

О.О. Дробахин, В.Г. Короткая

**К ПОСТРОЕНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ОТРАЖЕНИЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ НА
ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ГОЛОГРАФИИ**

Аннотация. Для 12-полюсного измерителя на основе Е-плоскостного волноводного крестообразного соединения прямоугольных волноводов продемонстрированы преимущества нахождения значений комплексного коэффициента отражения с применением принципов голограммы с тремя опорными сигналами. В качестве критерия выбора угла соединения волноводов использовано значение числа обусловленности матрицы системы линейных алгебраических уравнений, которая формируется согласно рассмотренному методу обработки. Показано, что допустимым углом является 60 град.

Ключевые слова: комплексный коэффициент отражения, голограмма, регуляризация, волноводный крест.

Введение. Микроволновые методы находят широкое применение при решении ряда производственных задач в металлургии, машиностроении, в частности в неразрушающем контроле [1]. По сути, применение указанных средств базируется на измерении частотной зависимости комплексного коэффициента отражения интересующего объекта. Значительная часть современных средств измерения комплексного коэффициента отражения – векторных рефлектометров – базируется на идеи 12-полюсного измерителя [2]. Классическая схема требует использования значительного числа эталонных калибровочных нагрузок и использования хорошо согласованных СВЧ элементов, которые являются дорогостоящими. Все это обуславливает невозможность применения указанного подхода в производственных условиях. Рассмотренная в [3] схема 12-полюсного измерителя на основе крестообразного Е-плоскостного волноводного соединения при условии расчета элементов матрицы рассеяния позволяет обеспечить стоимость измерительной аппаратуры сравнимую со стоимостью сканера.

лярного рефлектометра. При этом был рассмотрен случай соединения волноводов под прямым углом. Традиционным подходом к определению интересующего значения комплексного коэффициента отражения является совместное решение трех квадратных уравнений. По сути, концепция 12-полюсного измерителя реализует голограммическую запись с тремя опорными сигналами [4], при этом может быть сформирована специальная система линейных уравнений. Такой подход открывает возможность анализа точностных характеристик для различных схем на основе анализа числа обусловленности соответствующей матрицы размером 2×2 . В работе [5] было рассмотрено крестообразное соединение волноводов под произвольным углом.

Постановка задачи. Целью данной статьи является анализ конструкции 12-полюсного измерителя на базе Е-плоскостного крестообразного соединения волноводов прямоугольного сечения при произвольном угле соединения на основе исследования поведения числа обусловленности соответствующей матрицы, реализующей расчеты согласно принципу голограммы с тремя опорными сигналами.

Основная часть. Волноводный крест делит входную мощность на четыре части. В то же время он служит для суммирования измерительного сигнала и трех опорных сигналов, полученных путем деления входного сигнала. Особенность использования состоит в возможности оценить матрицы рассеяния элементов расчетным способом без проведения процедур калибровки. Частотные характеристики элементов матрицы рассеяния имеют в достаточной степени плавные зависимости. С помощью калибровки должны быть определены только коэффициенты, характеризующие детекторы, включенные в измерительных плечах. Для проведения указанной процедуры наиболее подходящей является согласованная нагрузка.

Свойства волноводного креста описываются матрицей S_{ij} . Будем использовать нумерацию плеч по часовой стрелке, начиная с плеча, к которому подключен источник СВЧ сигнала. Из симметрии следует следующее соотношение $S_{21} = S_{41} = S_{14} = S_{12} = S_{34} = S_{32}$. Согласованные измерители мощности подключены к плечам 1,2,3. В качестве указанных измерителей используются направленные детекторы, которые измеряют напряжения $U_{1,2,3}$ пропорциональные соответствующим мощностям $P_{1,2,3}$ в плечах 1,2,3. Кроме того используется направленный детектор для измерения входной мощности P_0 ,

подключенный к порту 1. Исследуемая нагрузка подключается к плечу 4, поскольку подключение к порту 3 приводит к симметричной конструкции и в плечах 2, 4 формируются идентичные сигналы, что приводит к вырождению соответствующих систем уравнений. Учет многократных отражений между измеряемой нагрузкой и крестом производится путем использования новой переменной A_4 , которая является билинейным преобразованием от коэффициента отражения Γ вида $A_4 = \Gamma S_{41} / (1 - \Gamma S_{44}) = A'_4 + jA''_4$.

В соответствии с методикой [4] обработки согласно принципу голограммии с тремя опорными сигналами необходимо решить следующую систему двух линейных уравнений

$$B\mathbf{a} = \mathbf{q}, \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} A'_4 \\ A''_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_{mn} / 2 \\ q_{kl} / 2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где B является матрицей с элементами

$$\begin{aligned} B_{11} &= \operatorname{Re}(S_{m1}^* S_{m4}) |S_{n4}|^2 - \operatorname{Re}(S_{n1}^* S_{n4}) |S_{m4}|^2, \\ B_{12} &= \operatorname{Im}(S_{m1} S_{m4}^*) |S_{n4}|^2 - \operatorname{Im}(S_{n1} S_{n4}^*) |S_{m4}|^2, \\ B_{21} &= \operatorname{Re}(S_{k1}^* S_{k4}) |S_{l4}|^2 - \operatorname{Re}(S_{l1}^* S_{l4}) |S_{k4}|^2, \\ B_{22} &= \operatorname{Im}(S_{k1} S_{k4}^*) |S_{l4}|^2 - \operatorname{Im}(S_{l1} S_{l4}^*) |S_{k4}|^2. \end{aligned}$$

Значения q_{mn} , которые определяют элементы вектора \mathbf{q} , равны

$$q_{mn} = (p_m - p_{0m}) |S_{n4}|^2 - (p_n - p_{0n}) |S_{m4}|^2, \quad (2)$$

где $p_{0i} = |S_{i1}|^2$ и $p_i = |S_{Li1}|^2 U_{c0} U_i / (U_{ci} U_0)$, причем S_{Li1} равно $S_{i1} + S_{i4} S_{11} \Gamma_c / (1 - S_{11} \Gamma_c)$; Γ_c – коэффициент отражения эталонной нагрузки, U_{c0} и U_0 – напряжения, характеризующие мощность входного сигнала при калибровке и измерениях соответственно, U_{ci} и U_i – напряжения, измеренные в плечах креста при калибровке и измерениях соответственно.

Согласно методу наименьших квадратов система (1) переходит в

$$B^T B \mathbf{a} = B^T \mathbf{q}. \quad (3)$$

Число обусловленности Cond матрицы B может быть вычислено стандартным образом как отношение максимального собственного значения к минимальному. Понятно, что число обусловленности зависит от частоты и комбинации детекторов. Преимущество подхода (3) по отношению к традиционному методу решения системы квадратных уравнений состоит в возможности использования стандартной регуляризации Тихонова

$$(B^T B + \alpha I) \mathbf{a} = B^T \mathbf{q}. \quad (4)$$

Принцип обобщенной невязки формализует поиск параметра регуляризации α как корня уравнения

$$\|B\mathbf{a}^\alpha - \mathbf{q}\|^2 = (\delta + h \|\mathbf{a}^\alpha\|)^2 + \mu^2, \quad (5)$$

где δ является мерой ошибки в векторе \mathbf{q} , $h = \|B - B_r\|$, B_r – точный оператор, $\mu = \inf \|B\mathbf{a} - \mathbf{q}\|$. Значения δ , h , μ могут быть определены путем калибровки с тремя известными нагрузками. Очень важно, что в соответствии с (5) α зависит от величины A_4 , таким образом, α является функцией значения коэффициента отражения нагрузки. Практический способ оценить α состоит в выборе лучшего значения α (в смысле минимизации ошибки оценки значения) для известной нагрузки с коэффициентом отражения, который приближенно равен коэффициенту отражения нагрузки, подлежащей измерению.

На основе значений матрицы рассеяния Е-плоскостного волноводного крестообразного соединения волноводов, использованных в работе [5], были рассчитаны значения числа обусловленности матрицы B , часть из которых приведена в таблице. Для углов пересечения волноводов менее 55 град число обусловленности резко возрастает, достигая при угле 15 град значений в десятки тысяч, что свидетельствует о вырождении матрицы, а, следовательно, о существенном совпадении результатов измерений в измерительных плечах. Выбранные частоты соответствуют началу, середине и концу рабочего диапазона волновода сечением $7,2 \times 3,4$ мм, что позволяет оценить значения во всем диапазоне частот. Для промежуточных частот зависимости числа обусловленности носят плавный характер, без выбросов. Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что выбор комбинаций детекторов при формировании элементов матрицы и вектора правых частей системы (1) имеют существенное значение для обеспечения устойчивости решения, при этом комбинация $m = 1; n = 2; k = 2; l = 3$ обеспечивает значительно лучшие результаты, чем комбинация $m = 1; n = 2; k = 1; l = 3$. Возможность использования не прямого угла, а угла в 60 градусов позволяет изменить компоновочную схему прибора, при этом точность измерений не будет существенно ухудшена. Дальнейшее уменьшение угла соединения волноводов влечет недопустимое возрастание погрешности измерений комплексного коэффициента отражения, вследствие стремительного роста числа обусловленности матрицы B .

Таблица 1

Значения числа обусловленности для матрицы B
для ряда значений углов пересечения волноводов и частот

| Частота, ГГц | Угол, град | | | | | | |
|------------------------------|------------|--------|-------|------|-------|-------|------|
| | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 |
| $m = 1; n = 2; k = 1; l = 3$ | | | | | | | |
| 26,0 | 26,62 | 16,24 | 11,01 | 8,01 | 6,12 | 4,86 | 3,98 |
| 32,0 | 19,20 | 9,35 | 5,98 | 4,34 | 3,42 | 2,84 | 2,45 |
| 37,5 | 68,23 | 176,21 | 5,71 | 9,48 | 91,91 | 10,72 | 5,01 |
| $m = 1; n = 2; k = 2; l = 3$ | | | | | | | |
| 26,0 | 24,74 | 13,38 | 8,00 | 5,15 | 3,50 | 2,49 | 1,86 |
| 32,0 | 18,60 | 8,47 | 4,86 | 3,08 | 2,06 | 1,43 | 1,02 |
| 37,5 | 8,32 | 3,86 | 2,42 | 1,70 | 1,31 | 1,29 | 1,58 |

Выводы. Переход от традиционного метода обработки данных измерений для 12-полюсного измерителя на базе Е-плоскостного волноводного крестообразного соединения к методу, основанному на принципах голограммической записи с тремя опорными сигналами, позволяет перейти к решению системы линейных алгебраических уравнений. Это открывает возможности математической формализации задачи, а, следовательно, оценки конструкции с использованием формального признака – значения числа обусловленности матрицы. Это позволило выбрать оптимальную комбинацию плеч, к которым подключены детекторы. Исходя из допустимых значений числа обусловленности было установлено, что можно перейти от крестообразного соединения волноводов с прямыми углами к соединению с углом в 60 град, что позволяет построить новые более компактные конструкции измерителя.

Благодарности. Авторы благодарят М.В. Андреева, В.Ф. Борулько, В.А. Карлова за предоставленные значения матрицы рассеяния Е-плоскостного волноводного крестообразного соединения волноводов, использованных в работе [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Головко, В.И. Радиолокационный контроль metallurgical processes [Text] / В.И. Головко, О.Н. Кукушкин, Н.В. Михайловский и др. – Днепропетровск: Журфонд, 2010. – 428 с.
2. Cripps, S.C. VNA tales [Text] / S.C. Cripps // IEEE Microwave Mag. – 2007. – Vol. 8. – №. 10. – P. 28–44.
3. Drobakhin, O.O. Millimeter Apparatus for Transmission Line and Dielectric Material Measurements by Multifrequency Methods [Text] / O.O. Drobakhin, V.F. Borulko, V.A. Karlov // CPEM-96 Conference Digest, Germany, Braunschweig. – 1996. – P. 598-599.
4. Drobakhin, O.O. Holographic Approach to Microwave Measurements [Text] / O.O. Drobakhin, V.A. Karlov // Proc. of the 16th URSI Int. Symp. on Electromagnetic Thessaloniki, Greece. – 1998. – Vol. 1. – P. 109-111.
5. Karlov, V. A. Properties of complex parameters of five-port reflectometer with E-plane oblique X- and T-junctions [Text] / V.A. Karlov , M.V. Andreev, V. F. Borulko // Conf. Proc. 2014 Int. Conf on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Dnipropetrovsk, 2014. – P. 164-167.