с SMP-разъемом

Особенность восстановления S_{11}^a и S_{11}^b коаксиальных переходов с SMP-разъемами состоит в том, что процедуру поиска средних линий квазипериодических быстро осциллирующих функций приходится выполнять дважды. Это позволяет исключить влияние кабельного SMP-разъема на модель перехода.

При известных коэффициентах отражения S_{11}^a и S_{11}^b от переходов и известной величине отношения их коэффициентов передачи S_{12}^a/S_{21}^b неизвестные коэффициенты отражения S_{22}^b , S_{22}^a и произведения прямого и обратного коэффициентов передачи переходов $S_{12}^a S_{21}^a$, $S_{12}^b S_{21}^b$ можно определить по результатам измерения S-параметров сквозного соединения из соотношений¹:

¹ Формулы (2), (4) приведены для случая сквозного соединения нулевой длины, в случае применения соединителей типа «розетка»-«розетка» и пр. следует учитывать электрическую длину соединения переходов.

$$S_{22}^b = \frac{S_{11}^3 - S_{11}^a \left(\frac{S_{21}^b}{S_{12}^a} \right), S_{22}^a = \frac{S_{22}^3 - S_{11}^b \left(\frac{S_{12}^a}{S_{21}^b} \right),}{S_{21}^3} \quad (2)$$

$$S_{12}^a S_{21}^a = S_{21}^3 \left(\frac{S_{12}^a}{S_{21}^b} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), S_{12}^b S_{21}^b = S_{12}^3 \left(\frac{S_{21}^b}{S_{12}^a} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b)$$

Отношение S_{12}^a/S_{21}^b определяют по результатам измерения коэффициентов отражения S_{11}^2 и S_{22}^2 от переходов с отражающей (в случае П- и Н-волноводов короткозамкнутой) нагрузкой:

$$S_{12}^a/S_{21}^b = \sqrt{\frac{(S_{11}^2 - S_{11}^a)(1 - S_{22}^a \Gamma_r)}{(S_{22}^2 - S_{11}^b)(1 - S_{22}^b \Gamma_r)}} \quad (3)$$

Здесь Γ_r - коэффициент отражения от отражающей нагрузки.

Искомые величины определяются с помощью (2), (3) при выполнении итерационной процедуры, которая окончательно сходится уже на третьем, четвертом шаге процесса. Произведения коэффициентов передачи соединения переходов в прямом $S_{21}^a S_{21}^b$ и обратном $S_{12}^b S_{12}^a$ направлении определяются по результатам измерения коэффициентов передачи S_{21} и S_{12} соединения переходов отрезком волновода из соотношений:

$$S_{21}^a S_{21}^b = S_{21}^3 (1 - S_{22}^a S_{22}^b),$$

$$S_{12}^a S_{12}^b = S_{12}^3 (1 - S_{22}^a S_{22}^b) \quad (4)$$

Эффективность LTR-метода определения параметров рассеяния иллюстрирует рисунок 4. На рисунке приведены результаты измерений модулей коэффициентов отражения (синяя и розовая линии) и передачи (синяя линия) отрезка прямоугольного волновода 23×10 мм длиной 100 мм. На этом же рисунке показаны результаты измерений, полученные стандартным методом с использованием короткозамыкающей пластины, четверть волнового отрезка волновода и согласованной нагрузки Э9-126/1. Соответствующие этому методу линии имеют красный и коричневый цвет на левом рисунке и розовый – на правом.

Лучшие результаты, полученные LRT-методом по сравнению со стандартным, объясняются тем, что сквозное соединение переходов позволяет определить параметры переходов S_{22}^b , S_{22}^a , $S_{12}^a S_{21}^a$ и $S_{12}^b S_{21}^b$ не косвенным способом из решения системы линейных уравнений, а прямым вычислением из соотношений (2).

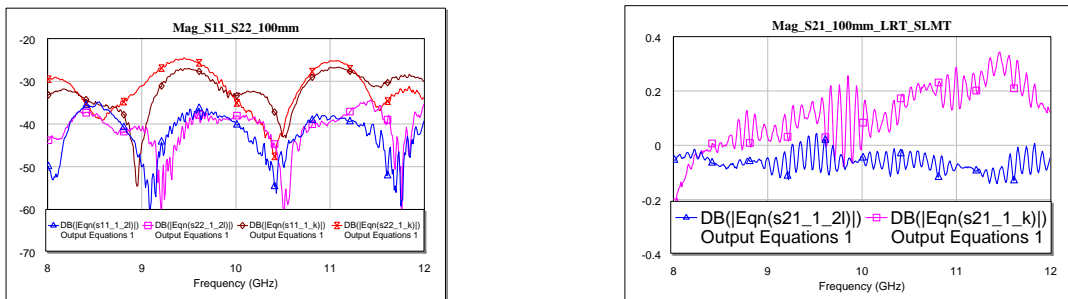


Рис. 4. Результаты измерений $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ отрезка прямоугольного волновода 23×10 мм длиной 100 мм

Причем малые значения измеренных коэффициентов отражения S_{11}^3 и S_{22}^3 обладают высокой чувствительностью к малым по величине определяемым параметрам S_{22}^b , S_{22}^a , а близкие по модулю к единице коэффициенты передачи S_{21}^3 и S_{12}^3 в виду погрешностей измерений, обусловленных шумовыми факторами и неповторяемостью параметров соединителей, дают лучшие оценки параметров переходов $S_{12}^a S_{21}^a$, $S_{12}^b S_{21}^b$ и их соединения $S_{21}^a S_{21}^b$ и $S_{12}^b S_{21}^a$.

В заключение отметим, что LRT-метод распространяется и на случай контроля параметров интегральных структур и электронных компонентов в полосковых линиях передачи [7]. В докладе приведены результаты определения параметров переходов на нестандартные направляющие системы в широком диапазоне частот и примеры контроля параметров волноводных и коаксиальных устройств с нестандартными соединителями, а также микроэлектронных компонентов в полосковых линиях передачи. Экспериментальные исследования выполнялись авторами доклада с помощью зарубежных и отечественных анализаторов цепей N5222A, ZVA-24 и P4-18M.

Библиографический список

1. Михаэль Хибель Основы векторного анализа цепей. Москва, Издательский дом МЭИ, 2009, с. 133 – 152,
2. PNA Series Network Analyzers help.- <http://na.support.keysight.com/pna/help/latest/help.htm>.
3. Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers.-<http://anlage.umd.edu/Agilent> Advanced VNA Calibration.pdf.
4. Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers. Application Note 5989-4804EN // Keysight Technologies, 2016. P. 42.
5. <http://www.flan.com/wp-content/uploads/2015/09/Double-Ridge-Waveguide-Calibration-Kits.pdf>.
6. В. Казарновский, А. Крылов Методы измерения параметров коаксиально-волноводных переходов и узлов с нестандартным сечением. Электроника. Наука, технология бизнес 2016, №8, с 82-87.
7. Лавричев О.В., Лебедева Е.А., Никулин С.М., Петров В.В., Шипунов А.С. Контактное устройство для контроля параметров интегральных структур и электронных компонентов в полосковых линиях передачи. // Сборник статей Пятой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт Петербург, 2016, том 1, с. 310 -314.