

УДК 621. 317. 791

А.Н. Трушкин, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ВОСЬМИПОЛЮСНИКА

Проводится анализ работы восьмиполусного одностороннего преобразователя в измерителях параметров СВЧ устройств. Предложена упрощенная модель измерителя комплексного коэффициента отражения, обеспечивающая минимальные вычислительные затраты и простой СВЧ тракт на основе двойного волноводного тройника.

Ключевые слова: сверхвысокочастотный тракт, восьмиполусный односторонний преобразователь, ориентированный граф, комплексный коэффициент отражения, измеритель.

Точность измерения параметров СВЧ устройств зависит от степени идентичности амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик опорного и измерительного каналов измерительной системы. Конструкторско-технологические методы повышения точности практически исчерпаны, и дальнейшее снижение погрешностей измерения в СВЧ диапазоне идет по пути развития различных методов коррекции [1]. Реализация аналитических методов коррекции дает определенные преимущества в точности и простоте построения корректирующего преобразователя (ПКП).

Целью работы является исследование возможностей аналитического метода коррекции погрешностей, обусловленных неидентичностью элементов матрицы рассеивания, конечной развязкой и неидеальностью согласования элементов СВЧ тракта измерителя.

На рисунке 1 изображена обобщенная структурная схема измерительного преобразователя на основе восьмиполусника.

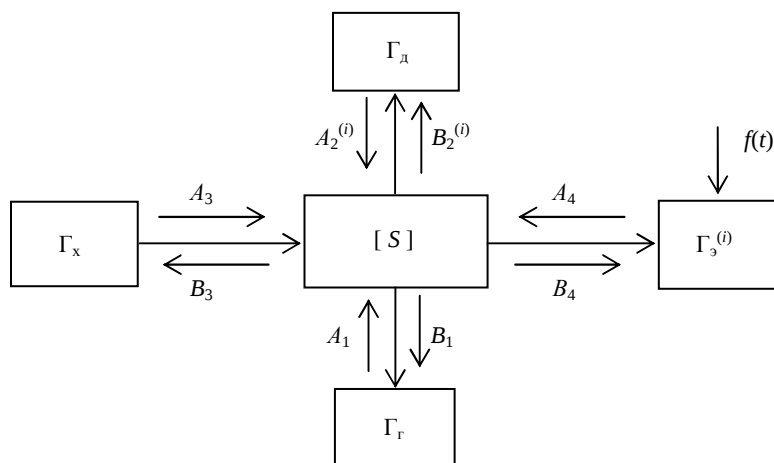


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного преобразователя

На рисунке 1 через Γ_r , Γ_d , Γ_x , Γ_3 обозначены комплексные коэффициенты отражения (ККО) генератора, датчика мощности, исследуемой и эталонной нагрузок.

Определим зависимость выходного сигнала датчика мощности в i -ом состоянии эталонной нагрузки. Для этого воспользуемся известной взаимосвязью падающих и отраженных волн на полюсах восьмиполусника:

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 + S_{14}a_4 ; \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 + S_{24}a_4 ; \\ b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3 + S_{34}a_4 ; \\ b_4 = S_{41}a_1 + S_{42}a_2 + S_{43}a_3 + S_{44}a_4 . \end{cases} \quad (1)$$

Граничные условия на полюсах восьмиполусника записываются следующим образом:

$$\begin{cases} a_1 = E_z + b_1 \Gamma_z ; \\ a_2 = b_2 \Gamma_d ; \\ a_3 = b_3 \Gamma_x ; \\ a_4 = b_4 \Gamma_z . \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя (2) в систему уравнений (1), преобразуем ее к виду:

$$\begin{cases} -S_{11}E_z = b_1(S_{11}\Gamma_z - 1) + b_2S_{12}\Gamma_d + b_3S_{13}\Gamma_x + b_4S_{14}\Gamma_z ; \\ -S_{21}E_z = b_1S_{21}\Gamma_z + b_2(S_{22}\Gamma_d - 1) + b_3S_{23}\Gamma_x + b_4S_{24}\Gamma_z ; \\ -S_{31}E_z = b_1S_{31}\Gamma_z + b_2S_{32}\Gamma_d + b_3(S_{33}\Gamma_x - 1) + b_4S_{34}\Gamma_z ; \\ -S_{41}E_z = b_1S_{41}\Gamma_z + b_2S_{42}\Gamma_d + b_3S_{43}\Gamma_x + b_4(S_{44}\Gamma_z - 1) . \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы уравнений (3) относительно волны b_2 , падающей на датчик мощности ДМ, имеет вид

$$b_2 = \frac{E_z S_{21} (1 - S_{33} \Gamma_x - S_{44} \Gamma_z - \Gamma_x \Gamma_z S_{34}^2 + \Gamma_x \Gamma_z S_{33} S_{44}) + \Gamma_z S_{24} S_{41} (1 - S_{33} \Gamma_x) + \Gamma_x S_{23} S_{31} (1 - S_{44} \Gamma_z)}{N}, \quad (4)$$

где $N = 1 - S_{11} \Gamma_\Gamma - S_{22} \Gamma_d - S_{33} \Gamma_x - S_{44} \Gamma_z - S_{21}^2 \Gamma_d \Gamma_\Gamma - S_{31}^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_x - S_{41}^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_z - S_{23}^2 \Gamma_d \Gamma_x - S_{24}^2 \Gamma_d \Gamma_z - S_{34}^2 \Gamma_x \Gamma_z +$

$$+ S_{11} \Gamma_\Gamma \Gamma_z S_{44} + S_{11} \Gamma_\Gamma \Gamma_d S_{22} + S_{11} \Gamma_\Gamma \Gamma_x S_{33} + S_{22} \Gamma_z \Gamma_d S_{44} + S_{22} \Gamma_d \Gamma_x S_{33} + S_{33} \Gamma_x \Gamma_z S_{44} .$$

В результате преобразований выражение (4) приводится к виду

$$b_2 = \frac{E_\Gamma S_{21} (1 - A_1 \Gamma_x - A_2 \Gamma_z - A_3 \Gamma_x \Gamma_z)}{1 - A_4 - A_5 \Gamma_x - A_6 \Gamma_z + A_7 \Gamma_x \Gamma_z}, \quad (5)$$

где $A_1 = S_{33} - \frac{S_{23} S_{31}}{S_{21}} ; A_2 = -S_{44} + \frac{S_{24} S_{41}}{S_{21}} ; A_3 = S_{34}^2 + S_{33} S_{44} - \frac{S_{24} S_{41} S_{33}}{S_{21}} - \frac{S_{23} S_{31} S_{44}}{S_{21}} ;$

$$A_4 = S_{11} \Gamma_\Gamma - S_{22} \Gamma_d - S_{21}^2 \Gamma_d \Gamma_\Gamma + S_{11} \Gamma_d \Gamma_\Gamma S_{22} ; A_5 = -S_{33} - S_{31}^2 \Gamma_\Gamma - S_{23}^2 \Gamma_d + S_{11} \Gamma_\Gamma S_{33} + S_{22} \Gamma_d S_{33} ;$$

$$A_6 = -S_{44} - S_{41}^2 \Gamma_\Gamma - S_{24}^2 \Gamma_d + S_{11} \Gamma_\Gamma S_{44} + S_{22} \Gamma_d S_{44} ; A_7 = S_{33} S_{44} .$$

Таким образом, для напряжения на выходе квадратичного детектора получим

$$U_2 = K_d |b_2|^2 = K_d E_\Gamma^2 \left| \frac{S_{21} (1 - A_1 \Gamma_x - A_2 \Gamma_z - A_3 \Gamma_x \Gamma_z)}{1 - A_4 - A_5 \Gamma_x - A_6 \Gamma_z + A_7 \Gamma_x \Gamma_z} \right|^2, \quad (6)$$

где K_d — коэффициент преобразования СВЧ детектора.

Выражение (6) представляет собой нелинейное уравнение, связывающее напряжение СВЧ детектора с комплексными коэффициентами отражения Γ_x , Γ_z , исследуемого двухполюсника, эталонной нагрузки и обобщенными константами A_n . Причем Γ_z заранее изменяется по фазе и определяется известными методами. Поэтому число стационарных состояний измерителя может быть задано, исходя из условия

$$i \geq m ,$$

где i — число значений фазового сдвига α_i комплексного коэффициента отражения эталонной нагрузки; m — число неизвестных в уравнении (6).

Исходя из этих соображений, получаем систему уравнений

$$U_2^i = K_d |b_2^i|^2 = K_d E_\Gamma^2 \left| \frac{S_{21} (1 - A_1 \Gamma_x - A_2 \Gamma_{zi} - A_3 \Gamma_x \Gamma_{zi})}{1 - A_4 - A_5 \Gamma_x - A_6 \Gamma_{zi} + A_7 \Gamma_x \Gamma_{zi}} \right|^2, \quad (7)$$

которая может быть решена относительно неизвестных.

Очевидно, что точное решение системы (7) требует больших вычислительных затрат, оправданных при точных измерениях.

Пренебрегая членами второго и более высоких порядков малости в формулах (4)...(7), получаем приближенные выражения для констант калибровки:

$$A_1 = S_{33} - \frac{S_{23}S_{31}}{S_{21}}; \quad (8)$$

$$A_2 = -S_{44} + \frac{S_{24}S_{41}}{S_{21}}; \quad (9)$$

$$A_3 = -\frac{S_{24}S_{41}S_{33}}{S_{21}} - \frac{S_{23}S_{31}S_{44}}{S_{21}}; \quad (10)$$

$$A_4 = S_{11}\Gamma_{\Gamma} - S_{22}\Gamma_{\Delta}; \quad (11)$$

$$A_5 = -S_{33} - S_{31}^2\Gamma_{\Gamma} - S_{23}^2\Gamma_{\Delta}; \quad (12)$$

$$A_6 = -S_{44} - S_{41}^2\Gamma_{\Gamma} - S_{24}^2\Gamma_{\Delta}; \quad (13)$$

$$A_7 = 0. \quad (14)$$

С учетом (8)–(13) получим

$$U_2^i = K_{\Delta} |b_2^i|^2 = K_{\Delta} E_{\Gamma}^2 \left| \frac{S_{21} (1 - A_1\Gamma_X - A_2\Gamma_{\Delta i} - A_3\Gamma_X\Gamma_{\Delta i})}{1 - A_4 - A_5\Gamma_X - A_6\Gamma_{\Delta i}} \right|^2. \quad (15)$$

В случае малых рассогласований плеч восьмиполусника ($S_{11} \cong S_{22} \cong S_{33} \cong S_{44} \cong 0$) выражения для констант калибровки будут иметь вид:

$$A_1 = -\frac{S_{23}S_{31}}{S_{21}}; \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{S_{24}S_{41}}{S_{21}}; \quad (17)$$

$$A_3 = 0; \quad (18)$$

$$A_4 = 0; \quad (19)$$

$$A_5 = -S_{31}^2\Gamma_{\Gamma} - S_{23}^2\Gamma_{\Delta}; \quad (20)$$

$$A_6 = -S_{41}^2\Gamma_{\Gamma} - S_{24}^2\Gamma_{\Delta}; \quad (21)$$

$$A_7 = 0. \quad (22)$$

С учетом (16)–(22) получим систему уравнений для упрощенной модели

$$U_2^i = K_{\Delta} |b_2^i|^2 = K_{\Delta} E_{\Gamma}^2 \left| \frac{S_{21} (1 - A_1\Gamma_X - A_2\Gamma_{\Delta i})}{1 - A_5\Gamma_X - A_6\Gamma_{\Delta i}} \right|^2. \quad (23)$$

Восьмиполусник может быть реализован на основе двойного волноводного тройника, показанного на рисунке 2

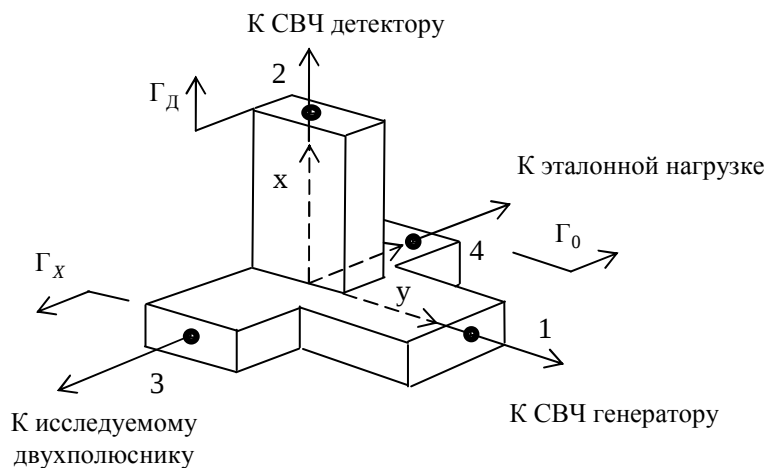


Рисунок 2 – Схема двойного волноводного тройника

В отличие от измерительной линии или рефлектометра на направленных ответвителях двойной волноводный тройник позволяет достаточно просто выравнивать электрические длины опорного и измерительного каналов, что является весьма важным преимуществом этого элемента при построении панорамных измерителей комплексного коэффициента отражения, работающих в широкой полосе частот.

Задачами дальнейших исследований является:

— разработка и экспериментальное исследование эталонной нагрузки с постоянным в широкой полосе частот модулем коэффициента отражения и изменяющейся во времени фазой по заданному закону;

— разработка и исследование устройства управления эталонной нагрузкой.

Библиографический список

1. Зайцев А.Н. Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение: учебное пособие для средних специальных учебных заведений/ А.Н. Зайцев, П.А. Иващенко, А.В. Мыльников. — М.: Изд-во стандартов, 2002. — 240 с.

Поступила в редакцию 10.06.2009 г.