

# LR и экспресс-метод контроля параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи

В.И. Евсеев, С.М. Никулин

ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Арзамас, Нижегородской обл.)

**Аннотация:** в работе рассмотрены LR и экспресс-метод измерения S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи, являющиеся развитием LRT-метода. Принципиальное отличие от известных решений состоит в использовании минимального набора калибровочных мер, причем экспресс-метод основан на использовании единственной меры в виде отрезка электрически длинной полосковой линии передачи.

**Ключевые слова:** коаксиально-полосковый переход, полосковая линия передачи, электронный компонент, волновое сопротивление

## 1. Введение

Задача контроля параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи состоит в исключении окружающих объект электрических цепей: - коаксиально-полосковых переходов с отрезками полосковых линий, из результатов измерений в стандартном коаксиальном канале. Общим недостатком всех существующих методов решения поставленной задачи является неповторяемость частотных характеристик разъемных контактов [1,2]. Суть проблемы состоит в том, что в процессе выполнения калибровочной процедуры, связанной с измерением S-параметров контактного устройства с калибровочными полосковыми мерами волнового сопротивления и решением системы калибровочных уравнений, решаемая задача, строго говоря, является некорректной. Разъемный контакт при каждом подключении калибровочной меры или отрезка полосковой линии с контролируемым электронным компонентом изменяет параметры окружающих электрических цепей. Поэтому количество неизвестных параметров даже при двух калибровочных измерениях с проходной и отражающей будет больше количества калибровочных уравнений. Это и приводит к решению некорректной задачи, в предположении о том, что окружающие цепи не меняют своих характеристик.

В настоящей работе предлагаются новые решения, которые сводят к минимуму и даже исключению влияния фактора неповторяемости разъемных контактов на результаты контроля параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи.

## 2. LR-метод контроля параметров электронных компонентов

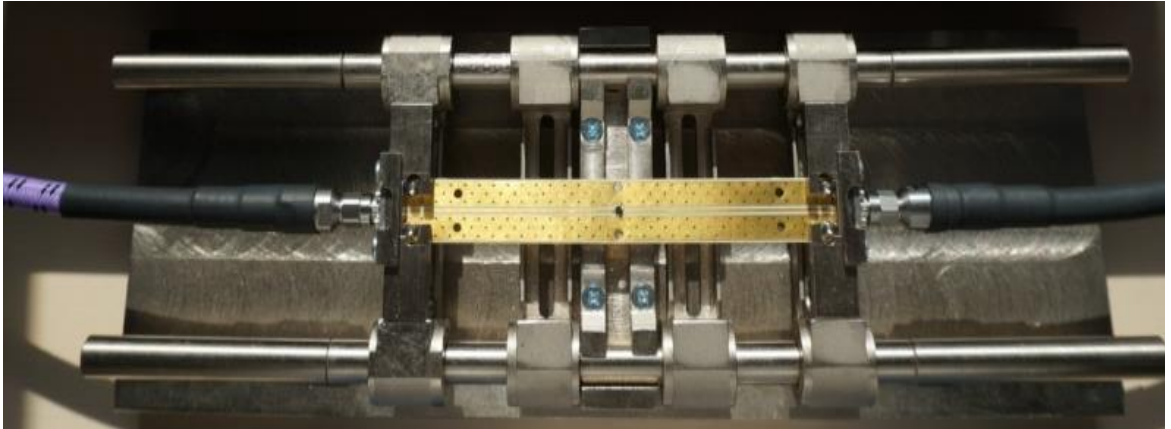
Сравнительно недавно стал известен оригинальный LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах [3], который, в отличие от известного TRL – метода, имеет совершенно иную математическую основу и неограничен по диапазону частот. Метод основан на измерении S-параметров L-соединения переходов, электрически длинной нестандартной линией передачи, T-соединения переходов короткой линией, а также измерении коэффициентов отражения от R-соединения переходов с отрезками нестандартных линий передачи в режиме холостого хода или короткого замыкания. Полученная измерительная

информация позволяет определить параметры переходов и исключить их влияние на результаты измерений объектов в нестандартных линиях передачи.

В отличие от LRT-метода LR-метод основан всего лишь на измерении S-параметров двух соединений: - L- и R-соединения [4,5]. Казалось бы полученной информации недостаточно для решения задачи исключения переходов из результатов измерения неизвестного объекта. Однако если предположить, что коэффициенты отражения от переходов со стороны коаксиальных разъемов  $S_{11}^a$  и  $S_{11}^b$  каким-либо способом определены, задача математически становится корректной. Как показано в [3], искомые величины  $S_{11}^a$  и  $S_{11}^b$  можно определить как средние линии коэффициентов отражения L-соединения. Тогда все остальные неизвестные S-параметры коаксиально-полосковых переходов вместе с отрезками полосковых линий длиной  $L/2$  следует определить по результатам измерения L- и R-соединения переходов с помощью сходящейся итерационной процедуры из соотношений:

$$\begin{aligned}
 S_{22}^b &= \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) \frac{S_{11}^L - S_{11}^a}{S_{21}^L}, \quad S_{21}^a S_{12}^a = S_{21}^L \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \\
 S_{22}^a &= \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) \frac{S_{22}^L - S_{11}^b}{S_{12}^L}, \quad S_{21}^b S_{12}^b = S_{12}^L \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \\
 S_{12}^a / S_{12}^b &= \sqrt{\frac{\Gamma_b (S_{11}^R - S_{11}^a) (1 - S_{22}^a \Gamma_a)}{\Gamma_a (S_{22}^R - S_{11}^b) (1 - S_{22}^b \Gamma_b)}}, \\
 \Gamma_a &= \frac{S_{11}^R - S_{11}^a}{S_{11}^R S_{22}^a - S_{11}^a S_{22}^a + S_{12}^a S_{21}^a}, \quad \Gamma_b = \frac{S_{22}^R - S_{11}^b}{S_{22}^R S_{22}^b - S_{11}^b S_{22}^b + S_{12}^b S_{21}^b}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Экспериментальные исследования LR-метода проводились с помощью анализатора цепей P4225 «Панорама» в диапазоне частот от 0.5 до 12 ГГц в контактном устройстве, показанном на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Контактное устройство для измерения S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи

Калибровочный набор, показанный на рисунке 2, состоял отрезка экранированной полосковой линии длиной 110 мм и двух короткозамкнутых линий длиной 55 мм, сформированных на одной подложке длиной 120мм, изготовленных из материала Rogers: RO4003C с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3.38 \pm 0.05$ , толщиной  $h = 0,305$ мм, шириной полоскового проводника  $W = 0,68$ мм и толщиной  $t =$

0,018мм.

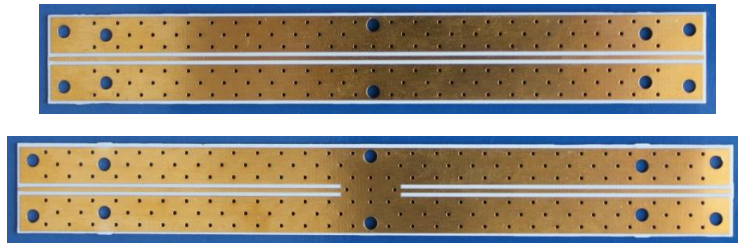


Рисунок 2. Калибровочный набор полосковых мер

В качестве объектов контроля, показанных на рисунке 3, были выбраны:

- ✓ оконечная двухсторонняя нагрузка, из параллельного соединения двух замкнутых на землю резисторов номиналом 100 Ом;
- ✓ параллельный резистор в отрезке линии длиной 120 мм из параллельного соединения двух замкнутых на землю резисторов номиналом 51 Ом;
- ✓ последовательный резистор номиналом 100 Ом, включенный в разрыве полосковой линии длиной 120 мм.

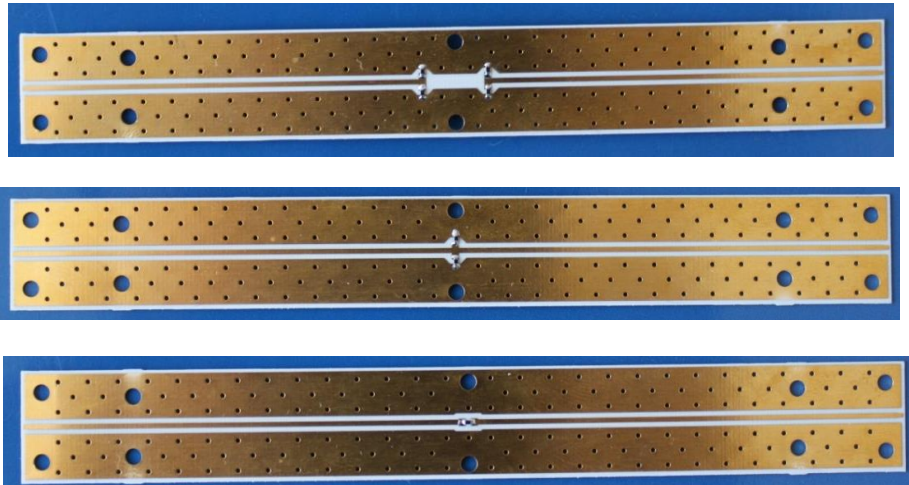


Рисунок 3. Калибровочный набор полосковых мер

Параметры рассеяния параллельного резистора, показанные на рисунке 4, после исключения влияния коаксиально-полосковых переходов с отрезками линий длиной 55 мм, на диаграмме полных сопротивлений имеют спиралевидный характер.

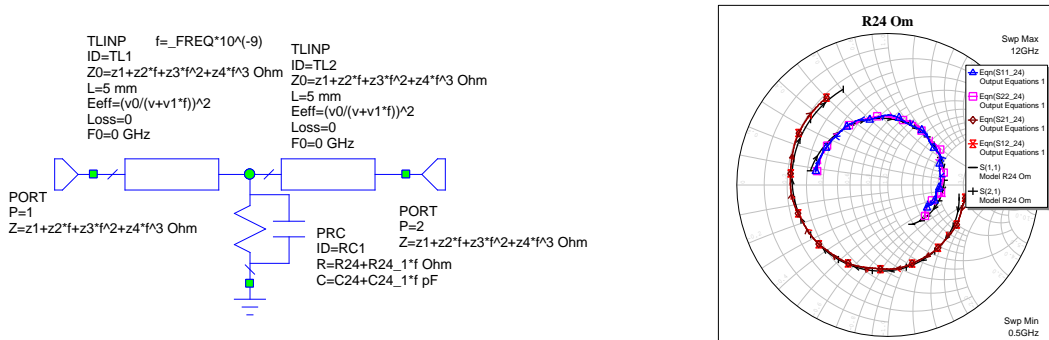


Рисунок 4. Параметры рассеяния параллельного резистора и его схемная модель в Microwave Office

Этот эффект объясняется влиянием неисключенного из результатов измерений

отрезка линии длиной 10 мм, в которую установлен параллельный резистор. На этом же рисунке приведена схемная модель объекта измерений в Microwave Office, состоящая из двух отрезков линий TLINP и элемент PRC в виде параллельного соединения частотно-зависимых сопротивления  $R(f)$  и емкости  $C(f)$ . Частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  и коэффициента передачи  $S_{21}$  схемной модели на графиках изображены в виде спиралевидных линий черного цвета. Восстановленные симплекс-методом параметры импеданса резистора имеют следующие значения:  $R_{24}=21.31$ ,  $R_{24\_1}=2.64$ ,  $C_{24}=-0.175$ ,  $C_{24\_1}=0.0169$ .

### 3. Экспресс-метод

Отношение коэффициентов передачи  $S_{12}^a/S_{12}^b$  определяет границу между цепями А и В. Если в качестве границы выбрать плоскость отсчета фазы, равноотстоящую от коаксиально-полосковых переходов, то в силу симметрии полосковой части цепей, отношение коэффициентов передачи можно приближенно определить как:

$$S_{12}^a/S_{12}^b = \sqrt{\frac{\Gamma_b (S_{11}^R - S_{11}^a)(1 - S_{22}^a \Gamma_a)}{\Gamma_a (S_{22}^R - S_{11}^b)(1 - S_{22}^b \Gamma_b)}} \Rightarrow \sqrt{S_{11}^R/S_{22}^R} \quad (2)$$

Причем в качестве  $S_{11}^R$  и  $S_{22}^R$  следует взять коэффициенты отражения от коаксиально-полосковых переходов в режиме холостого хода, т.е. без контакта с отрезком электрически длинной полосковой линии передачи. В этом случае потребуется единственная калибровочная мера волнового сопротивления в виде отрезка длинной линии и два измерения S-параметров контактного устройства с линией и без нее.

Таким образом, экспресс-метод контроля предполагает всего лишь одно подключение в контактное устройство калибровочной меры и вычисление искомым параметров цепей из соотношений:

$$\begin{aligned} S_{22}^a &= \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) \frac{S_{22}^{ab} - S_{11}^b}{S_{12}^{ab}}, \quad S_{22}^b = \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) \frac{S_{11}^{ab} - S_{11}^a}{S_{21}^{ab}}, \\ S_{21}^a S_{12}^a &= S_{21}^{ab} \left( \frac{S_{12}^a}{S_{12}^b} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \quad S_{21}^b S_{12}^b = S_{12}^{ab} \left( \frac{S_{12}^b}{S_{12}^a} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \\ S_{21}^a S_{12}^b &= S_{21}^{ab} (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \quad S_{21}^b S_{12}^a = S_{12}^{ab} (1 - S_{22}^a S_{22}^b) \end{aligned} \quad (3)$$

без итерационной процедуры.

В завершение анализа работоспособности экспресс-метода контроля S-параметров электронных компонентов приведем результаты определения параметров схемных моделей конечной нагрузки. Конечные нагрузки выполнены в виде двух прямоугольных контактных площадок, которыми заканчиваются полосковые проводники длиной 55 мм. В области контактных площадок профиль верхних заземленных экранов полосковой линии имеет трапецевидную выемку, что позволяет установить пайкой между экранами и контактной площадкой два резистора с номиналом 100 Ом, выполняющие функцию конечной нагрузки, как показано на рисунке 5.

Следует отметить, что S-параметры электронных компонентов были определены относительно волнового сопротивления полосковой линии, в которую он установлен.

Волновое сопротивление определено экспериментально по результатам

измерения коэффициентов отражения L-соединения. В результате удалось аппроксимировать частотную зависимость волнового сопротивления степенным полиномом 4-го порядка. Полученная зависимость введена в порты схемных моделей на рисунках 4 и 5.

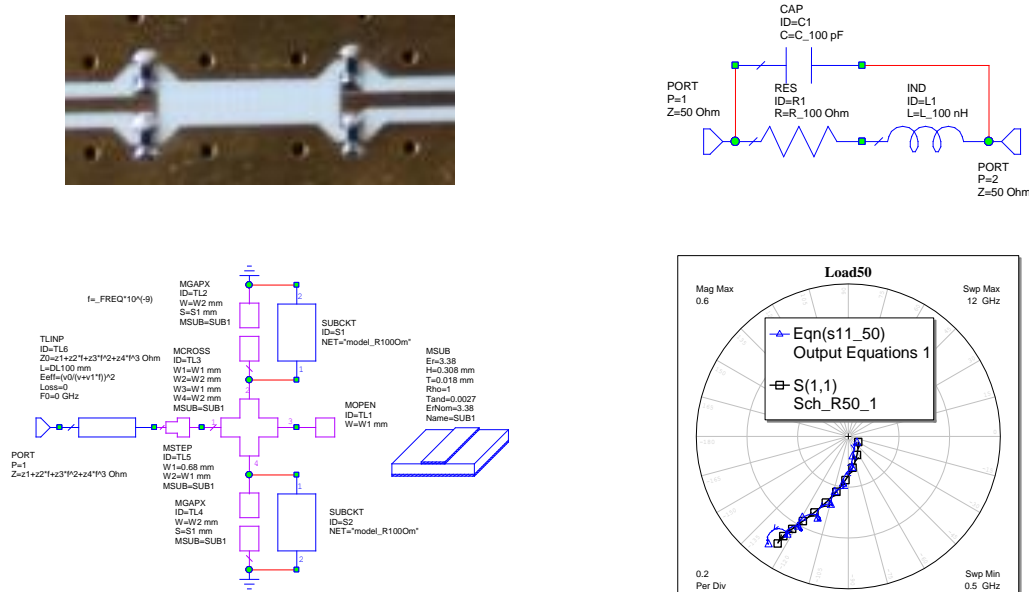


Рисунок 5. Внешний вид оконечной нагрузки, ее схемная топологическая модель и результаты определения параметров в полярной системе координат

#### 4. Заключение

Рассмотренные в работе новые LR и экспресс методы измерения S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи принципиально отличаются от известных, например, OSMT, TRL, TRM тем, что в их основе лежат, по сути, не косвенные, а прямые измерения параметров коаксиально-полосковых переходов с отрезками линий передачи. Причем наборы калибровочных мер минимальны, а в случае экспресс-метода это лишь одна мера: - отрезок электрически длинной полосковой линии. Единственным методическим недостатком обоих методов является поиск коэффициентов отражения со стороны коаксиальных разъемов как средних линий квазипериодических комплексных функций частоты электромагнитного поля.

#### Список литературы

1. Энген Г. Ф. Успехи в области СВЧ-измерений //ТИИЭР. – 1978. – Т. 66. – №. 4. – С. 8.
2. Дансмор Д. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей //Москва: ТЕХНОСФЕРА. – 2018.
3. Лавричев О. В., Никулин С. М. LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах //Датчики и системы. – 2017. – №. 8-9. – С. 39-44.
4. Патент РФ RU 2 710 514, 01.11.18 Авторы: В.И. Евсеев, С.М. Никулин, Способ измерения S-параметров объектов в нестандартных направляющих системах // Патент России RU 2 710 514, 2019, Бюл. №36.
5. Евсеев В. И. и др. Контроль параметров объектов в нестандартных направляющих системах и в свободном пространстве //Ural Radio Engineering Journal. 2019. Vol. 3.№ 1. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 53-71.