

LTR метод контроля параметров объектов в коаксиальном волноводе

Е.А. Лупанова, С.М. Никулин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация: в данной работе предлагается новый LTR метод исключения параметров окружающих цепей из измерения S-параметров объектов. Предлагаемый метод является широкополосным, не требует наличия дорогих калибровочных наборов мер, позволяет определять параметры объектов с высокой точностью. Применение LTR метода показано в коаксиальном волноводе.

Ключевые слова: коаксиал, калибровка, искажающий адаптер.

1. Введение

При измерении S-параметров объектов может возникнуть проблема вторичной калибровки векторного анализатора цепей. Например, для калибровки анализатора цепей P4226 «Панорама» используется электронный калибратор с разъемами в тракте 3,5/1,52 мм с дюймовой резьбой, а объект измерения имеет разъемы 7,0/3,04 мм тип III с метрической резьбой. Для измерения в тракте 7,0/3,04 мм на соединительные коаксиальные кабели устанавливаются соответствующие переходы, но набор калибровочных мер отсутствует.

Возникает необходимость разработать метод исключения влияния переходов на результат измерения объекта.

В работе предлагается LTR метод исключения влияния окружающих цепей на измерение S-параметров объектов в коаксиальном тракте.

2. LTR-метод контроля параметров объектов в коаксиальных волноводах

Предлагаемый LTR метод контроля параметров объектов является логическим продолжением сравнительно новых LRT [1], LR [2] и Экспресс [3] методов, а также в LTR методе используются формулы, известные из TRL метода [4, 5]

Для работы метода необходимо выполнить 3 измерения:

1. измерение S-параметров отрезка электрически длинной линии S_{ik}^L ;
2. измерение S-параметров отрезка короткой линии S_{ik}^T ;
3. измерение переходов либо в режиме холостого хода, либо, если этот режим невозможен, в режиме короткого замыкания S_{ik}^{Per} .

В каждом измерении присутствуют S-параметры искажающих адаптеров (ИА) - двухпортовых цепей А и В [6]. Для их экстракции LTR методом на первом шаге предлагается определить длины коаксиальных областей переходов L^A и L^B с воздушным диэлектриком, показанных на рисунке 1, и исключить их из всех измеренных S-параметров.

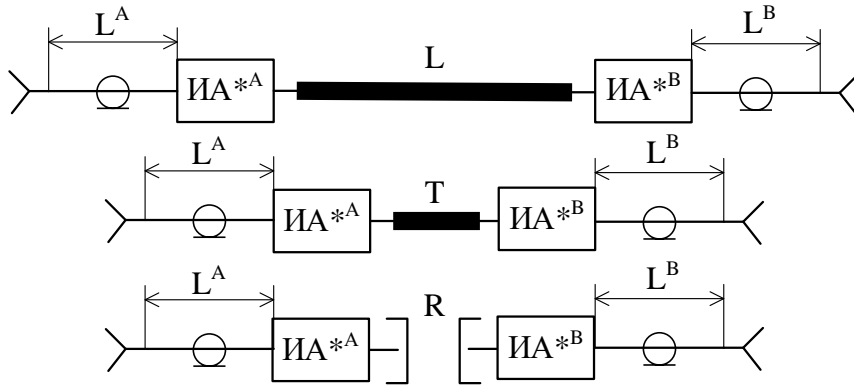


Рисунок 1. Выделение длины коаксиальных областей переходов из параметров ИА.

Длины L^A и L^B определяются решением целевой функции:

$$\sum_{i=1}^N \left[\arg(S_{11,22}^{Per}) - \exp(-4j\pi f_i L^{A,B} / v_0) \right]^2 \rightarrow 0, \quad (1)$$

где i – порядковый номер частотной точки,

f_i – значение частоты в точке,

N – общее количество точек в диапазоне.

После определения длин коаксиальной области переходов L^A и L^B из каждого измерения исключается их влияние и все следующие действия выполняются над смещенными S-параметрами.

На втором шаге по отношению фазы коэффициента передачи длинной и короткой линий определяется массив частотных точек, в которых фаза стремится к 90° :

$$\left[T_n = \arg(S_{21}^L) / \arg(S_{21}^T) \right] \rightarrow \pm \pi/2. \quad (2)$$

Затем по известным из TRL метода соотношениям определяют коэффициенты отражения цепей А и В со стороны коаксиальных разъемов:

$$S_{11}^a(f_n) = (S_{11}^L S_{12}^T - S_{11}^T S_{12}^L T_n) / (S_{12}^T - S_{12}^L T_n), \quad (3)$$

$$S_{11}^b(f_n) = (S_{22}^L S_{21}^T - S_{22}^T S_{21}^L T_n) / (S_{21}^T - S_{21}^L T_n).$$

Принципиальное отличие нового LTR метода от широко известного метода TRL заключается в определении параметра T непосредственно из измерений, а не из решения квадратного уравнения.

Следующим шагом выполняется интерполяция всего диапазона сплайнами Акимы [7].

Конструкции любых переходов неидеальны. В случае перехода с коаксиала на коаксиал область контакта внутренних проводников не идеальна и имеет небольшую канавку в области контакта центрального проводника [8]. Эта канавка создает паразитный коэффициент отражения и влияет на точность калибровки. Кроме того диэлектрические шайбы, фиксирующие положение центрального проводника в экране коаксиальной конструкции, также влияют на частотные характеристики переходов. Схемная модель искажающего адаптера их двух элементов $X_{a,b}$ и Z_v , приведенная на рисунке 2, позволяет определить отношение коэффициентов передачи $K = S_{21}^a(f) / S_{21}^b(f)$ цепей А и В из соотношений [9]:

$$K(f) = \frac{\sqrt{R_a} (1 + R_b + iX_b)}{\sqrt{R_b} (1 + R_a + iX_a)},$$

$$X_{a,b}(f) = \frac{2\text{Im}(S_{11}^{a,b})}{1 - 2\text{Re}(S_{11}^{a,b}) + |S_{11}^{a,b}|^2},$$

$$R_{a,b}(f) = \frac{1 - |S_{11}^{a,b}|^2}{1 - 2\text{Re}(S_{11}^{a,b}) + |S_{11}^{a,b}|^2}.$$

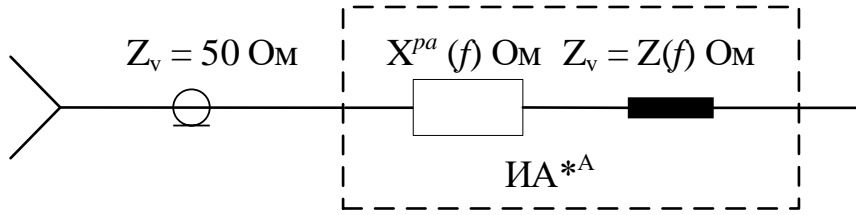


Рисунок 2. Схемная модель искажающего адаптера

В разработанных ранее LRT и LR методах коэффициент K определялся по измерениям коэффициента отражения от нагрузок короткого замыкания или холостого хода. В Экспресс методе он был принят за единицу, что, конечно, близко к истинному значению, но такое допущение вносит некоторые погрешности в результат калибровки.

Следующим шагом процедуры определяют оставшиеся параметры цепей А и В из соотношений, предложенных в Экспресс методе [3]:

$$S_{22}^a(f) = K(S_{22}^L(f) - S_{11}^b(f))/S_{12}^L(f),$$

$$(S_{22}^b)^p(f) = (S_{11}^L(f) - S_{11}^a(f))/S_{21}^L(f)K,$$

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

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

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

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

После этого из измерения коэффициента передачи Т-соединения экстрагируются параметры цепей А и В и определяется точная частотная зависимость коэффициента передачи $T(f)$ отрезка воздушной коаксиальной линии длиной, равной разности длин L и Т-соединений. В случае использования разнотипных переходов (вилка-розетка), длина линии Т-соединения равна нулю.

Затем заново определяется массив базовых точек по $T(f)$ и все последующие шаги повторяются. После окончательного определения S-параметров цепей А и В можно устранить их влияние на результаты измерения объектов по соотношениям [10]:

$$\begin{aligned}
 S_{11}^x &= \frac{(\det S - S_{11}^a S_{22}^b) S_{22}^b - (S_{11} - S_{11}^a) \det S^b}{S_{22}^a (S_{22}^b \det S - S_{11} \det S^b) + (\det S^b - S_{22} S_{22}^b) \det S^a}, \\
 S_{21}^x &= \frac{S_{21} S_{12}^a S_{21}^b}{S_{22}^a (S_{22}^b \det S - S_{11} \det S^b) + (\det S^b - S_{22} S_{22}^b) \det S^a}, \\
 S_{12}^x &= \frac{S_{12} S_{21}^a S_{12}^b}{S_{22}^a (S_{22}^b \det S - S_{11} \det S^b) + (\det S^b - S_{22} S_{22}^b) \det S^a}, \\
 S_{22}^x &= \frac{(\det S - S_{11}^b S_{11}^a) S_{22}^a - (S_{22} - S_{11}^b) \det S^a}{S_{22}^a (S_{22}^b \det S - S_{11} \det S^b) + (\det S^b - S_{22} S_{22}^b) \det S^a}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

3. Экспериментальное исследование LTR метода

Описанный метод был использован для определения S-параметров фильтра нижних частот Чебышева, показанного на рисунке 3.



Рисунок 3. Фильтр нижних частот Чебышева

Для выполнения LTR калибровки были использованы воздушная линия и переходы, показанные на рисунке 4.



Рисунок 4. Воздушная линия и переходы

В результате LTR калибровки была определена АЧХ фильтра нижних частот, показанная на рисунке 5.

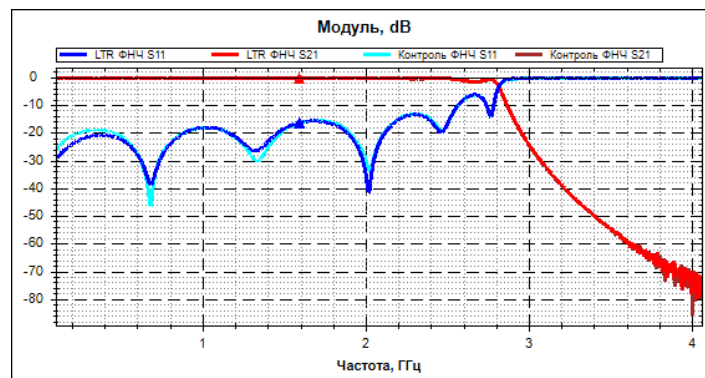


Рисунок 5. АЧХ ФНЧ Чебышева

На рисунке 5 видно, что результаты измерений ФНЧ, полученные с помощью LTR метода, и результаты, выполненные после калибровки с помощью набора калибровочных мер (НКММ-01-01Р), практически полностью совпадают, что свидетельствует о высокой эффективности LTR метода.

4. Заключение

Особенностью данного эксперимента было то, что калибровка анализатора цепей P4226 электронным калибратором была выполнена в тракте 3,5/1,52 мм с дюймовой резьбой, а все измерения объектов проводились в тракте 7,0/3,04 мм с метрической резьбой. Для таких измерений необходимо приобретать либо новый электронный калибратор, либо набор мер, с помощью которых выполнять калибровку в новом тракте. Если возникнет необходимость измерения объектов в другом тракте или с другой резьбой потребуются новые наборы калибровочных мер или новые калибраторы, что является весьма дорогим решением. Использование метода LTR позволяет значительно удешевить процесс калибровки, так как при изменении измерительного тракта необходимо иметь лишь два перехода с разнотипными соединителями (вилка-розетка) и воздушную линию.

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. Engen G. F., Hoer C. A. Thru-reflect-line: An improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 1979. – Т. 27. – №. 12. – С. 987-993.
5. Agilent Technologies. Network analysis applying the 8510 TRL calibration for non-coaxial measurements. – 2001.
6. Савин А.А. Методы и алгоритмы калибровки радиоизмерительных систем на основе моделей наблюдения с локальными спектрально-селективными составляющими. Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. – Москва, «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 2019.
7. 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.
8. Хибель М. Основы векторного анализа цепей/Михаэль Хибель.–пер. с англ. СМ Смольского; под ред. У. Филипп //М: Издательский дом МЭИ. – 2009.
9. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. – Сов. радио, 1963.
10. Дансмор Д. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей //Москва: Техносфера. – 2018.
11. Джонсон Д., Джонсон Д., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. – Энергоатомиздат, 1983.