

## МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ ЗОНДОВ ДИСКРЕТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

### Введение

Применение многозондовой измерительной линии позволяет реализовать многофункциональные быстродействующие средства измерения энергетических параметров сигнала (мощности) и параметров нагрузки (модуля и фазы комплексного коэффициента отражения) линии передачи СВЧ – мультиметры СВЧ [1]. Вышеперечисленные параметры определяются из уравнений косвенных измерений как функции дискретных значений пространственного распределения квадрата амплитуды напряженности электрического поля [2, 3]. При этом погрешности результатов измерений зависят от идентичности коэффициентов передачи зондов. Таким образом, задача определения коэффициентов передачи каждого измерительного преобразователя или же сведение значений коэффициентов преобразования зондов к одному значению – составляющая часть метрологического обеспечения многозондовых мультиметров СВЧ.

### Основная часть

На малых уровнях мощности идентичность достигается вычислением относительных коэффициентов передачи каналов, нормированных к базовому каналу измерения (причем относительные коэффициенты определяются точнее, чем базовый, поскольку их нахождение сводится к измерению напряжений и не требует измерения мощности в линии передачи).

Самым простым методом определения относительных коэффициентов передачи каналов является метод *согласованной нагрузки*. При этом в линии передачи устанавливается бегущая волна ( $\Gamma_{in} = 0$ ), и  $K_{ij}$  определяется как отношение напряжений на выходах  $i$ -го и  $j$ -го каналов. Развитием метода согласованной нагрузки является *метод максимума*. Для реализации данного метода используется нагрузка с переменной фазой коэффициента отражения. Изменяя  $\varphi_{in}$ , можно поочередно установить максимальное значение напряжения на выходе каждого канала, а затем определить относительный коэффициент передачи  $i$ -го канала как  $K_{ij} = U_{i,max} / U_{j,max}$ . При использовании *метода детерминированной нагрузки*, относительный коэффициент передачи  $i$ -го канала можно определить при известных параметрах нагрузки  $\Gamma_{in}$  и  $\varphi_{in}$ .

Таким образом, рассмотренные методы требуют для своей реализации малые рассогласования нагрузки.

С помощью перечисленных методов, проводя многократные измерения и применяя стабильные источники электромагнитных колебаний СВЧ диапазона, можно определить неидентичность зондов с погрешностью порядка 0,2 – 0,5 %. Однако существенным ограничением перечисленных методов является сложность выполнения идентификации коэффициентов преобразования зондов в условиях высокого уровня мощности – достижимая погрешность оценивается в 2 – 5 %. Низкая точность связана со следующими ограничениями:

- изготовление мощной подвижной нагрузки связано с преодолением конструктивно-технологических и эксплуатационных ограничений;
- уровни мощности генераторов высокого уровня мощности, как правило, нестабильны;
- существует реакция генератора (усилителя) на рассогласованную нагрузку;
- существуют сложности аттестации нагрузок высокого уровня мощности, обусловленные нестандартными разъемами.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности разработки метода идентификации коэффициентов передачи зондов в условиях высокого уровня мощности, минимизирующего количество вспомогательной аппаратуры, с учетом возросших информационных и производительных возможностей компьютерной техники.

В качестве решения поставленной задачи предлагается метод определения коэффициентов передачи зондов с использованием дискретного преобразования Фурье [4].

Условимся, что рассматривается измерительный преобразователь (ИП), построенный по принципу четырехзондовой дискретной измерительной линии [3, 4]. Зонды дискретной измерительной линии представляют собой ненаправленные точечные элементы связи, в линии передачи распространяются монохроматические колебания СВЧ основного типа (практически это условие достижимо за счет применения полосовых фильтров во вторичном тракте в диапазоне измеряемых колебаний), все коэффициенты передачи зондов равны и выходные напряжения детекторных преобразователей пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля. Необходимым условием для применения дискретного преобразования Фурье к отсчетам, снятым с зондов, является их расположение по периоду сигнала. То есть, для четырехзондовой дискретной измерительной линии зонды должны быть расположены эквидистантно на расстоянии  $\lambda/8$ , тогда система уравнений для ИП будет иметь вид

$$\begin{aligned} U_1 &= E^2 \cdot [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)]; \\ U_2 &= E^2 \cdot [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi/2)]; \\ U_3 &= E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi)]; \\ U_4 &= E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 3\pi/2)]; \end{aligned} \quad (1)$$

Применяя к выражению для каждого из снятых с зондов отсчетов дискретное преобразование Фурье, получим постоянную составляющую спектра

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k = \frac{1}{4} \{ E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi/2)] + \\ &+ E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi)] + E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 3\pi/2)] \}. \end{aligned} \quad (2)$$

После несложного преобразования выражение (2) приобретет следующий вид:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{E^2}{4} \{ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] + \\ &+ [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] \} = \\ &= \frac{E^2}{4} \{ 4 \cdot [1 + \Gamma^2] \} = E^2 + E^2 \cdot \Gamma^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Первая гармоника амплитудного спектра

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k \cdot e^{-j2\pi(k-1)/N} = \frac{E^2}{4} \{ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi/2)] \cdot e^{-j2\pi/4} + \\ &+ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi)] \cdot e^{-j4\pi/4} + E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 3\pi/2)] \cdot e^{-j6\pi/4} \} = \\ &= \frac{E^2}{4} \{ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] - [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] \cdot e^{-j\pi/2} + \\ &+ [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] \cdot e^{-j\pi} + [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] \cdot e^{-j3\pi/2} \}. \end{aligned}$$

Используя формулу Эйлера

$$e^{-j\varphi} = \cos(\varphi) - j \cdot \sin(\varphi), \quad (4)$$

получаем

$$e^{-j\pi/2} = \cos(\pi/2) - j \cdot \sin(\pi/2) = -j;$$

$$e^{+j\pi} = \cos(\pi) - j \cdot \sin(\pi) = -1;$$

$$e^{-j3\pi/2} = \cos(3\pi/2) - j \cdot \sin(3\pi/2) = j.$$

Тогда

$$C_1 = \frac{E^2}{4} \{ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] \cdot (-j) +$$

$$+ [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] \cdot (-1) + [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] \cdot (j) \} =$$

$$= \frac{E^2}{4} \{ 4\Gamma \cdot (\cos(\varphi) + j \cdot \sin(\varphi)) \}.$$

Амплитудная составляющая первой гармоники определяется из выражения

$$C_1 = \frac{E^2}{4} \{ 4\Gamma \cdot (\cos(\varphi) + j \cdot \sin(\varphi)) \} = E^2 \Gamma \cdot \sqrt{\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)} = E^2 \Gamma. \quad (5)$$

Вторая гармоника

$$C_2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k \cdot e^{-j2\pi(k-1)/N} = \frac{E^2}{4} \{ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi/2)] \cdot e^{-j\pi} +$$

$$+ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + \pi)] \cdot e^{-j2\pi} + E^2 [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi + 3\pi/2)] \cdot e^{-j3\pi} \}.$$

Используя формулу Эйлера (4), получим

$$C_2 = \frac{E^2}{4} \{ [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] \cdot (-1) +$$

$$+ [1 + \Gamma^2 - 2 \cdot \Gamma \cdot \cos(\varphi)] + [1 + \Gamma^2 + 2 \cdot \Gamma \cdot \sin(\varphi)] \cdot (-1) \} = 0. \quad (6)$$

Вычислим  $\Gamma$  из выражений для постоянной составляющей сигнала (3) и первой гармоники (5):

$$\Gamma = \sqrt{\frac{C_0}{E^2} - 1}, \quad \Gamma = \frac{C_1}{E^2}. \quad (7)$$

При равенстве коэффициентов передачи зондов

$$\sqrt{\frac{C_0}{E^2} - 1} - \frac{C_1}{E^2} = 0.$$

Введем коэффициент, характеризующий отклонение коэффициентов передачи зондов  $K_{ПЗ}$ :

$$K = \left( \sqrt{\left( \frac{C_0}{E^2} - 1 \right)} - \frac{C_1}{E^2} \right) + \frac{C_2}{E^2}. \quad (8)$$

Исходя из (6), (7), следует, что коэффициент  $K$  зависит только от  $\Gamma$  и погрешности, обусловленной неидентичностью зондов. Это делает возможным определение максимальных значений  $K$  путем вычислительного эксперимента.

Зависимость коэффициента  $K$  от вариантов  $N$  комбинаций  $K_{ПЗ}$  (рис. 1) получена в результате математического моделирования путем последовательного перебора во вложенных циклах (в пятипроцентном диапазоне с шагом 1 %)  $K_{ПЗ4}$ ,  $K_{ПЗ3}$ ,  $K_{ПЗ2}$  при фиксированном зна-

чений  $K_{ПЗ1}$ . Характер зависимости показывает, что коэффициент  $K$  равен нулю при равенстве  $K_{ПЗ1}$  (идентичности зондов) и увеличивается при их неидентичности.

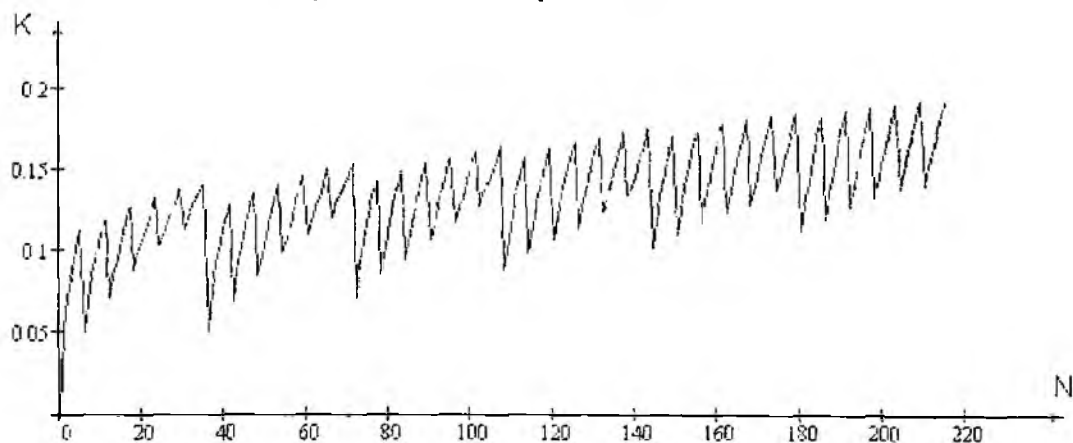


Рис. 1

Таким образом, при применении дискретного преобразования Фурье к отсчетам, снятым с измерительных преобразователей (в предположении, что в линии передачи распространяются монохроматические колебания СВЧ основного типа и все коэффициенты передачи зондов равны) будем получать спектр сигнала, содержащий постоянную составляющую и первую гармонику; коэффициент  $K$ , характеризующий отклонение коэффициентов передачи зондов, будет равен нулю. При появлении в преобразовании Фурье гармоник высшего порядка  $n$ , соответственно, при неравенстве нулю коэффициента  $K$  можно сделать вывод о неравенстве коэффициентов передачи зондов и необходимости их корректировки относительно первого зонда, взятого за эталонный.

### Выводы

Предложен метод на основе дискретного преобразования Фурье для идентификации коэффициентов передачи зондов с минимизацией количества вспомогательных элементов, который позволит повысить точность идентификации и минимизировать погрешность измерения СВЧ-мультиметра.

**Список литературы:** 1. Механников А.И., Перепелкин В. А. Микроволновый мультиметр и алгоритмы его работы // Измерительная техника. 1994. №3. С.52-56. 2. Бондаренко И.К., Дейнега Г.А., Маграчев З.В. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов. М. Сов. радио, 1969. 303 с. 3. Егоров А.Б., Захаров И.П., Белокурский Ю.П. Автоматизированная система для измерения параметров сигнала и нагрузки в рассогласованных линиях передачи // Радиотехника. 1986. Вып. 77. С. 26-35. 4. Козлов Ю.В., Козлова А.Н. Метод идентификации коэффициентов передачи зондов дискретной измерительной линии высокого уровня мощности СВЧ // Материалы междунаро. научно-техн. конф. студентов, аспирантов и ученых "Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2007". Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. С.149.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редакцию 15.07.2008