

Измерение собственных параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи с учетом частотно-зависимого волнового сопротивления линии

И.Г. Белков¹, Е.А. Лупанова², И.Н. Малышев¹, С.М. Никулин^{1,2}, В.В. Петров²

¹АО «НПО «ЭРКОН»

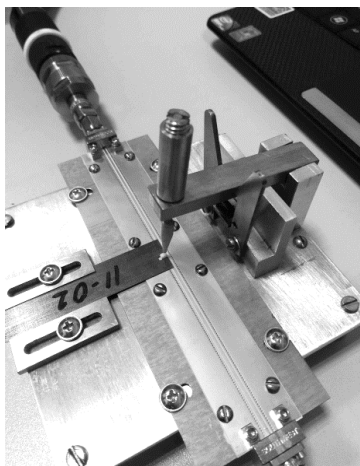
²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация: в работе обсуждаются методы и техника измерения собственных S-параметров навесных электронных компонентов в полосковых линиях передачи анализатором цепей P4226. Предлагается новый LTR метод определения собственных параметров окружающих цепей. В качестве объектов измерений использованы СВЧ чип-резисторы P1-160 и чип-индуктивности КИК. Экстракция собственных параметров электронных компонентов достигается за счет полного исключения окружающих цепей из результатов измерений

Ключевые слова: полосковая линия, копланарная линия, волновое сопротивление, СВЧ чип-резисторы, чип-индуктивности.

1. Введение

Собственные параметры электронных компонентов в полосковых линиях передачи удастся получить лишь при полном исключении окружающих цепей из результатов измерений. Для малогабаритных чип-компонентов такую задачу удобно решать при установке контролируемого объекта в полосковую копланарную линию между центральным проводником и экраном на верхней стороне изоляционного основания. Такое соединение с контролируемым изделием получают без использования контактных площадок, чем обеспечивается сокращение негативных факторов, влияющих на получаемые результаты. На рисунке 1 показана оснастка для подключения в экранированную полосковую линию электронных компонентов, объекты измерений различных типоразмеров и анализатор цепей P4226.



а)



б)



в)

Рисунок 1. Внешний вид измерительной оснастки (а), объекты измерения (б), векторный анализатор цепей P4226 (в)

Несовершенство разъемных контактов коаксиально-полосковых переходов стимулирует поиск процедур с минимальным количеством калибровочных мер. В работе [1] был предложен принципиально новый LRT метод для исключения из результатов измерений в коаксиальном канале S-параметров переходов с помощью трех полосковых мер волнового сопротивления. Дальнейшим развитием LRT-метода стал LR-метод [2], в котором набор калибровочных мер сократился до двух, и, наконец, был предложен Express-метод [3]. Для определения параметров окружающих цепей теперь достаточно всего одной меры – экранированной электрически длинной экранированной полосковой линии, в которую и устанавливают контролируемые электронные компоненты.

Все эти методы имеют одно «узкое» место – определение средней линии комплексной функции частоты. Для устранения этого методического недостатка был предложен еще один метод – LTR [4], в котором для повышения точности получения средней линии было предложено вначале находить базовые точки по результатам измерения электрически длинной и короткой полосковой линии, а затем получать всю среднюю линию с помощью известных процедур интерполяции.

Цель настоящей работы состоит в разработке измерительной установки на базе векторного анализатора цепей компании АО НПФ «МИКРАН» Р4226 «Панорама» для определения собственных параметров электронных компонентов в полосковой линии передачи, поиске оптимальных методов экстракции собственных параметров изделий и сравнении полученных результатов с результатами, получаемыми с помощью зондовой станции.

2. Определение собственных параметров полосковых линий

Известен TRL-метод определения параметров цепей *A* и *B*. Коэффициенты отражения $s_{11}^a(f)$ и $s_{11}^b(f)$ определяют этим методом по результатам измерений *L(line)*- и *T(thru)*-соединений переходов из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} s_{11}^a(f) &= (s_{11}^L s_{12}^T - s_{11}^T s_{12}^L T) / (s_{12}^T - s_{12}^L T); \\ s_{11}^b(f) &= (s_{22}^L s_{21}^T - s_{22}^T s_{21}^L T) / (s_{21}^T - s_{21}^L T). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Волновую функцию

$$T(f) = \exp(-i\gamma\Delta L),$$

где γ – постоянная распространения электромагнитной волны в полосковой линии, ΔL – разность длин отрезков линий в *L* и *T* соединениях получают из решения квадратного уравнения, требующего корректного алгоритма для выбора истинного решения. Соотношения (1) обеспечивают минимальную погрешность на частоте *f*, при которой фаза *T(f)* равна $\pi/2$.

LRT метод открыл новый способ решения задачи «искажающего адаптера» – исключения влияния коаксиально-полосковых переходов с отрезками полосковых линий на результаты измерения S-параметров объектов, включенных между ними. Принципиальное отличие LRT-метода от TRL-метода состоит в использовании отрезка электрически длинной линии в *L*-соединении переходов. Фаза коэффициента передачи такой линии $\Phi = n\pi$, $n \gg 1$. Это позволяет определять $s_{11}^a(f)$ и $s_{11}^b(f)$ как средние линии квазипериодических комплексных функций частоты *f*. Остальные S-параметры цепей *A* и *B* определяются быстро сходящейся итерационной процедурой по результатам измерений *T*- и *R(reflect)*-соединений переходов с полосковыми линиями в режимах сквозного соединения, короткого замыкания или холостого хода.

Недостатком LRT метода является поиск $s_{11}^a(f)$ и $s_{11}^b(f)$ как средних линий квазипериодических функций частоты. Предлагаемый в настоящей работе LTR-метод свободен от этого недостатка. Собственные параметры $v(f)$, $\varepsilon_{eff}(f)$ и $\alpha(f)$ экранированной полосковой линии были определены LTR-методом по S-параметрам, измеренным в коаксиальном канале анализатором цепей в диапазоне частот 0,01–26,50 ГГц. В качестве объектов измерений использованы две линии – длинная и короткая. Длинная линия имела длину $L = 120$ мм, короткая – $l = 30$ мм. Обе линии изготовлены из фольгированного материала RO4350B, поперечные размеры обеспечивают волновое сопротивление 50 Ом на частоте 20 ГГц. Для подключения линий к анализатору цепей применена оснастка с коаксиально-полосковыми переходами, имеющие соединители типа SMA. Измерение R-соединения предполагает предварительное измерение коэффициентов отражения от переходов без подключения к ним полосковых линий. Результаты измерений R-соединения используют для определения длины L_a и L_b коаксиальных участков переходов.

Собственные параметры полосковой линии вначале получают на массиве частотных точек $f_n, n = 1, 2, \dots$ из соотношений, при которых фаза коэффициента передачи $T(f)$ отрезка полосковой линии длиной $\Delta L = L - l = 90$ мм принимает значения $\pm\pi/2$.

Приближенное значение $T(f) = s_{21}^L(f) / s_{21}^T(f)$ получают дифференциально-фазовым методом как отношение коэффициентов передачи отрезков длиной L и короткой T линий. Затем на том же массиве частотных точек вычисляют коэффициенты отражения цепей A и B со стороны их коаксиальных портов из соотношений (1) и выполняют интерполяцию $s_{11}^a(f)$ и $s_{11}^b(f)$ сплайнами Акимы [5]. Остальные S-параметры цепей определяют по соотношениям, известным из [1,2]

После чего, исключив из результатов измерений S-параметров $s_{ik}^T(f)$ короткой линии S-параметры цепей A и B и получив точное значение коэффициента передачи $T(f)$, найдены окончательные оценки искомых величин.

3. Определение собственных параметров объектов

S-параметры объектов восстановлены относительно волнового сопротивления полосковой линии. Известно, что волновое сопротивление является частотно-зависимой функцией. Средствами эксперимента нам удалось восстановить эту зависимость.

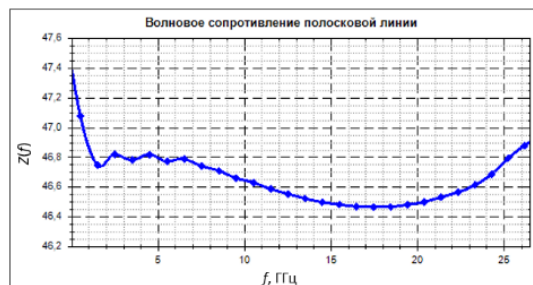


Рисунок 2. Волновое сопротивление полосковой линии как функция частоты

График волнового сопротивления приведен на рисунке 2. Затем все S-параметры были преобразованы относительно 50-омной линии.

На рисунке 3 показана схемная модель резистора P1-160 производства АО «НПО «ЭРКОН», а на рисунке 4 - модуль и фаза коэффициента отражения резистора номиналом 220 Ом. Для измерения резисторы были установлены между полосковой линией и экраном, в разрыв полоскового проводника и как оконечная нагрузка. Все варианты показали схожие результаты, в таблице 1 приведены собственные параметры резисторов при установке в качестве оконечной нагрузки. Независимо от способа установки резистора с ростом номинала возрастает погрешность определения сопротивления.

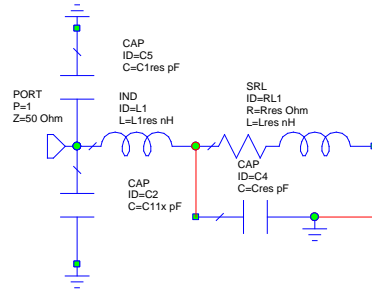


Рисунок 3. Схемная модель резистора P1-160

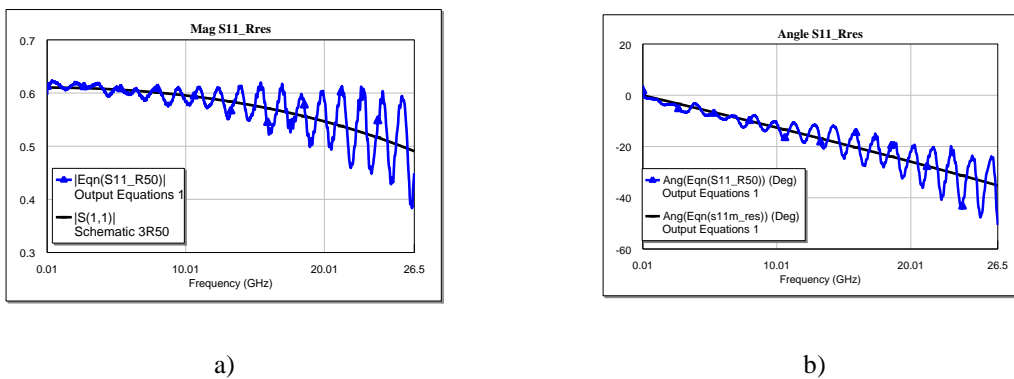


Рисунок 4. S-параметры резистора 220 Ом: а) модуль; б) фаза

Таблица 1. Параметры резисторов разных номиналов

Имя и номинал	Rres [Ом]	Lres [нГн]	L1res [нГн]	Cres [пФ]	Cres1 [пФ]
R 50	51.165	0.0997	0.264	0.046	0.00194
R 100	100.644	0.0971	0.165	0.0347	0.0079
R 220	206.560	0.141	0.336	0.0294	0.0011
R 270	260.002	0.119	0.359	0.0303	0.00106
R 910	828.232	0.192	0.435	0.0256	0.0044

В ходе выполненных исследований были получены собственные параметры СВЧ чип-индуктивностей КИК производства АО «НПО «ЭРКОН» разных типоразмеров.

На рисунке 5 показана схемная, а на рисунке 6 - модуль и фаза коэффициента отражения чип-индуктивности КИК номиналом 2 нГн. В таблице 2 приведены собственные параметры чип-индуктивностей КИК при установке в качестве оконечной нагрузки.

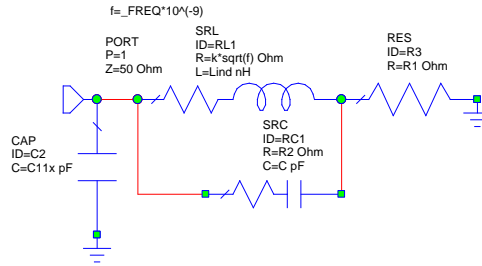
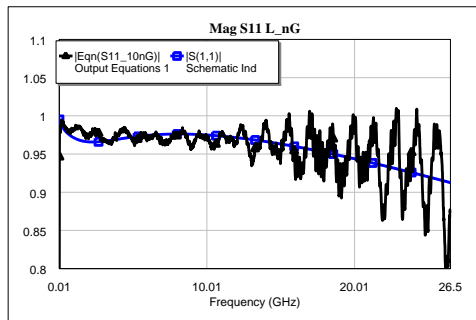


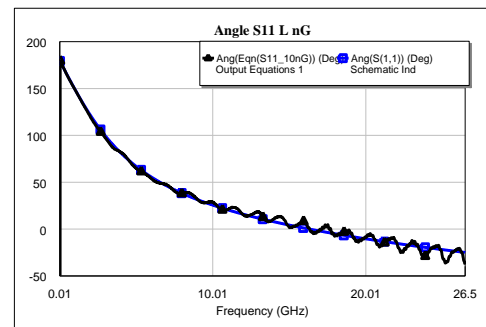
Рисунок 5. Схемная модель чип-индуктивностей КИК

Таблица 2. Параметры чип-индуктивностей КИК

Имя и номинал	Lind [нГн]	C [пФ]	R1 [Ом]	R2 [Ом]	k [Ом]
IND 1	1.002	0.0164	0.00265	49.998	0.519
IND 2	2.174	0.0308	0.00806	36.513	0.769
IND 51	57.335	0.0579	2.101	109.404	0.996



a)



b)

Рисунок 6. S-параметры чип-индуктивностей КИК 2 нГн: а) модуль; б) фаза

4. Заключение

Выполненное исследование показало, что LTR метод является высокоточным способом определения собственных параметров электронных компонентов и показал свою эффективность в широком диапазоне частот.

Список литературы

1. Лавричев О. В., Никулин С. М. LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах // Датчики и системы. – 2017. – №. 8-9. – С. 39-44.
2. 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.
3. Евсеев В. И., Никулин С. М. LR и экспресс-метод контроля параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи // Информационные системы и технологии ИСТ-2020. – 2020. – С. 1290-1294.
4. Лупанова Е. А., Никулин С. М. LTR-метод контроля параметров устройств в волноводных направляющих системах // Информационные системы и технологии ИСТ-2020. – 2020. – С. 1310-1317.
5. Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures // Journal of the ACM (JACM). – 1970. – Т. 17. – №. 4. – С. 589-602.