

Аппаратно-программная реализация контроля параметров объектов в нестандартных трактах

А.А. Терентьев^{1,3}, Е.А. Лупанова², С.М. Никулин^{2,3}, В.В. Петров²

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

³ООО «Скоростные системы связи»

Аннотация: в работе обсуждаются варианты реализации Lr-метода контроля параметров двухпортовых объектов в микрополосковых линиях передачи, металлических волноводах различной геометрии, а также в нестандартных коаксиальных линиях. Приведены варианты проведения экспериментальных исследований с использованием векторных анализаторов цепей, простой оснастки и специального программного обеспечения для математической обработки данных с использованием Lr-метода

Ключевые слова: микрополосковая линия, металлические волноводы, нестандартная коаксиальная линия, измерительная оснастка, математическая обработка данных.

1. Введение

Векторный анализ объектов в стандартных коаксиальных трактах (N-тип, 3,5 мм, 2,92 мм, 2,4 мм) традиционно осуществляется с использованием серийной измерительной аппаратуры – векторных анализаторов цепей (VNA) – и стандартных встроенных калибровки и обработки данных. Пользователю предлагается множество способов калибровки VNA, обеспеченных широким набором доступных аттестованных калибровочных мер.

Совсем другим образом обстоит вопрос анализа объектов в нестандартных трактах. Пользователи при переходе от стандартных коаксиальных трактов VNA сталкиваются с целым рядом ограничений: отсутствие стандартных аттестованных переходов для широкой номенклатуры типов линий, отсутствие либо высокая трудоёмкость изготовления калибровочных мер для нестандартных, либо редко используемых трактов, отсутствие корректного описания подводящих и соединяющих линий для их исключения из результатов измерений (de-embedding).

Для решения задачи векторного анализа цепей в стандартных и нестандартных линиях передачи авторами предложен [1] и экспериментально верифицирован [2,3] Lr-метод, обеспечивающий выполнение вторичной калибровки в линии передачи с единственной неаттестованной калибровочной мерой – отрезком электрически длинной линии (L-меры), перенос плоскости измерения к физическим границам объекта и восстановление его S-параметров, нормированных относительно стандартного 50-Омного волнового сопротивления. Lr-метод обладает целым рядом достоинств: исключение требований к аттестации калибровочных мер, исключение влияния неповторяемости подключений при калибровке, определение постоянной распространения электромагнитной волны γ и учёт реального волнового сопротивления линии передачи. К недостаткам же метода следует отнести использование нестандартной математической обработки сигналов, не реализованной в известных программных библиотеках и встроенном ПО VNA. В связи с этим, важным аспектом внедрения Lr-метода является доступность его аппаратной реализации и возможность использования готовых программных средств для обработки данных.

В статье приведены отдельные аспекты аппаратно-программной реализации Lr-

метода в нестандартных коаксиальных трактах, металлических волноводах и микрополосковых линиях передачи.

2. Lr-метод векторного анализа для контроля параметров объектов

Известная 8-компонентная модель погрешности, описывающая входную и выходную цепи погрешности при анализе 2-портовых объектов, включает в себя 8 неизвестных комплексных величин, определение которых традиционно выполняют с использованием нескольких калибровочных мер. По результатам измерения параметров мер (одно комплексное число при измерении коэффициента отражения либо 4 комплексных числа при измерении параметров проходных мер) составляется система уравнений, из которой находят все искомые параметры модели погрешности.

Предлагаемый Lr-метод позволяет восстановить параметры входной $e_{ik}(f)$ $i, k = 0, 1$ и выходной $e_{ik}(f)$ $i, k = 2, 3$ цепи погрешности по измерению одной неаттестованной меры длиной L . Последовательность измерений представлена на рис. 1. Выполнение измерений в указанной последовательности обеспечивает исключение повторных присоединений и связанной с этим погрешностью, вызванной неповторяемостью соединений.

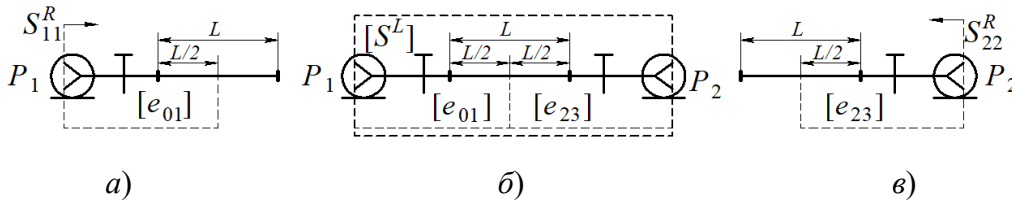


Рисунок 1. Этапы калибровки: *a* – измерение по первому порту; *b* – на проход; *в* – по второму порту

Таким образом, по результатам измерений единственной меры получают 6 результатов, представленных в виде комплексных коэффициентов отражения и передачи. Восстановление полной модели погрешности из 8 неизвестных по 6 уравнениям является некорректной задачей, однако это ограничение удаётся преодолеть использованием дополнительной обработки сигналов. Поправки на направленность $e_{00}(f)$, $e_{33}(f)$ и отношение коэффициентов передачи $\frac{e_{01}}{e_{32}} = k(f)$ могут быть найдены как средние линии квазипериодических комплексных функций частоты f :

$$e_{00}(f) \rightarrow \tilde{S}_{11}^L(f), \quad e_{33}(f) \rightarrow \tilde{S}_{22}^L(f),$$

$$\frac{e_{01}}{e_{32}} = k(f) \rightarrow \tilde{K}(f) = \sqrt{\frac{(S_{11}^R(f) - e_{00}(f))}{(S_{22}^R(f) - e_{33}(f))}}. \quad (1)$$

Математическую операцию поиска средних линий в (1) выполняют адаптивным фильтром типа скользящее окно. Существенно, что эти три параметра четырехполюсников ошибок получают не решением калибровочных уравнений на каждой частоте f , а математической процедурой фильтрации во всем частотном диапазоне.

После этого задача калибровки по результатам 6 измерений становится корректной. Согласование источников e_{11} , e_{22} определяют из S-параметров $S_{ik}^L(f)$:

$$\begin{aligned}
e_{11}(f) &= k(f) \frac{(S_{22}^L(f) - e_{33}(f))}{S_{12}^L(f)}, \\
e_{22}(f) &= \frac{(S_{11}^L(f) - e_{00}(f))}{(S_{21}^L(f)k(f))},
\end{aligned}
\tag{2}$$

а поправки на прохождение $e_{10}e_{32}$, $e_{01}e_{32}$ и на отражение $e_{10}e_{01}$, $e_{23}e_{32}$ - из коэффициентов передачи $S_{21}^L(f)$ и $S_{12}^L(f)$:

$$\begin{aligned}
e_{10}e_{32} &= (1 - e_{11}(f)e_{22}(f))S_{21}^L(f), \\
e_{01}e_{23} &= (1 - e_{11}(f)e_{22}(f))S_{12}^L(f), \\
e_{10}e_{01} &= (1 - e_{11}(f)e_{22}(f))k(f)S_{21}^L(f), \\
e_{23}e_{32} &= \frac{(1 - e_{11}(f)e_{22}(f))S_{12}^L(f)}{k(f)}.
\end{aligned}
\tag{3}$$

Существенно, что Lr-метод позволяет определить с высокой точностью постоянную распространения электромагнитной волны γ из коэффициентов отражения S_{11}^R и S_{22}^R :

$$T = \exp(-i\gamma L) = \pm \left[\frac{e_{00} - S_{11}^R}{e_{10}e_{01} + S_{11}^R e_{11} - e_{00}e_{11}}, \frac{e_{33} - S_{22}^R}{e_{32}e_{23} + S_{22}^R e_{22} - e_{22}e_{33}} \right] \tag{4}$$

и выполнять контроль S-параметров устройств относительно их физических границ. Знак «+» соответствует режиму холостого хода, а знак «-» - режиму короткого замыкания на дальнем конце линии при измерении S_{11}^R и S_{22}^R .

В случае работы с линиями с дисперсией дополнительно контролируется частотная зависимость волнового сопротивления для дальнейшего приведения S-параметров объекта к стандартному волновому сопротивлению 50 Ом. Подробное математическое описание метода дано в [1, 4].

3. Аппаратное обеспечение и калибровочные меры для Lr-метода

Измерительный стенд содержит векторный анализатор цепей (VNA), откалиброванный в стандартном коаксиальном тракте с применением одной из встроенных функций первичной калибровки. Для перехода к другим линиям передачи при реализации Lr-метода используются любые неаттестованные адаптеры-переходы: коаксиально-волноводные переходы (КВП) для различных видов волноводов, коаксиальные адаптеры либо коаксиально-полосковые переходы (КПП). Варианты такой оснастки-приведены на рис. 2.

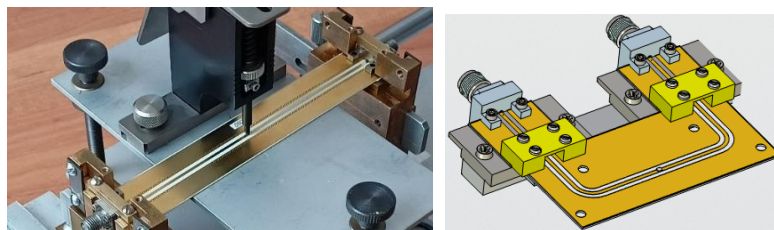


Рисунок 2. Контактное устройство с копланарной линией из углеводородной керамики R04350B и оснастка для подковообразных плат с установкой объектов методом пайки.

В случае использования КВП или коаксиальных адаптеров пользователем могут быть выбраны любые покупные изделия, подходящие по сечению тракта к портам

анализируемого объекта. В этом случае L-мера, как и собственно объект, изготавливается в заданном волноводном либо коаксиальном сечении и подключается с использованием стандартных переходов. В случае же КПП задача усложняется тем, что объект, установленный в микрополосковую линию, должен быть удалён от разёмов для формирования регулярной волны в окружающих линиях. Это означает, что конструкция оснастки должна не только включать в себя сами КПП, но и обеспечивать установку объекта на удалении от адаптеров. Поскольку для этого случая необходимо корректно перенести плоскость измерения через КПП к физическим границам объекта, а сами КПП в силу специфики преобразования типов волн в них обладают низкой повторяемостью, целесообразно выполнение оснастки с возможностью переподключения нескольких плат (калибровочной и с установленными объектами) к одному набору из двух КПП.

4. Программная реализация Lr-метода

Для эффективной реализации Lr-метода было разработано специальное ПО обработки измерительных данных. Исходные данные для обработки передаются в ПО через файлы результатов измерений в стандартном *.s2p формате (файлы типа Touchstone). Внешний вид интерфейса ПО представлен на рисунке 3.

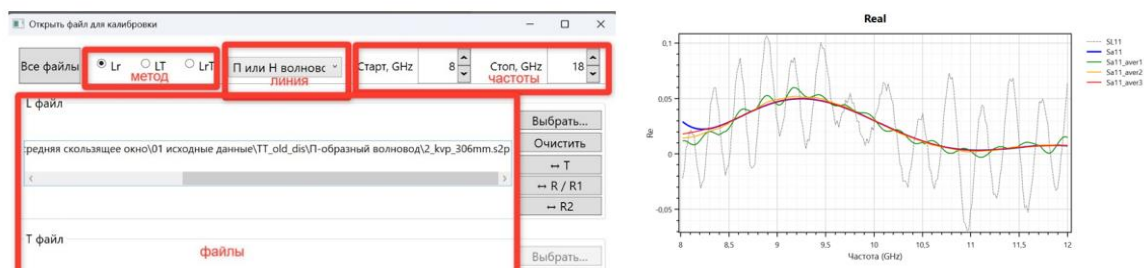


Рисунок 3. Внешний вид пользовательского графического интерфейса ПО обработки данных.

Математическая обработка реализована для нестандартных волноводов и микрополосковых линий. Для случая микрополосковой линии при обработке результатов используется усреднение по формуле (2) скользящим окном фиксированной ширины, для волноводов – адаптивным окном с определением ширины окна в каждой частотной точке. Усреднение – трёхступенчатое для снижения уровня шумов математической обработки, с предварительной доработкой данных вблизи границ частотного диапазона экстраполяцией методом МНК. Вывод данных – в графическом виде с пользовательскими настройками отображения либо выгрузкой данных в файл.

Разработанный программный код может быть использован в виде самостоятельного ПО контрольно-испытательного стенда, либо в качестве программного модуля в составе других программных комплексов, в т.ч. непосредственно в составе ПО VNA.

5. Некоторые экспериментальные результаты

Экспериментальная верификация Lr-метода и его аппаратно-программной реализации выполнена на примере анализа объектов в микрополосковых линиях, прямоугольных и П-образных волноводах, а также в коаксиальных линиях с миниатюрными SMP разъёмами (рис. 4). Результаты проведённых исследований опубликованы в [2÷4]. Продемонстрирована высокая сходимость получаемых результатов с параметрами объектов, полученными другими методами.

6. Заключение

L_r-метод контроля параметров объектов в нестандартных трактах является перспективным методом, позволяющим проводить корректное восстановление S-параметров двухпортовых объектов в их физических границах. При этом исключается необходимость использования комплектов аттестованных калибровочных мер, которые для многих трактов не существуют либо крайне сложны в изготовлении. Верификация метода выполнена в микрополосковых трактах, П-образных волноводах, а также в коаксиальных трактах с SMP разъёмами.

Ограничением при внедрении метода является отсутствие его стандартной реализации в ПО VNA и известных САПР. Для устранения этого ограничения разработано оригинальное программное решение в виде ПО с графическим пользовательским интерфейсом, осуществляющее автоматизированную обработку данных для определения S-параметров объектов с учётом результатов L_r-калибровки. По требованию заказчиков ПО может быть доработано и выполнено в виде программного модуля для его интеграции в другие пользовательские программные решения.

Аппаратная реализация метода в волноводных и коаксиальных линиях не представляет проблем и осуществляется с использованием стандартных переходов и отрезков линий. При проведении же измерений в микрополосковых линиях использование стандартных оснасток невозможно, поскольку большой разброс вариантов типов линий, их материалов и сечений не позволяет производителям выпустить один универсальный комплект адаптеров. Авторами реализована концепция специального контактного устройства с возможностью «горячей» замены калибровочных плат и плат с контролируемыми объектами, в т.ч. установленными методами пайки или поджима, которая прошла успешную апробацию в АО «НПО «Эркон» при контроле параметров SMD-компонентов [2].

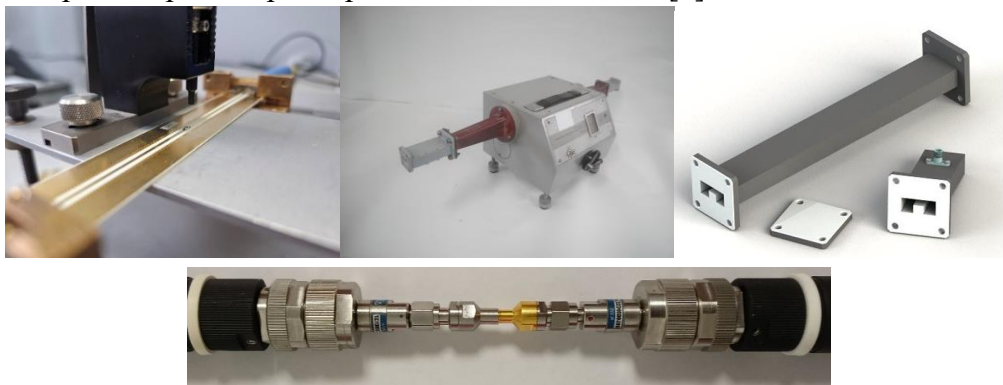


Рисунок 4. Объекты исследований L_r-методом в микрополосковом, волноводных и коаксиальных трактах.

Список литературы

1. Терентьев А. А., Лупанова Е. А., Никулин С. М., Петров В. В. Векторный анализ цепей в микрополосковых линиях передачи. *Ural Radio Engineering Journal*. 2025;9(3):340–355. DOI: 10.15826/urej.2025.9.3.006.
2. А.А. Терентьев, И.Н. Малышев, И.Г. Белков, С.М. Никулин, В.В. Петров. Векторный анализ SMD-электронных компонентов в микрополосковых линиях передачи // *Метрология в радиоэлектронике. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции*, 17-19 июня 2025 г., Нижний Новгород - Менделеево: ФГУП "ВНИИФТРИ", 2025.- 390 с. ISBN 978-5-6049203-9-8, стр. 51-58.
3. А.А. Терентьев, С.М. Никулин, В.В. Петров. Контроль параметров SMA-SMP переходов, SMP микроминиатюрных адаптеров и кабельных сборок // *Метрология в радиоэлектронике. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции*, 17-19 июня 2025 г.,

Нижний Новгород - Менделеево: ФГУП "ВНИИФТРИ", 2025.- 390 с. ISBN 978-5-6049203-9-8, стр. 217-223.

4. Герентьев А.А., Лупанова Е.А., Никулин С.М., Петров В.В. Контроль параметров печатных полосковых линий в микроволновом диапазоне электромагнитных волн. // Измерительная техника, 2024; 73(6): 57-63. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-6-55-61>.