

Метод измерения S -параметров невзаимных телекоммуникационных устройств СВЧ-диапазона

С. Л. Ремизов, Ю. В. Рясный

В статье рассмотрен метод определения S -параметров пассивных невзаимных четырёхполюсников на основе измеренных комплексных коэффициентов отражений на входе и выходе, который может быть реализован с использованием простых измерительных приборов – измерительных линий или рефлектометров. Приведен порядок формирования невырожденной системы измерительных уравнений, рассмотрен метод калибровки измерителя, проведено моделирование метода измерения.

Ключевые слова: СВЧ-четырёхполюсники, S -параметры, плоскости измерения, относительное возбуждение, уравнения измерения, уравнения калибровки.

1. Введение

Использование СВЧ-диапазона в телекоммуникационных системах позволяет повысить скорость передачи дискретной информации. Качество функционирования такого рода систем существенно зависит от многих факторов, одним из которых является рассогласование в тракте СВЧ, вызванное отражениями от входов и выходов используемых устройств: фильтров, вентилях, аттенюаторов и др., которое описывается и определяется через матрицы рассеяния данных устройств. Поэтому задача измерения S -параметров как пассивных, так и активных устройств является актуальной. В настоящее время измерение S -параметров невзаимных четырёхполюсников производится анализаторами цепей, которые являются дорогостоящими приборами [1, 2]. В данной работе предлагается метод измерения S -параметров невзаимных четырёхполюсников простыми приборами – измерителями комплексных коэффициентов отражений, например, измерительными линиями или 12-полюсными рефлектометрами [3]. Основная трудность при измерении S -параметров пассивных невзаимных четырёхполюсников в этом случае заключается в формировании невырожденной системы измерительных уравнений, а также в разработке алгоритма калибровки для определения отношения возбуждений.

2. Теория

На рис. 1 приведена функциональная схема измерителя S -параметров четырёхполюсника. Измерителями комплексных коэффициентов отражений являются 12-полюсные рефлектометры.

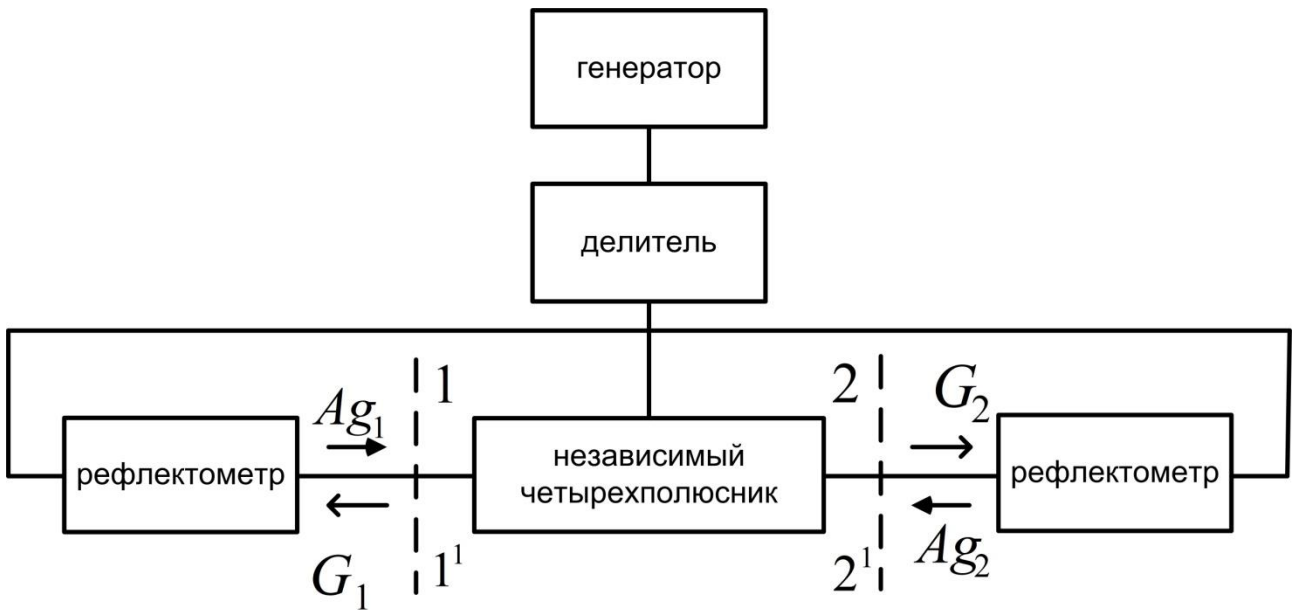


Рис. 1. Функциональная схема измерителя S-параметров невзаимного пассивного четырехполюсника

Сигнальный граф схемы измерения S-параметров четырехполюсника имеет вид

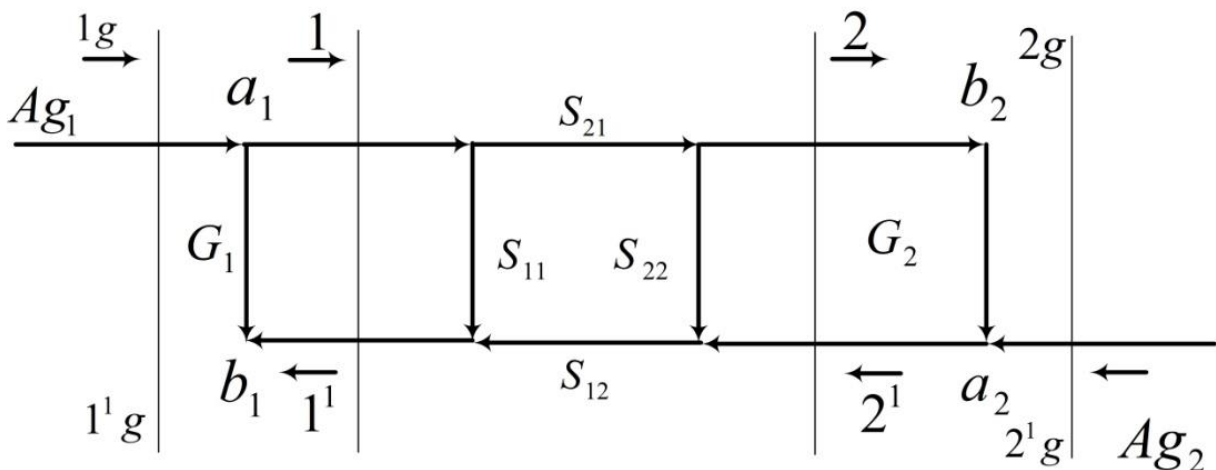


Рис. 2. Сигнальный граф измерения S-параметров четырехполюсника

$1g-1^1g$, $2g-2^1g$ – плоскости падения волн Ag_1 и Ag_2 генераторов,

$1-1^1$, $2-2^1$ – плоскости измерения комплексных коэффициентов отражений, G_1 , G_2 – комплексные коэффициенты отражения со стороны выходов рефлектометров, S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} – параметры четырехполюсника, Ag_1 и Ag_2 – волны напряжения на выходах 12-полюсных рефлектометров, a_1 , a_2 – падающие на четырехполюсник и b_1 , b_2 – отраженные от четырехполюсника волны напряжения.

Определим падающие на четырехполюсник a_1 , a_2 и отраженные b_1 , b_2 от четырехполюсника волны напряжения, используя правило Мезона [4]:

$$a_1 = \frac{Ag_1(1 - S_{22}G_2) + Ag_2S_{12}G_1}{\Delta}, \quad (1)$$

$$a_2 = \frac{Ag_2(1 - S_{11}G_1) + Ag_1S_{21}G_1}{\Delta}, \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{Ag_1(S_{11} - \Delta_1 G_2) + Ag_2 S_{12}}{\Delta}, \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{Ag_2(S_{22} - \Delta_1 G_1) + Ag_1 S_{21}}{\Delta}, \quad (4)$$

где Δ , Δ_1 – определитель графа четырехполюсника и главный определитель графа схемы измерения, соответственно равные

$$\Delta_1 = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12}, \quad (5)$$

$$\Delta = 1 - S_{11}G_1 - S_{22}G_2 - S_{12}S_{21}G_1G_2 + S_{11}S_{22}G_1G_2. \quad (6)$$

Измеренные в плоскостях $1-1^1$, $2-2^1$ комплексные коэффициенты отражения G_{11} , G_{22} определяются как отношение отраженных волн b_1 , b_2 к падающим волнам a_1 , a_2 и обусловлены волнами напряжения Ag_1 , Ag_2 на выходах рефлектометров:

$$G_{11} = \frac{S_{11} - \Delta_1 G_2 + S_{12} \frac{Ag_2}{Ag_1}}{1 - S_{22}G_2 + S_{12}G_1 \frac{Ag_2}{Ag_1}} = \frac{S_{11} - \Delta_1 G_2 + S_{12}A_1}{1 - S_{22}G_2 + S_{12}G_1A_1}, \quad (7)$$

$$G_{22} = \frac{S_{22} - \Delta_1 G_1 + S_{21} \frac{Ag_1}{Ag_2}}{1 - S_{11}G_1 + S_{21}G_2 \frac{Ag_1}{Ag_2}} = \frac{S_{22} - \Delta_1 G_1 + S_{21}A_2}{1 - S_{11}G_1 + S_{21}G_2A_2}. \quad (8)$$

Для определения $[S]$ -матрицы четырехполюсника сформируем систему измерительных уравнений для следующих режимов измерения:

а) $A_1 = \frac{Ag_2}{Ag_1} \neq 0$ – рефлектометры с коэффициентами отражения G_1 , G_2 подключены непосредственно к входу и выходу измеряемого четырехполюсника, измеряется комплексный коэффициент отражения G_{11a} на входе четырехполюсника;

б) $A_1 = \frac{Ag_2}{Ag_1} \neq 0$ – первый рефлектометр с коэффициентом отражения G_1 подключен непосредственно к входу, а второй рефлектометр подключен к выходу четырехполюсника через отрезок линии (меру волнового сопротивления с параметрами: $S_{11} = 0$, $S_{22} = 0$, $A_1 = l \times e^{j\frac{4\pi}{\lambda}l}$, где λ – длина волны в линии, l – длина отрезка линии), имеет коэффициент отражения G_{22} , измеряется комплексный коэффициент отражения G_{11b} на входе четырехполюсника;

в) $A_2 = \frac{Ag_1}{Ag_2} = \frac{1}{A_1} \neq 0$ – рефлектометры с коэффициентами отражения G_1 , G_2 подключены непосредственно к входу и выходу четырехполюсника, измеряется комплексный коэффициент отражения G_{22c} на выходе четырехполюсника;

г) $A_2 = \frac{Ag_1}{Ag_2} = \frac{1}{A_1} \neq 0$ – первый рефлектометр подключен к входу четырехполюсника через отрезок линии, имеет коэффициент отражения G_{11} , а второй рефлектометр с коэффициентом

отражения G_2 подключен непосредственно к выходу четырехполюсника, измеряется комплексный коэффициент отражения G_{22d} на выходе четырехполюсника;

е) $A_3 = \frac{Ag_3}{Ag_1} \neq 0$ – рефлектометры подключены к входу и выходу четырехполюсника через

отрезки линии, имеют коэффициенты отражения G_{11} , G_{22} , измеряется комплексный коэффициент отражения G_{22e} на выходе четырехполюсника.

Запишем систему измерительных уравнений для режимов измерения:

$$G_{11a} = \frac{S_{11} - \Delta_1 G_2 + S_{12} A_1}{1 - S_{22} G_2 + S_{12} G_1 A_1}, \quad (9)$$

$$G_{11b} = \frac{S_{11} - \Delta_1 G_{22} + S_{12} A_1}{1 - S_{22} G_{22} + S_{12} G_1 A_1}, \quad (10)$$

$$G_{22c} = \frac{S_{22} - \Delta_1 G_1 + S_{21} A_2}{1 - S_{11} G_1 + S_{21} G_2 A_2}, \quad (11)$$

$$G_{22d} = \frac{S_{22} - \Delta_1 G_{11} + S_{21} A_2}{1 - S_{11} G_{11} + S_{21} G_2 A_2}, \quad (12)$$

$$G_{22e} = \frac{S_{22} - \Delta_1 G_{11} + S_{21} A_3}{1 - S_{11} G_{11} + S_{21} G_{22} A_3}, \quad (13)$$

где G_{11} , G_{22} – комплексные коэффициенты отражения со стороны выходов рефлектометров при подключении отрезков линий; Ag_3 – другая, отличная от Ag_2 , волна генератора.

Возбуждения устанавливаются аттенюаторами и фазовращателями (в схеме на рис. 1 не показаны) таким образом, чтобы амплитуды либо фазы возбуждений отличались друг от друга.

Для определения возбуждения A_1 , $A_2 = 1/A_1$, A_3 и комплексных коэффициентов отражений выходов рефлектометров G_1 , G_2 , G_{11} , G_{22} сформируем на основе уравнений (9) – (13) систему калибровочных уравнений для следующих режимов калибровки:

1) соединяем непосредственно выходы рефлектометров (без четырехполюсника, в этом случае $S_{11} = 0$, $S_{22} = 0$, $\Delta_1 = 1$) и измеряем комплексные коэффициенты отражения G_{1k1} и G_{1k2} со стороны входа $1-1^1$ для режима $A_1 = 0$ и $A_1 \neq 0$. Из уравнения (9) имеем:

$$G_{1k1} = G_2, \quad (14)$$

$$G_{1k2} = \frac{G_2 + A_1}{1 + G_1 A_1}; \quad (15)$$

2) соединяем непосредственно выходы рефлектометров ($S_{11} = 0$, $S_{22} = 0$, $\Delta_1 = 1$) и измеряем комплексный коэффициент отражения G_{2k1} со стороны выхода $2-2^1$ для режима $A_2 = 0$. Используя уравнение (11), получим

$$G_{2k1} = G_1; \quad (16)$$

3) выходы рефлектометров подключаем через одинаковые отрезки линии – меры волнового сопротивления. Измеряем комплексный коэффициент отражения G_{11k1} со стороны входа

$1-1^1$ и комплексные коэффициенты отражения G_{22k2} , G_{22k3} со стороны выхода $2-2^1$ для режимов: $A_1 = 0$, $A_2 = 0$ и $A_3 \neq 0$. Используя уравнения (10), (12), (13), получим:

$$G_{11k1} = G_{22}, \quad (17)$$

$$G_{22k2} = G_{11}, \quad (18)$$

$$G_{22k3} = \frac{G_{11} + A_3}{1 + G_{22}A_3}. \quad (19)$$

Из уравнений (14) – (19) определяем возбуждение A_1 и A_3 :

$$A_1 = \frac{G_{1k2} - G_{1k1}}{1 - G_{1k2}G_{2k1}}, \quad (20)$$

$$A_3 = \frac{G_{22k3} - G_{22k2}}{1 - G_{11k1}G_{22k3}}. \quad (21)$$

Представим уравнения (9) – (13) в виде системы линейных уравнений относительно неизвестных параметров измеряемого четырехполюсника:

$$\left. \begin{aligned} S_{11} - \Delta_1 G_2 + S_{12}(1 - G_1 G_{11a})A_1 + S_{22}G_{22}G_{11a} &= G_{11a} \\ S_{11} - \Delta_1 G_{22} + S_{12}(1 - G_1 G_{11b})A_1 + S_{22}G_{22}G_{11b} &= G_{11b} \\ S_{11}G_1 G_{22c} - \Delta_1 G_1 + S_{21}(1 - G_2 G_{22c})A_2 + S_{22} &= G_{22c} \\ S_{11}G_1 G_{22d} - \Delta_1 G_{11} + S_{21}(1 - G_2 G_{22d})A_2 + S_{22} &= G_{22d} \\ S_{11}G_1 G_{22e} - \Delta_1 G_{11} + S_{21}(1 - G_{22} G_{22e})A_3 + S_{22} &= G_{22e} \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

Зная G_1 , G_2 , G_{11} , G_{22} , A_1 , A_2 , A_3 , решаем систему уравнений (22) и определяем S -параметры четырехполюсника по формулам:

$$S_{11} = \frac{Det_{s11}}{Det}, \quad (23)$$

$$S_{12} = \frac{Det_{s12}}{Det}, \quad (24)$$

$$S_{21} = \frac{Det_{s21}}{Det}, \quad (25)$$

$$S_{22} = \frac{Det_{s22}}{Det}, \quad (26)$$

где Det , Det_{s11} , Det_{s12} , Det_{s21} , Det_{s22} – главный определитель системы и определители, полученные заменой столбца коэффициентов при S_{ij} на столбец коэффициентов правой части уравнения (22).

3. Моделирование

Пусть S -матрица измеряемого невзаимного четырехполюсника имеет вид:

$$S = \begin{pmatrix} 0.13e^{j70^\circ} & 0.9e^{j45^\circ} \\ 0.08t^{-j17^\circ} & 0.24t^{-j30^\circ} \end{pmatrix}.$$

Установим возбуждения $A_1 = 0.33e^{-j30^\circ}$, $A_2 = 3e^{j30^\circ}$, $A_3 = 3e^{j180^\circ}$ и коэффициенты отражения со стороны выходов рефлектометров $G_1 = 0.3e^{j45^\circ}$, $G_2 = 0.2e^{-j15^\circ}$, $G_{11} = 0.3e^{j225^\circ}$, $G_{22} = 0.2e^{j195^\circ}$.

Погрешности измерения модулей dg и погрешности измерения фаз $d\phi$ величин G_{11a} , G_{11b} , G_{22c} , G_{22d} , G_{22e} задавались в пределах $dg = \pm 0.01, \pm 0.02, \pm 0.04, \pm 0.06$, $d\phi = \pm 6^\circ$. Погрешности измерения S -параметров невзаимного четырехполюсника, полученные при моделировании, приведены в табл. 1.

$$S_{11} = 0.13, \phi_{11} = 70^\circ, S_{12} = 0.9, \phi_{12} = 45^\circ, S_{21} = 0.08, \phi_{21} = -17^\circ, \\ S_{22} = 0.24, \phi_{22} = -30^\circ, \phi_{22} = -30^\circ, df = \pm 6^\circ.$$

Таблица 1. Погрешности моделирования S -параметров невзаимного четырехполюсника

	ΔS_{11}	$\Delta \phi_{11}$	ΔS_{12}	$\Delta \phi_{12}$	ΔS_{21}	$\Delta \phi_{21}$	ΔS_{22}	$\Delta \phi_{22}$
$dg = \pm 0.01$	± 0.006	$\pm 1^\circ$	± 0.015	$\pm 1.2^\circ$	± 0.002	$\pm 2^\circ$	± 0.008	$\pm 1^\circ$
$dg = \pm 0.02$	± 0.011	$\pm 2^\circ$	± 0.04	$\pm 4^\circ$	± 0.003	$\pm 5^\circ$	± 0.02	$\pm 2^\circ$
$dg = \pm 0.04$	± 0.02	$\pm 4^\circ$	± 0.08	$\pm 5^\circ$	± 0.005	$\pm 7^\circ$	± 0.03	$\pm 4^\circ$
$dg = \pm 0.06$	± 0.03	$\pm 5^\circ$	± 0.12	$\pm 8^\circ$	± 0.008	$\pm 9^\circ$	± 0.04	$\pm 7^\circ$

При моделировании было выявлено, что погрешности измерения существенно зависят от выбранных возбуждений и длины отрезка меры волнового сопротивления.

4. Выводы и заключения

Из приведенной теории и результатов моделирования можно сделать вывод, что на основе двух измерителей комплексных коэффициентов отражений можно разработать анализатор СВЧ-цепей с приемлемой для практики точностью. При разработке анализаторов необходимо правильно выбрать возбуждения и длины отрезков мер волнового сопротивления. Минимальные погрешности в определении S -параметров достигаются, как правило, если амплитуда хотя бы одного возбуждения в несколько раз отличается от других амплитуд, а фазы возбуждений должны отличаться друг от друга в пределах 60–180 градусов (в идеальном случае – на 180 градусов).

Литература

1. Балыко И. А., Левашов С. В., Сазонов М. С., Филиппов А. В. Измерение комплексных параметров двухполюсников и четырехполюсников на СВЧ // Материалы Международной научно-технической конференции МИРЭА, 1–5 декабря 2015 г.
2. Савелькаев С. В., Ромасько С. В. Способ измерения S -параметров четырехполюсников СВЧ, предназначенных для включения в микрополосковую линию. Описание изобретения к патенту RU 2653569 С1.
3. Рясный Ю. В. Автоматизированный 12-полюсный рефлектометр // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. 1985. В. 7. С. 117–122.
4. Силаев М. А., Брянцев С. Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств. М.: Советское радио. 1970. 248 с.

Статья поступила в редакцию 07.03.2020;
переработанный вариант – 12.01.2021.

Ремизов Сергей Леонидович

к.т.н., начальник цикла – старший преподаватель военного учебного центра СибГУТИ (6300102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: uvc@sibsutis.ru.

Рясный Юрий Васильевич

Доктор технических наук, профессор.

Область научных исследований – методы и средства измерений параметров СВЧ-сетей, методов определения и коррекции передаточных функций КИХ- и БИХ-фильтров, имеет более 50 научных статей.

Methods for measuring S-parameters of non-reciprocal telecommunication devices of UHF range

S. Remizov, Yu. Ryasny

The method of S-parameters determination of passive non- reciprocal two-port networks based on the metered complex reflection coefficients is considered. The measuring equations are obtained, the methods of calibration and measurement are considered, modeling of a measurement method is produced, recommendations about application of the proposed method are given.

Keywords: the incident and reflected wave of a voltage, a measurement plane, relative excitation, the measurement and calibration equations, s-parameters.