

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.1.004

УДК 621.317.621.3

Контроль параметров объектов в нестандартных направляющих системах и в свободном пространстве

В. И. Евсеев¹, Е. А. Лупанова², И. Н. Малышев³,
С. М. Никулин^{1, 2}✉, В. В. Петров²

¹ ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро»,
г. Арзамас, Нижегородская область, Россия

² Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

³ АО «НПО «ЭРКОН», г. Нижний Новгород, Россия

✉ nikulin-serg2006@yandex.ru

Аннотация

Обсуждаются методы контроля параметров устройств, электронных компонентов и материалов в нестандартных волноведущих системах и в свободном пространстве. Предложен оригинальный LR -метод исключения влияния переходов с отрезками нестандартных электрически длинных линий, основанный на итерационной процедуре обработки параметров рассеяния их сквозного L -соединения и R -соединения в режиме с отражающей нагрузкой. Рассмотрен способ определения фазовой скорости и коэффициента затухания электромагнитных волн в полосковых линиях и П-образном волноводе. Приведены результаты сопоставительного анализа методов контроля объектов в полосковых линиях передачи. Обсуждаются конструкции технических средств контроля параметров мощных СВЧ-резисторов.

Ключевые слова

нестандартная волноведущая система, свободное пространство, переход, S -параметры, электрически длинная линия передачи, фазовая скорость, коэффициент затухания, электронные компоненты.

Для цитирования

Евсеев В. И., Лупанова Е. А., Малышев И. Н., Никулин С. М., Петров В. В. Контроль параметров объектов в нестандартных направляющих системах и в свободном пространстве. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(1):53–71. DOI 10.15826/urej.2019.3.1.004

Control of objects parameters in non-standard guiding systems and in free space

V. I. Evseev¹, E. A. Lupanova², I. N. Malyshev³,
S. M. Nikulin^{1, 2}✉, V. V. Petrov²

¹ LLC “Arzamas Instrument Design Bureau”,
Arzamas, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation

² Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

³ JSC “SPA “ERKON”, Nizhny Novgorod, Russian Federation

✉ nikulin-serg2006@yandex.ru

Abstract

Methods for monitoring the parameters of devices, electronic components and materials in non-standard waveguide systems and in free space are discussed. The original LR-method for eliminating the effect of transitions with segments of non-standard electrically long lines is submitted. The method is based on the iterative procedure for processing the scattering parameters of their end-to-end L-connection and R-connection in the mode with the reflective load. The method for determining the phase velocity and attenuation coefficient of electromagnetic waves in striplines and the U-shaped waveguide is considered. The results of the comparative analysis of methods for monitoring objects in stripline transmission lines are introduced. The constructions of technical means for controlling the parameters of high-power microwave resistors are discussed.

Keywords

non-standard waveguiding system, free space, transition, *S*-parameters, electrically long transmission line, phase velocity, attenuation coefficient, electronic components

For citation

Evseev V. I., Lupanova E. A., Malyshev I. N., Nikulin S. M., Petrov V. V. Control of objects parameters in non-standard guiding systems and in free space. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(1):53–71. DOI 10.15826/urej.2019.3.1.004

1. Введение

Определение параметров объектов с нестандартными волноводными соединителями, электронных компонентов в полосковых линиях передачи и плоских образцов материалов в свободном пространстве представляет собой актуальную задачу теории и техники СВЧ. Примерами таких объектов являются широкополосные усилители СВЧ-мощности на основе лампы бегущей

волны с П- либо Н-образными волноводами в выходном сечении, пассивные (резисторы, поглотители, конденсаторы, катушки индуктивности, аттенюаторы) и активные (полупроводниковые диоды и транзисторы) компоненты для поверхностного монтажа в полосковые линии передачи, поглощающие покрытия и радиопрозрачные материалы.

В литературе известно достаточно большое число работ, в которых обсуждались те или иные аспекты решаемых измерительных задач в нестандартных направляющих системах [1, с. 133–152; 2–5]. В настоящей работе предлагается принципиально новое решение задачи измерения S -параметров устройств с нестандартными соединителями, электронных компонентов в полосковых линиях передачи и объектов в свободном пространстве. Предлагаемый LR -метод, является развитием LRT -метода [6]. В основу метода положен алгоритм поиска средней линии квазипериодической комплексной функции частоты и итерационная процедура определения параметров переходов с отрезками электрически длинных линий по результатам измерения S -параметров их сквозного соединения и коэффициентов отражения с отражающими нагрузками холостого хода или короткого замыкания.

2. LR -метод контроля параметров объектов в нестандартных направляющих системах и в свободном пространстве

Предлагаемый LR -метод контроля S -параметров объектов в нестандартных волноведущих системах основан на оригинальной процедуре исключения влияния переходов, соединяющих между собой коаксиальную и нестандартную линию, по результатам измерения их L - и R -соединений с отрезками электрически длинных линий передачи. В отличие от всех существующих методов, основанных на косвенных методах измерений и решении системы линейных уравнений относительно искомым параметров переходов, LR -метод, по сути, реализует их прямые измерения в сочетании с итерационной процедурой обработки данных.

Суть предлагаемого решения состоит в соединении двух переходов (рис. 1) с внешними коаксиальными разъемами электрически длинной, например, полосковой линией передачи длиной L и измерении S -параметров такого L -соединения: S_{11L} , S_{21L} , S_{12L} , S_{22L} . Переходы с отрезками нестандартных линий длиной $L/2$ образуют две электрические цепи А и В, включенные навстречу друг другу. Комплексные коэффициенты отражения S_{11}^a

и S_{11}^b от цепей А и В со стороны их коаксиальных разъемов являются средними линиями квазипериодических функций частоты f – $S_{11L}(f)$, и $S_{22L}(f)$:

$$\begin{aligned} S_{11L}(f) &= S_{11}^a(f) + S_{21}^a(f)S_{12}^a(f)S_{22}^b(f)\exp(-i2\gamma(f)L) + \dots, \\ S_{22L}(f) &= S_{11}^b(f) + S_{21}^b(f)S_{12}^b(f)S_{22}^a(f)\exp(-i2\gamma(f)L) + \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\gamma(f) = 2\pi f / v(f) - i\alpha(f)$ – постоянная распространения, $v(f)$ – фазовая скорость, $\alpha(f)$ – коэффициент затухания электромагнитной волны в линии передачи.

Алгоритмы определения средних линий квазипериодических функций известны и применительно к рассматриваемому методу обсуждались в работе [6].

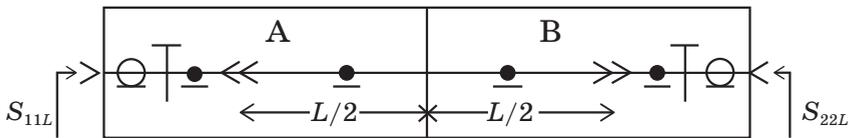


Рис. 1. L -соединение переходов отрезком линии длиной L

Fig. 1. L -junction transitions with a line segment of length L

Коэффициенты отражения S_{22}^a , S_{22}^b от переходов со стороны нестандартных отрезков линий передачи длиной $L/2$, произведения прямого и обратного коэффициентов передачи $S_{21}^a S_{12}^a$ и $S_{21}^b S_{12}^b$ цепей А и В, определяют с помощью итерационной процедуры вычислений из соотношений:

$$\begin{aligned} S_{22}^a &= \frac{S_{22L} - S_{11}^b}{S_{12L}} \left(\frac{S_{21}^b}{S_{12}^a} \right), \\ S_{22}^b &= \frac{S_{11L} - S_{11}^a}{S_{21L}} \left(\frac{S_{12}^a}{S_{21}^b} \right), \\ S_{21}^a S_{12}^a &= S_{21L} \left(\frac{S_{12}^a}{S_{21}^b} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \\ S_{21}^b S_{12}^b &= S_{12L} \left(\frac{S_{21}^b}{S_{12}^a} \right) (1 - S_{22}^a S_{22}^b), \end{aligned} \quad (2)$$

по результатам измерения S -параметров S_{ikL} , $i, k = 1, 2$ L -соединения. Причем отношение S_{12}^a / S_{21}^b коэффициентов передачи цепей А, В и коэффициенты отражения Γ_a , Γ_b от торцов нестандартных линий вычисляются по результатам измерения коэффициентов отражения S_{11R} , S_{22R} , от R -соединений (рис. 2) переходов с отрезками нестандартных линий длиной $L/2$ в режиме холостого хода или короткого замыкания:

$$S_{12}^a / S_{21}^b = \sqrt{\frac{(S_{11R} - S_{11}^a)(1 - S_{22}^a \Gamma_a)}{(S_{22R} - S_{11}^b)(1 - S_{22}^b \Gamma_b)}},$$

$$\Gamma_a = \frac{S_{11R} - S_{11}^a}{S_{11R} S_{22}^a - S_{11}^a S_{22}^a + S_{12}^a S_{21}^a},$$

$$\Gamma_b = \frac{S_{22R} - S_{11}^b}{S_{22R} S_{22}^b - S_{11}^b S_{22}^b + S_{12}^b S_{21}^b}.$$
(3)

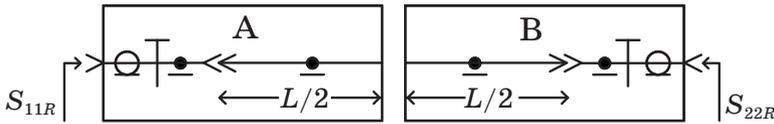


Рис. 2. R-соединения переходов с отрезками линий длиной $L/2$
 Fig. 2. R-junction transitions with the line segments of length $L/2$

Итерационная процедура определения параметров переходов сходится настолько быстро, что результаты вычислений на третьем и четвертом шаге вычислений практически не отличаются друг от друга и процедуру можно уверенно полагать завершенной.

Последним этапом определения параметров цепей А, В является вычисление произведений их коэффициентов передачи в прямом и $S_{21}^a S_{12}^b$ обратном $S_{12}^a S_{21}^b$ направлениях:

$$S_{21}^a S_{12}^b = S_{21L} (1 - S_{22}^a S_{22}^b),$$

$$S_{12}^a S_{21}^b = S_{12L} (1 - S_{22}^a S_{22}^b),$$
(4)

Волновые параметры рассеяния объекта X определяют по результатам измерения S -параметров в коаксиальном канале устройства, состоящего из каскадного соединения двух A_1, B_1 переходов с отрезками линий длиной L_1 и L_2 , между которыми устанавливают измеряемый объект, как показано на рис. 3, из соотношений¹:

$$Z = S_{22}^a (S_{22}^b \det S - S_{11} \det S_b) + (\det S_b - S_{22} S_{22}^b) \det S_a,$$

$$S_{11}^x = \frac{(\det S - S_{11}^a S_{22}^b) S_{22}^b - (S_{11} - S_{11}^a) \det S_b}{Z} \exp(-i2\gamma(L/2 - L_1)),$$

$$S_{21}^x = \frac{S_{21} S_{12}^a S_{21}^b}{Z} \exp(-i2\gamma(L/2 - L_1)(L/2 - L_2)),$$

$$S_{12}^x = \frac{S_{12} S_{21}^a S_{12}^b}{Z} \exp(-i2\gamma(L/2 - L_1)(L/2 - L_2)),$$

$$S_{22}^x = \frac{(\det S - S_{11}^b S_{11}^a) S_{22}^a - (S_{22} - S_{11}^b) \det S_a}{Z} \exp(-i2\gamma(L/2 - L_2)),$$
(5)

¹ Длины отрезков линий L_1 и L_2 обычно выбирают равными $L/2$.

здесь $\det S = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$, $\det S_{a,b} = S_{11}^{a,b}S_{22}^{a,b} - S_{12}^{a,b}S_{21}^{a,b}$, – определители S -матрицы.

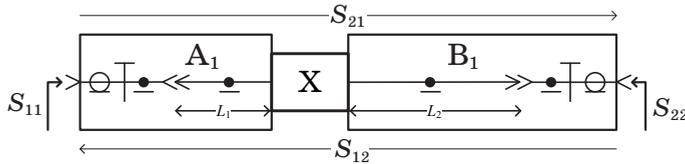


Рис. 3. Соединение переходов с отрезками линии длиной L_1 , L_2 и объектом X

Fig. 3. Connecting transitions with the line segments of length L_1 , L_2 and object X

Предложенная процедура определения параметров цепей А, В LR -методом в зависимости от объекта измерения реализуется в следующих вариантах:

- коаксиально-полосковые переходы и полосковые линии, причем отрезки полосковых линий длиной $L/2$ могут выполняться как на едином изоляционном основании, так и на отдельных подложках в зависимости условий установки электронных компонентов между этими линиями;

- коаксиально-волноводные переходы и два отрезка волновода нестандартного сечения длиной $L/2$, соединенные друг с другом фланцевым соединением. R -соединение переходов с отрезками волноводов длиной $L/2$ в режиме короткого замыкания выполняют с помощью металлической пластины, установленной между фланцами волноводов, а измеряемый объект подключают между этими фланцами после удаления пластины короткозамыкателя;

- две антенны с коаксиальными разъемами, установленные на расстоянии L много большем длин волн λ в заданном диапазоне частот при измерении электромагнитных характеристик плоских образцов материалов LR -методом в свободном пространстве. Функцию электрически длинной линии выполняет свободное пространство между антеннами. R -соединение получают с помощью металлической пластины, установленной между антеннами на расстоянии $L/2$. Измеряемый образец помещают вместо пластины короткого замыкания.

В отличие от всех известных методов измерений объектов в нестандартных направляющих системах, LR -метод реализует по сути прямые, а не косвенные методы измерения параметров переходов при отсутствии жесткого ограничения на диапазон частот. Причем LR -метод в значительной степени свободен от методической погрешности, вызванной неповторяемостью характеристик разъемного контакта между переходом и нестандартной линией передачи. Такой результат объясняется тем, что S -параметры пе-

реходов вместе с отрезками линий определяются по результатам измерений, по существу одной калибровочной меры волнового сопротивления – отрезка электрически длинной линии передачи. Слабо влияющим фактором методической погрешности является использование результатов измерения коэффициентов отражения от R -соединений переходов с отрезками линий в режиме холостого хода или короткого замыкания для определения отношения коэффициентов передачи цепей А и В из соотношений (3).

3. Измерение фазовой скорости и коэффициента затухания электромагнитных волн в полосковой линии и П-образном волноводе

Фазовую скорость $v(f)$ и коэффициент затухания $\alpha(f)$ электромагнитной волны в нестандартных волноведущих системах предлагается определять из отношения коэффициентов передачи переходов S_{21L} , S_{21l} соединенных между собой отрезками электрически длинных линий разной длины L и l . Причем разность длин этих отрезков должна быть достаточно большой, чтобы получать высокую точность искомых величин из соотношений:

$$T(f) = S_{21L}/S_{21l} = \exp(-i\gamma(L-l)) \left(1 - S_{22}^a S_{22}^b \exp(-2i\gamma l) + \dots\right),$$

$$v(f) = -2\pi f(L-l) / \left(\arg(T(f) - 2\pi(k-n))\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

$$\alpha(f) = -1000 \ln|T(f)| / (L-l) \text{ неп/м.}$$

Измерения коэффициентов передачи соединений коаксиально-полосковых переходов отрезками линий длиной $L = 240$ мм и $l = 120$ мм, изготовленных из материала RO4003с толщиной 0,508 мм, с шириной полоскового проводника 1,14 мм и толщиной 0,035 мм проводились в контактном устройстве с подвижным коаксиально-полосковым переходом, показанном на рис. 4.

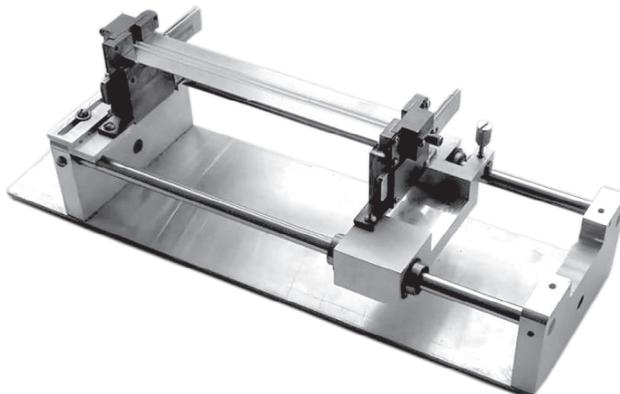


Рис. 4. Контактное устройство с полосковой линией длиной 120 мм

Fig. 4. Contact device with a 120 mm strip line

Результаты определения фазовой скорости $v \times 10^6$ м/с и коэффициента затухания α неп/м в полосковой линии, показаны на рис. 5.

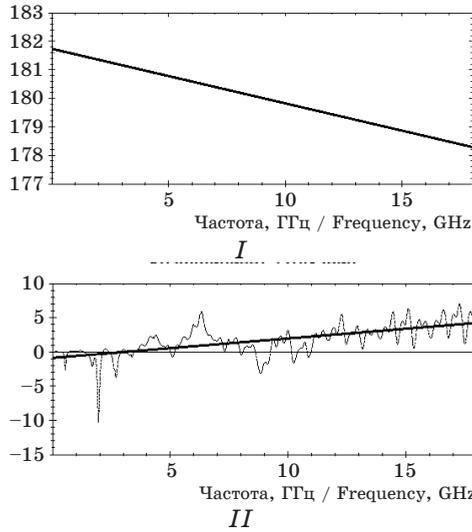


Рис. 5. Частотные зависимости фазовой скорости (*I*) и коэффициента затухания (*II*) в полосковой линии

Fig. 5. Frequency dependences of phase velocity (*I*) and attenuation coefficient (*II*) in the strip line

Результаты определения фазовой скорости и коэффициента передачи электромагнитной волны в П-образном волноводе приведены на рис. 6.

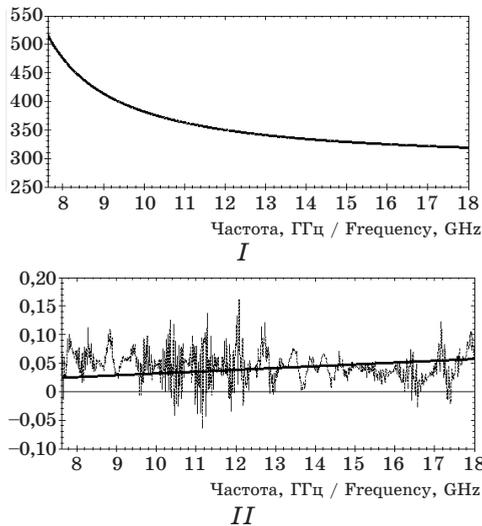


Рис. 6. Частотные зависимости фазовой скорости (*I*) и коэффициента затухания (*II*) в П-образном волноводе

Fig. 6. Frequency dependences of the phase velocity (*I*) and attenuation coefficient (*II*) in a U-shaped waveguide

4. Сопоставительный анализ контроля объектов в полосковых линиях передачи

Сопоставительный анализ LR -метода с LRT -методом контроля объектов в нестандартных волноведущих системах выполнен на примере полосковых линий, изготовленных из фольгированных материалов RO4003c и AD255. Параметры полосковых мер приведены в табл. 1.

Каждый комплект состоял из следующего набора мер: линии длиной 240 мм, 120 мм и 20 мм, мера короткого замыкания. Калибровка LR -методом выполнялась на линиях длиной 240 мм и 120 мм. При калибровке LRT -методом использовалась длинная линия 240 мм для нахождения комплексных коэффициентов отражения S_{11}^a и S_{11}^b от цепей А и В со стороны их коаксиальных разъемов как средних линий квазипериодических функций. Для поиска средней линии в данном случае используется алгоритм минимакса. Для сравнения калибровка LRT -методом выполнялась на двух линиях длиной 20 мм и 120 мм. То есть сравнивались не только разные методы калибровки, но и калибровка одним и тем же методом на разных мерах.

Таблица 1. Параметры полосковых мер
Table 1. Stripline measures parameters

Материал	Толщина подложки, мм	Ширина проводника, мм	Обозначение комплекта мер
RO4003c	0,813	1,84	01
RO4003c	1,524	3,50	02
AD255	2,032	5,64	03

При анализе методов были рассмотрены результаты калибровки и результаты обработки измерения объектов. В качестве объекта была выбрана мера 120 мм.

В качестве способа оценки LR - и LRT -методов калибровки были выбраны эллипсы рассеяния. Эллипсы рассеяния позволяют оценить как разброс полученных значений, так и коэффициент корреляции измеряемых величин. В нашем случае случайными величинами являются действительное и мнимое значение полученного S -параметра.

Для построения эллипса необходимо иметь результаты нескольких измерений (процедуры калибровки и измерений выполнялись 20 раз). Результаты измерений статистически обрабатываются с тем, чтобы определить математическое ожидание величины и среднеквадратичное отклонение. Затем исключаются ошибочные измерения. Ошибочными считаются измерения, для которых расстояние до точки математического ожидания

более чем в два раза превышает среднеквадратичное отклонение. После исключения ошибочных параметров процедура статистической обработки повторяется для валидных точек.

Параметры эллипса рассеяния определены по формулам

$$\alpha = \frac{\operatorname{arctg}\left(\frac{2r\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}\right)}{2},$$

$$\sigma_1^2 = \sigma_x^2 \cos^2 \alpha + r\sigma_x\sigma_y \sin 2\alpha + \sigma_y^2 \sin^2 \alpha,$$

$$\sigma_2^2 = \sigma_x^2 \sin^2 \alpha - r\sigma_x\sigma_y \sin 2\alpha + \sigma_y^2 \cos^2 \alpha,$$

$$\frac{x^2}{\sigma_1^2} + \frac{y^2}{\sigma_2^2} = 1,$$
(7)

где σ_x, σ_y – это среднеквадратичные отклонения действительной и мнимой части S -параметра, r – коэффициент корреляции между действительным и мнимым S -параметра.

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле Пирсона. Для каждой частотной точки рассчитываются свои статистические параметры и строится свой эллипс.

Примеры эллипсов рассеяния приведены на рис. 7. Ось X – действительное, ось Y – мнимое анализируемого параметра.

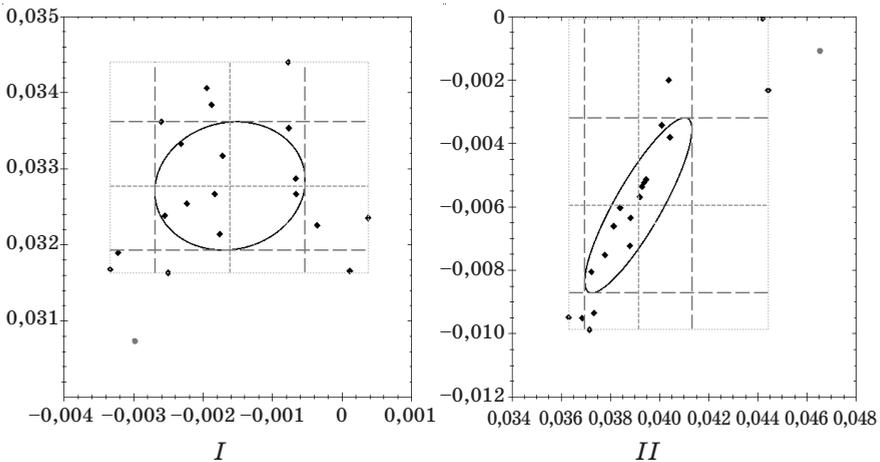


Рис. 7. Графики эллипсов рассеяния коэффициента отражения S_{22}^a от перехода со стороны нестандартных отрезков линий передачи, рассчитанного LR -методом, для комплекта мер 02:
 I – частота – 1,9 ГГц. Коэффициент корреляции – 0,089;
 II – частота – 5,2 ГГц, коэффициент корреляции – 0,8665

Fig. 7. Graphs of the scattering ellipses of the reflection coefficient S_{22}^a from the transition from non-standard segments of the transmission lines, calculated by the LR method:
 I – the frequency is 1.9 GHz, the correlation coefficient – 0.089;
 II – the frequency is 5.2 GHz, the correlation coefficient – 0.8665

V. I. Evseev, E. A. Lupanova, I. N. Malyshev, S. M. Nikulin, V. V. Petrov | Control of objects parameters in non-standard guiding systems and in free space

Для анализа рассеяния во всей полосе частот были построены графики, на которых все эллипсы рассеяния были наложены друг на друга с центром в одной точке. Пример такого графика приведен на рис. 8.

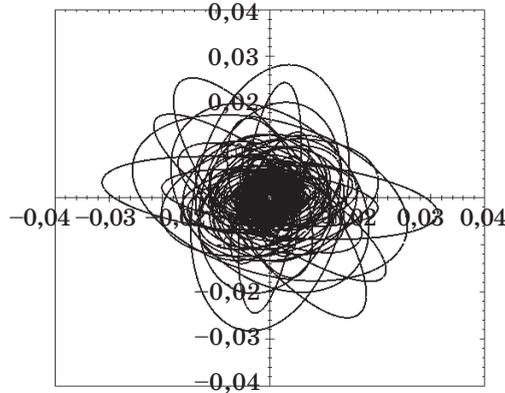


Рис. 8. График совмещенных эллипсов рассеяния коэффициента отражения S_{22}^a от перехода со стороны нестандартных отрезков линий передачи, рассчитанного LR-методом

Fig. 8. Graph of the combined scattering ellipses of the reflection coefficient S_{22}^a from the transition from non-standard segments of the transmission lines, calculated by the LR method

При совмещении эллипсов рассеяния во всем диапазоне частот можно оценить точность каждого из анализируемых методов калибровки.

Результаты сравнения графиков приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Эллипсы рассеяния S -параметров переходов

Table 2. Scattering ellipses of transition S -parameters

Комплек- мер	Метод калибровки	S_{22}^a	S_{22}^a	$S_{21}^a S_{12}^a$	$S_{21}^a S_{12}^a$	S_{22}^b	S_{22}^b	$S_{21}^b S_{12}^b$	$S_{21}^b S_{12}^b$
		re	im	re	im	re	im	re	im
01	LR-метод	0,024	0,024	0,052	0,052	0,02	0,02	0,055	0,065
	LRT-метод (мера 20 мм)	0,07	0,12	0,09	0,085	0,08	0,055	0,062	0,055
	LRT-метод (мера 120 мм)	0,010	0,015	0,017	0,019	0,014	0,016	0,014	0,015
02	LR-метод	0,032	0,029	0,055	0,046	0,03	0,026	0,065	0,067
	LRT-метод (мера 20 мм)	0,07	0,16	0,1	0,1	0,22	0,08	0,045	0,045
	LRT-метод (мера 120 мм)	0,03	0,025	0,028	0,021	0,045	0,05	0,032	0,026
03	LR-метод	0,038	0,036	0,055	0,057	0,034	0,04	0,063	0,05
	LRT-метод (мера 20 мм)	0,6	0,4	0,2	0,28	0,6	0,45	0,5	0,45
	LRT-метод (мера 120 мм)	0,09	0,12	0,053	0,063	0,07	0,06	0,065	0,07

Таблица 3. Эллипсы рассеяния S -параметров измеряемого объектаTable 3. Scattering ellipses of measuring object S -parameters

Комплект мер	Метод измерений	S_{11}^x re	S_{11}^x im	S_{12}^x re	S_{12}^x im	S_{21}^x re	S_{21}^x im	S_{22}^x re	S_{22}^x im
01	LR-метод	0,042	0,024	0,036	0,026	0,039	0,026	0,034	0,042
	LRT-метод (мера 20 мм)	0,065	0,062	0,13	0,1	0,125	0,1	0,045	0,036
	LRT-метод (мера 120 мм)	0,023	0,022	0,09	0,011	0,09	0,011	0,028	0,022
02	LR-метод	0,042	0,038	0,025	0,038	0,027	0,038	0,04	0,038
	LRT-метод (мера 20 мм)	0,07	0,065	0,15	0,065	0,14	0,067	0,026	0,03
	LRT-метод (мера 120 мм)	0,04	0,044	0,013	0,013	0,013	0,013	0,03	0,03
03	LR-метод	0,065	0,08	0,065	0,08	0,062	0,08	0,125	0,13
	LRT-метод (мера 20 мм)	0,8	0,75	1,32	1,28	1,32	1,28	0,65	0,7
	LRT-метод (мера 120 мм)	0,09	0,045	0,04	0,05	0,04	0,05	0,083	0,095

Кроме максимальных значений рассеяния, на графиках также хорошо видна плотность распределения величины. Например, на рис. 9 видно, что разброс значений при LR-калибровке больше, чем при LRT-калибровке, но если оценить плотность эллипсов рассеяния, то хорошо видно, что большинство эллипсов уложились в границу порядка 0,008. В то время как при LRT-калибровке все эллипсы приблизительно одинаковые и укладываются в границы 0,01.

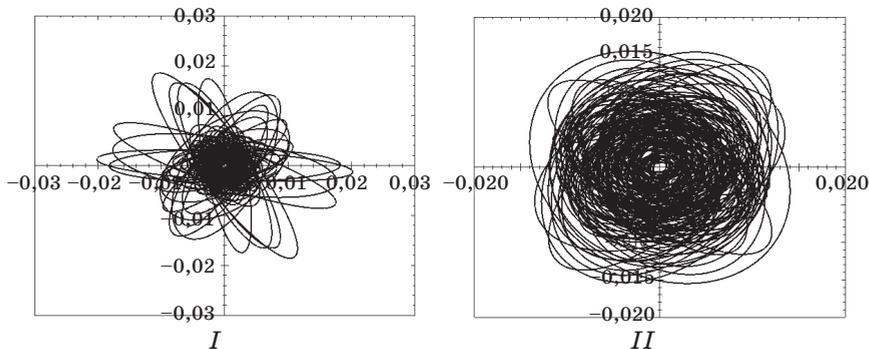


Рис. 9. Графики совмещенных эллипсов рассеяния коэффициента отражения S_{22}^b от перехода со стороны нестандартных отрезков линий передачи, для комплекта мер 01:

I – рассчитанный LR-методом;

II – рассчитанный LRT-методом для линии длиной 120 мм

Fig. 9. Graphs of the combined scattering ellipses of the reflection coefficient S_{22}^b from the transition in the non-standard segments of transmission lines, for set 01:

I – calculated by the LR method;

II – calculated by the LRT method for a line 120 mm long

На рис. 10 приведены графики совмещенных эллипсов рассеяния для обратного коэффициента передачи S_{12}^x объекта из комплекта мер 02. Хорошо видно, что плотность эллипсов рассеяния для *LRT*-метода на мере 120 мм заметно выше, чем на других графиках. Это объясняется тем, что калибровка выполнялась на той же мере, которая потом была выбрана в качестве объекта измерения.

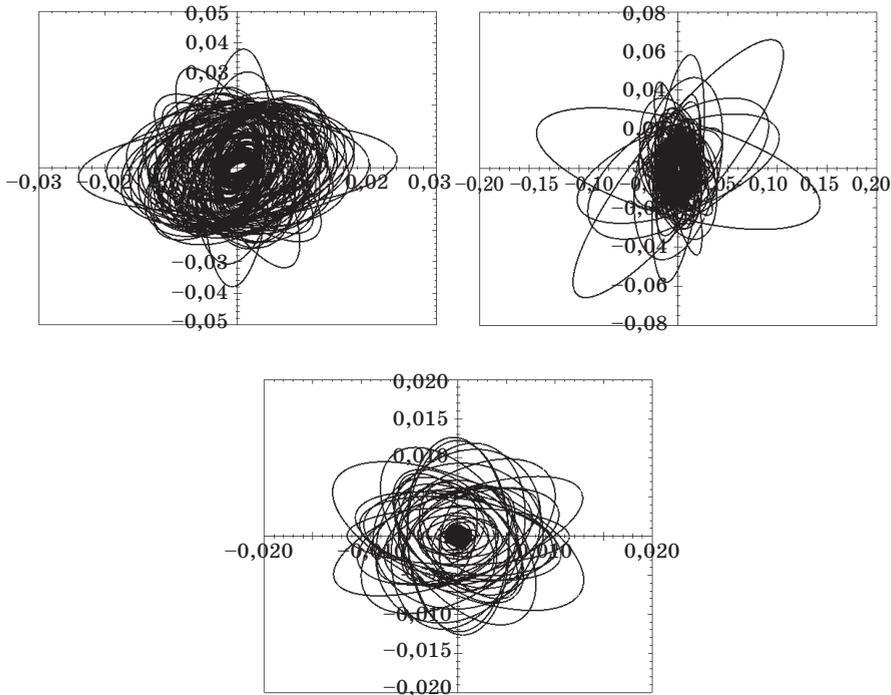


Рис. 10. Графики совмещенных эллипсов рассеяния для обратного коэффициента передачи S_{12}^x объекта

Fig. 10. Graphs of the combined scattering ellipses for the inverse transfer coefficient S_{12}^x of the object

В ходе выполнения сравнительного анализа были сделаны следующие выводы:

- комплексные коэффициенты отражения S_{22}^a, S_{22}^b от перехода со стороны нестандартных отрезков линий передачи, рассчитанные *LR*- и *LRT*-методом (мера 120 мм) являются сопоставимыми;
- для произведений прямого и обратного коэффициентов передачи $S_{21}^a S_{12}^a$ и $S_{21}^b S_{12}^b$ цепей А и В *LRT*-метод на мере 120 мм дает стабильно более хорошие результаты;
- результаты калибровки *LRT*-методом на мере 20 мм заметно хуже, чем для других двух калибровок;

- результаты для объекта заметно лучше для *LRT*-метода на мере 120 мм;
- результаты для объекта сопоставимы для *LR*- и *LRT*-метода на мере 20 мм.

Плохие результаты для *LRT*-метода на мере 20 мм можно объяснить особенностью конструкции контактного устройства. Расстояние между зажимами не позволяет точно зафиксировать меру 20 мм с обеих сторон. Это значит, что результаты, полученные на этой мере, наглядно демонстрируют проблему неповторяемости соединителя. Нам не удалось 20 раз с приемлемой точностью повторить соединение меры с контактным устройством, что наглядно демонстрируют эллипсы рассеяния, полученные для *S*-параметров этого соединения.

Использование одной и той же меры и для калибровки, и в качестве объекта объясняет, почему *LRT*-метод на мере 120 мм дает для объекта особенно хорошие результаты.

В целом можно сказать, что *LR*- и *LRT*-методы очень похожи и дают сопоставимые результаты. Для дальнейшего изучения *LR*-метода имеет смысл сравнить его с принципиально другими методами калибровки, например *OSM*-методом.

5. Контроль параметров мощных СВЧ-резисторов

Для определения параметров мощных СВЧ-резисторов разработана оригинальная конструкция универсального контактного устройства, позволяющая контролировать параметры как оконечных нагрузок, так и проходных резисторов всех выпускаемых типоразмеров. Разработанная оснастка построена по модульному принципу, позволяющему скомпоновать ее под заданный тип резистора. Внешний вид универсальной оснастки, скомпонованной для измерения параметров оконечных нагрузок, рассчитанных на диапазон частот до 18 ГГц, приведен на рис. 11. На рис. 12 показана конструкция, ориентированная на измерение параметров оконечных нагрузок и проходных резисторов мощностью от 10 до 1000 Вт.

В состав модульного контактного устройства входят:

- основание с направляющей для обеспечения соосности остальных модулей;
- переходы с коаксиального на микрополосковый тракт;
- устройства прижима;
- носители под различные типоразмеры оконечных и проходных резисторов.

Для подключения к анализатору цепей в диапазоне частот до 18 ГГц применен разъем сечением 3,5/1,5 типа southwest

microwave 292-04A-5, а в диапазоне частот до 8 ГГц используются разъемы сечением 7/3 типа southwest microwave 311-03SF с переходом 290-36G.

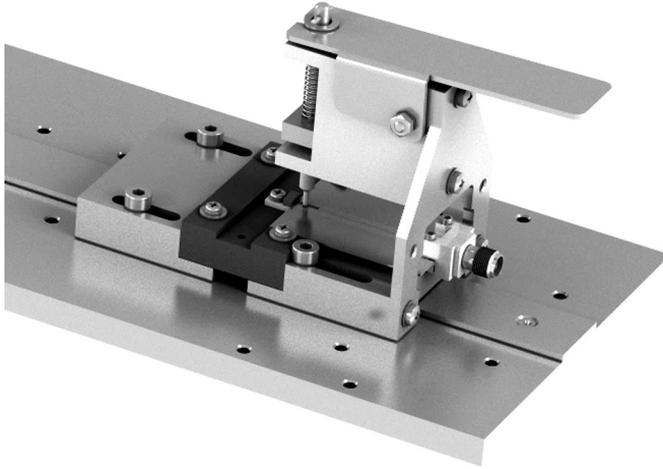


Рис. 11. Контактное устройство для измерений в полосе частот до 18 ГГц

Fig. 11. Contact device for measurements in the frequency band up to 18 GHz

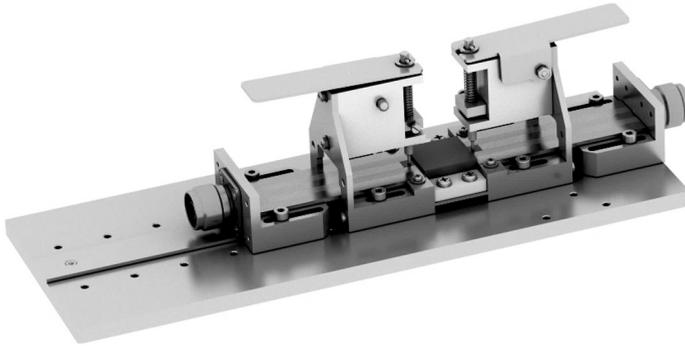


Рис. 12. Контактное устройство для измерений в полосе частот до 8 ГГц

Fig. 12. Contact device for measurements in the frequency band up to 8 GHz

Измеряемый объект крепится винтами к специальному носителю, также устанавливаемому на основание. Под каждую группу изделий, имеющих одинаковые размеры, спроектировано отдельное основание, обеспечивающее требуемое расположение изделия относительно переходов. Подключение изделий к полоскам переходов осуществляется с помощью прижимного устройства с диэлектрическим прижимным элементом. Конструкция

основания позволяет устанавливать переходы и устройства прижима на различном расстоянии друг от друга, что позволяет проводить измерения и выполнять калибровочные процедуры для различных типоразмеров резисторов.

Для исключения влияния коаксиально-полосковых переходов и отрезков полосковых линий на результаты контроля изделий использована OSM-калибровка. Параметры полосковых мер волнового сопротивления определены LR -методом в оснастке, показанной на рис. 4. Меры короткого замыкания (рис. 13) представляют собой металлический параллелепипед с отверстием (или отверстиями) для крепления. Контакт с ленточным проводником коаксиально-полоскового перехода обеспечивается за счет упругого металлического лепестка, припаянного к мере. Для каждого из типоразмеров резисторов предусмотрена отдельная конструкция короткозамкнутой меры, ориентированная на высоту резистора и способ его крепления.

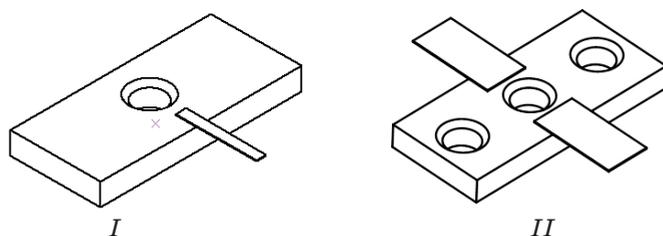


Рис. 13. Конструкция короткозамкнутой нагрузки для: I – нагрузка мощностью 10 и 20 Вт; II – проходных резисторов

Fig. 13. Squirrel cage design for: I – 10 and 20 W loads; II – pass-through resistors

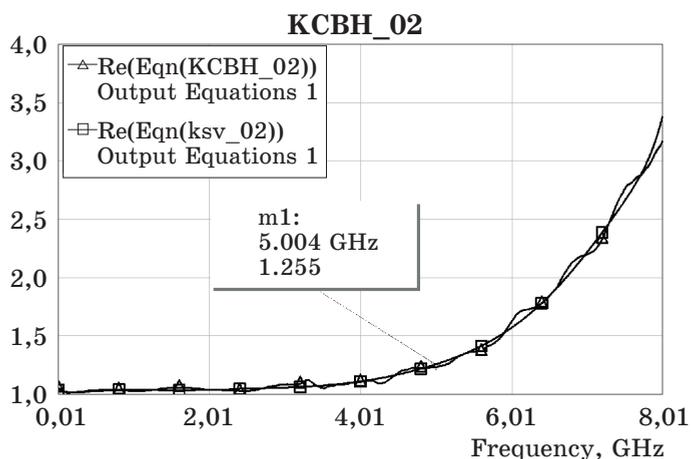


Рис. 14. КСВН оконечной нагрузки мощность 60 Вт

Fig. 14. VSWR terminal load power 60 W

Помимо короткозамыкателя, используется еще одна физически реализованная мера: аттестованная согласованная нагрузка. Причем в качестве этой меры используется оконечная нагрузка соответствующего типоразмера, изготовленная предприятием заказчика. Мерой холостого хода является открытый конец полосковой линии. Таким образом, удастся существенно сократить расходы на приобретение аттестованных полосковых калибровочных мер волнового сопротивления. На рис. 14 в качестве примера показан результат контроля КСВН нагрузки мощностью 60 Вт.

6. Заключение

Предлагаемый *LR*-метод контроля параметров объектов в нестандартных направляющих системах основан на использовании доступного, дешевого минимального комплекта калибровочных мер волнового сопротивления в виде отрезка электрически длинной линии передачи и не аттестованной отражающей нагрузки. Причем существенным фактором предлагаемого решения являются по сути прямые, а не косвенные методы измерения параметров переходов, отсутствие жесткого ограничения на диапазон частот и необходимость иметь априорные данные только о геометрических размерах мер. Метод позволяет решить широкий спектр задач, связанных с контролем параметров объектов в нестандартных волноведущих системах и в свободном пространстве.

Список литературы

1. Хибель М. *Основы векторного анализа цепей*. М.: Изд. дом МЭИ, 2009.
2. *PNA Series Network Analyzers help*. Available at: <http://na.support.keysight.com/pna/help/latest/help.htm>.
3. *Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers*. Available at: [http://anlge.umd.edu//Agilent Advanced VNA Calibration.pdf](http://anlge.umd.edu//Agilent%20Advanced%20VNA%20Calibration.pdf).
4. Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers. Application Note 5989-4804EN. *Keysight Technologies*. 2016:42.
5. Казарновский В., Крылов А. Методы измерения параметров коаксиально-волноводных переходов и узлов с нестандартным сечением. *Электроника. Наука, технология бизнес*. 2016;(8):82–87.
6. Лавричев О. В., Никулин С. М. LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах. *Датчики и системы*. 2017;(8-9):39–44.

References

1. Hiebel M. *Fundamentals of Vector Circuit Analysis*. Moscow: MEI; 2009. (In Russ.)
2. *PNA Series Network Analyzers help*. Available at: <http://na.support.keysight.com/pna/help/latest/help.htm>.
3. *Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers*. Available at: [http://anlage.umd.edu//Agilent Advanced VNA Calibration.pdf](http://anlage.umd.edu//Agilent%20Advanced%20VNA%20Calibration.pdf).
4. Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers. Application Note 5989-4804EN. *Keysight Technologies*. 2016:42.
5. Kazarnovsky V., Krylov A. Methods of measuring of waveguide-to-coaxial adapters and nodes with special cross section. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2016;(8):82–87. (In Russ.)
6. Lavrichev O. V., Nikulin S. M. LRT-Method for Determining the Object Parameters in Non-Standard Guide Systems. *Sensors and System*. 2017;(8-9):39–44. (In Russ.)

Информация об авторах

Евсеев Владимир Иванович – генеральный директор ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро» (607220, Россия, Нижегородской обл., г. Арзамас, ул. 50 Лет ВЛКСМ, 8а); e-mail: vladimir.evseev@oaopz.com

Лупанова Елена Александровна – старший преподаватель кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24); ORCID 0000-0001-6389-9939, e-mail: ealupanova@yandex.ru

Мальшев Илья Николаевич – заместитель генерального директора по развитию АО «НПО «ЭРКОН» (603104, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, 6, пом. ПЗ); e-mail: min@erkon-nn.com

Никулин Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24); ORCID 0000-0003-3906-8371, e-mail: nikulin-serg2006@yandex.ru

Петров Виталий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24); ORCID 0000-0002-4874-5250, e-mail: petrovnn@sandy.ru

Information about the authors

Vladimir I. Evseev – General Director of LLC “Arzamas Instrument Design Bureau” (8a 50 let VLKSM St., 607220, Arzamas, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation); e-mail: vladimir.evseev@oaoapz.com

Elena A. Lupanova – Senior Lecturer of the Department of Computer Technologies in Design and Production, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev (24 Minin St., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation); ORCID 0000-0001-6389-9939, e-mail: ealupanova@yandex.ru

Liya N. Malyshev – Deputy General Director of Development in JSC SPA “ERKON” (room PZ, 6 Nortov St., 603104, Nizhny Novgorod, Russian Federation); e-mail: min@erkon-nn.com

Sergey M. Nikulin – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Technologies in Design and Production, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev (24 Minin St., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation); ORCID 0000-0003-3906-8371, e-mail: nikulin-serg2006@yandex.ru

Vitaly V. Petrov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Technologies in Design and Production, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev (24 Minin St., 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation); ORCID 0000-0002-4874-5250, e-mail: petrovnn@sandy.ru

Поступила / Received: 10.03.2019

Принята в печать / Accepted: 20.03.2019