

УДК 537.86.029

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ КАЛИБРОВКИ И НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ S -ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А.А. КОПШАЙ, А.В. ГУСИНСКИЙ, А.М. КОСТРИКИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 1 ноября 2017

Аннотация. В статье описана математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения S -параметров, используемая в векторном анализаторе цепей миллиметрового диапазона длин волн R4-MVM-178, разработанного в Центре 1.9 НИЧ БГУИР. С учетом особенностей конструкции векторного анализатора цепей приведены уравнения калибровки и непосредственного измерения, позволяющие осуществить оптимальный выбор рабочих эталонов мер для калибровки анализатора и реализовать алгоритмы обработки измерительной информации.

Ключевые слова: векторные анализаторы цепей, калибровка.

Abstract. The article describes mathematical model of calibration and S -parameter measurement processes used in millimeter wave band vector network analyzer R4-MWM-178. Assuming the specific construction of mentioned vector network analyzer the equations for calibration and measurement are provided, which allow to choose the optimal reference measures and implement algorithms of measurement data processing .

Keywords: vector chain analyzers, calibration.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 111, No. 1, pp. 95-98

**Mathematical model of calibration and S -parameter measurement processes
using vector network analyzer in millimeter wave band**

A.A. Kopshai, A.V. Gusinski, A.M. Kostrikin

Введение

При любых СВЧ измерениях имеются систематические погрешности, связанные с измерительной СВЧ системой, которые приводят к неидеальности полученных результатов. В случае измерения S -параметров СВЧ устройств к комплексным параметрам, влияющим на погрешности измерений, относятся: E_D – параметры направленности, обусловленные неидеальностью ответвляющих устройств; E_S – параметры рассогласования со стороны источника СВЧ сигнала; E_L – параметры рассогласования нагрузки на выходе объекта измерения; E_M – параметры развязки, обусловленные перекрестными связями между путями опорных и измерительных сигналов; E_p – параметры, обусловленные утечками, паразитными передачами, которые возникают, например, при исследовании СВЧ модулей (СВЧ сборок); E_R , E_T – параметры, зависящие от частоты потери в каналах, используемых при измерениях комплексных коэффициентов отражения и передачи [1]. В наиболее общем случае, при измерении параметров двухполюсников и четырехполюсников, математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения включает в себя 16 комплексных

параметров (16-типараметрическая модель). Часть параметров математической модели может не учитываться, если характер объекта измерения позволяет это сделать. Так, четыре параметра E_p необходимы только для СВЧ устройств, выполненных на платах или подложках с переходами-зондами к измерительным портам, что обуславливает наличие дополнительных утечек СВЧ мощности между портами.

Более простая 12-типараметрическая модель включает в себя шесть параметров для прямого направления передачи и шесть параметров для обратного (реверсного) направления. В [1] приведены уравнения, связывающие результаты измерений S_{11u} , S_{21u} , S_{22u} , S_{12u} с действительными значениями S_{11x} , S_{21x} , S_{22x} , S_{12x} объектов измерения:

$$S_{11u} = \frac{E_{TR}}{(1 - E_D E_{LR})} \left\{ E_D + \frac{E_R}{(1 - S_{11x} E_S)} \left[S_{11x} + \frac{S_{12x} S_{21x}}{(1 - S_{22x} E_{SR})} \left(E_{SR} + \frac{E_L E_{RR}}{1 - E_L E_{DR}} \right) \right] \right\}; \quad (1)$$

$$S_{21u} = E_M + \frac{S_{21x} E_T E_{RR}}{(1 - E_D E_{LR})(1 - S_{11x} E_S)(1 - S_{22x} E_{SR})(1 - E_L E_{DR})}; \quad (2)$$

$$S_{22u} = \frac{E_T}{(1 - E_{DR} E_L)} \left\{ E_{DR} + \frac{E_{RR}}{(1 - S_{22x} E_{SR})} \left[S_{22x} + \frac{S_{12x} S_{21x}}{(1 - S_{11x} E_S)} \left(E_S + \frac{E_{LR} E_D}{1 - E_{LR} E_D} \right) \right] \right\}; \quad (3)$$

$$S_{12u} = E_{MR} + \frac{S_{12x} E_{TR} E_R}{(1 - E_{DR} E_L)(1 - S_{22x} E_{SR})(1 - S_{11x} E_S)(1 - E_{LR} E_D)}; \quad (4)$$

$$S_{11x} = \frac{1}{\Pi} \left\{ \left(\frac{S_{11u} - E_D}{E_R} \right) \left[1 + \left(\frac{S_{22u} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) E_{SR} \right] - \left[\left(\frac{S_{21u} - E_M}{E_T} \right) \left(\frac{S_{12u} - E_{MR}}{E_{TR}} \right) E_L \right] \right\}; \quad (5)$$

$$S_{21x} = \frac{1}{\Pi} \left\{ \left[1 + \left(\frac{S_{22u} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) (E_{SR} - E_L) \right] \left(\frac{S_{21u} - E_M}{E_T} \right) \right\}; \quad (6)$$

$$S_{12x} = \frac{1}{\Pi} \left\{ \left[1 + \left(\frac{S_{11u} - E_D}{E_R} \right) (E_S - E_{LR}) \right] \left(\frac{S_{12u} - E_{MR}}{E_{TR}} \right) \right\}; \quad (7)$$

$$S_{22x} = \frac{1}{\Pi} \left\{ \left(\frac{S_{22u} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) \left[1 + \left(\frac{S_{11u} - E_D}{E_R} \right) E_S \right] - \left(\frac{S_{12u} - E_M}{E_T} \right) \left(\frac{S_{21u} - E_{MR}}{E_{TR}} \right) \right\}; \quad (8)$$

$$\Pi = \left[1 + \left(\frac{S_{11u} - E_D}{E_R} \right) E_S \right] \left[1 + \left(\frac{S_{22u} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) E_{SR} \right] - \left[\left(\frac{S_{21u} - E_M}{E_T} \right) \left(\frac{S_{12u} - E_{MR}}{E_{TR}} \right) E_L E_{LR} \right]. \quad (9)$$

В уравнениях (1)–(9) второй индекс R говорит об обратном направлении передачи.

Математическая модель процессов калибровки и измерения

Измерительные СВЧ системы могут быть реализованы либо таким образом, чтобы сразу обеспечивать возможность измерения всех параметров объекта (для этого требуются более сложные схемы), либо использовать измерение в одном направлении, когда сразу определяются только значения S_{11u} , S_{21u} , а для определения значений S_{22u} , S_{12u} объект измерения переориентируется физически. В нашем случае, векторный анализатор цепей конструктивно реализован в виде однонаправленного СВЧ тракта со вторым принципом.

С учетом этого при определении S_{11u} , S_{21u} модель будет описываться следующими параметрами: E_D , E_M , E_R , E_T , E_L , E_S , $E_{RR} = E_{TR} = 1$, $E_{DR} = E_{MR} = E_{LR} = E_{SR} = 0$. В свою очередь, при определении S_{22u} , S_{12u} в результате переориентации объекта измерения физически модель будет включать параметры E_{DR} , E_{MR} , E_{RR} , E_{TR} , E_{LR} , E_{SR} , $E_R = E_T = 1$,

$E_D = E_M = E_L = E_S = 0$. При этом по величине параметры $E_D, E_M, E_R, E_T, E_L, E_S$ при определении S_{11u}, S_{21u} совпадают с параметрами $E_{DR}, E_{MR}, E_{RR}, E_{TR}, E_{LR}, E_{SR}$ при определении S_{22u}, S_{12u} . С учетом приведенного выше, уравнения (1)–(4) будут иметь следующий вид:

$$S_{11u} = E_D + \frac{E_R}{(1 + S_{11x}E_S)}(S_{11x} + S_{12x}S_{21x}E_L); \quad (10)$$

$$S_{21u} = E_M + \frac{E_T S_{21x}}{1 - S_{11x}E_S}; \quad (11)$$

$$S_{22u} = E_D + \frac{E_R}{(1 - S_{22x}E_S)}(S_{22x} + S_{12x}S_{11x}E_L); \quad (12)$$

$$S_{12u} = E_M + \frac{E_T S_{12x}}{1 - S_{22x}E_S}. \quad (13)$$

Уравнения (10), (11) являются уравнениями калибровки, и их можно использовать для определения параметров $E_D, E_M, E_R, E_T, E_L, E_S$. Для этого используются рабочие эталоны, задающие режимы: согласования путем подключения согласованной нагрузки при определении S_{11u} (калибровка 1) и S_{21u} (калибровка 2) – $S_{11x} = S_{21x} = S_{22x} = S_{12x} = 0$; короткого замыкания путем подключения короткозамыкателя при определении S_{11u} (калибровка 3) – $S_{11x} = -1, S_{21x} = S_{22x} = S_{12x} = 0$; отражения от короткозамыкателя при известном фазовом сдвиге путем подключения мер фазового сдвига [2] и короткозамыкателя при определении S_{11u} (калибровка 4) – $S_{11x} = -e^{j\varphi}$, где φ – воспроизводимый фазовый сдвиг, приблизительно равный $-\pi$ для среднего значения частотного диапазона анализатора, $S_{21x} = S_{22x} = S_{12x} = 0$; замыкания накоротко измерительных фланцев в режимах определения S_{11u} (калибровка 5) и S_{21u} (калибровка 6) – $S_{11x} = S_{22x} = 0, S_{21x} = S_{12x} = 1$:

$$E_D = S_{11u}^{K1}; E_M = S_{21u}^{K2};$$

$$E_S = \frac{(S_{11u}^{K4} - S_{11u}^{K1}) - (S_{11u}^{K3} - S_{11u}^{K1})e^{j\varphi}}{e^{j\varphi}(S_{11u}^{K3} - S_{11u}^{K4})};$$

$$E_R = \frac{(S_{11u}^{K4} - S_{11u}^{K1})(S_{11u}^{K3} - S_{11u}^{K1})(1 - e^{j\varphi})}{e^{j\varphi}(S_{11u}^{K3} - S_{11u}^{K4})};$$

$$E_L = \frac{S_{11u}^{K5} - S_{11u}^{K1}}{E_R}; E_T = S_{21u}^{K6} - S_{11u}^{K2}.$$

Из уравнений (5)–(9) с учетом особенностей однонаправленного СВЧ тракта можно получить уравнения восстановления действительных значений $S_{11x}, S_{21x}, S_{22x}, S_{12x}$:

$$S_{11x} = \frac{1}{\Pi_1} \left\{ \frac{(S_{11u} - E_D)}{E_R} \left[1 - \frac{(S_{21u} - E_M)S_{12u}E_L}{E_T} \right] \right\};$$

$$S_{21x} = \frac{1}{\Pi_1} \left[\frac{(S_{21u} - E_M)(1 - S_{22u}E_L)}{E_T} \right];$$

$$S_{12x} = \frac{1}{\Pi_1} \left[\frac{(S_{12u} - E_M)(1 - S_{11u}E_L)}{E_T} \right];$$

$$S_{22x} = \frac{1}{\Pi_1} \left\{ \frac{(S_{22u} - E_D)}{E_R} \left[1 - \frac{(S_{12u} - E_M)S_{21u}E_L}{E_T} \right] \right\}.$$

Заклучение

Предложена математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения S -параметров для однонаправленного измерительного СВЧ тракта. Осуществлен оптимальный выбор рабочих эталонов, что позволяет скорректировать результаты измерений с учетом выбранной математической модели. Приведены алгоритмы обработки измерительной информации.

Список литературы

1. Гусинский А.В., Шаров Г.А., Кострикин А.М. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Ч. 3 (Кн. 1). Минск: БГУИР, 2008. 240 с.
2. Метрологическое обеспечение средств измерений в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн / А.В. Гусинский [и др.] // Тез. докл. IX Всерос. науч.-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике». Москва, 17–19 июня 2014 г. С. 6.

References

1. Gusinskij A.V., Sharov G.A., Kostrikin A.M. Vektornye analizatory cepej millimetrovyh voln. Ch. 3 (Kn.1). Minsk: BGUIR, 2008. 240 s. (in Russ.)
2. Metrologicheskoe obespechenie sredstv izmerenij v santimetrovom i millimetrovom diapazone dlin voln / A.V. Gusinskij [i dr.] // Tez. dokl. IX Vseros. nauch.-tehn. konf. «Metrologija v radiojelektronike». Moskva, 17–19 ijunja 2014 g. S. 6. (in Russ.)

Сведения об авторах

Копшай А.А., научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гусинский А.В., к.т.н., доцент, директор Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кострикин А.М., к.т.н., доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kopshai A.A., researcher of the Center 1.9 Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Gusinsky A.V., PhD, associate professor, head of the Center 1.9 of the Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kostrikin A.M., PhD, associate professor of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-62;
e-mail: kopshai@tut.by
Копшай Алексей Андреевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-88-76;
e-mail: kopshai@tut.by
Kopshai Alexey Andreevich