

УДК 621.317.74, 621.372.86

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ S -ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

Коротков К. С.¹, Левченко А. С.², Мильченко Д. Н.³, Гатченко М. А.⁴

THE FEATURES OF MEASUREMENT S -PARAMETERS BY MICROWAVE-BAND REFLECTOMETERS

Korotkov K. S., Levchenko A. S., Milchenko D. N., Gatchenko M. A.

The article observes application peculiarities of the microwave reflectometer for complex reflection and transmission coefficients measurement of a two-port device. It was shown that the amplitude of the reflection coefficient from the connected load influences at the magnitude of the S -parameters incoming ports that influences result of the load measurement. It also considers the metering error decreasing and the measurement dynamic range increasing.

Keywords: S -parameters, two-port device, network analyzers, microwave reflectometer

В настоящее время широкое распространение получили методы исследования биологических объектов с помощью радиоизмерительных приборов СВЧ, которые применяют при изучении воздействия электромагнитного излучения на эти объекты, а также при разработке методов их защиты.

Наиболее часто для таких целей используют измерители комплексных коэффициентов передачи и отражения (модуля и фазы) четырехполосников СВЧ [1–3]. В роли четырехполосника выступает электрофизическая ячейка с исследуемым материалом. Взаимодействие электромагнитного излучения с объектом исследования определяется через измеряемые коэффициенты передачи и отражения испытываемого четырехполосника.

Такие измерители называются измерителями S -параметров и строятся на основе пары рефлектометров, каждый из которых состоит из двух встречно включенных направленных ответвителей (НО), структурная схема измерителя приведена на рис. 1 [4].

С помощью переключателя 2 можно изменять направление подачи испытательного сигнала от генератора зондирующих сигналов СВЧ на входы испытываемого четырехпо-

лосника. При этом через один из свободных неподвижных контактов переключателя тракт СВЧ нагружают на согласованную нагрузку 3.

Для измерения коэффициентов передачи испытываемого четырехполосника используют сигналы со вторичных каналов НО-1 и НО-4, попадающие на входы векторного вольтметра в случае движения зондирующего сигнала по часовой стрелке, или используют сигналы со вторичных каналов НО-2 и НО-3 в случае движения зондирующего сигнала в обратном направлении.

При измерении коэффициентов отражения входов $in1$ или $in2$ испытываемого четырехполосника аналогичным образом используют попарно сигналы со вторичных каналов НО-1, НО-4 или НО-2, НО-3, которые попадают на входы векторного вольтметра.

Однако, в связи с новыми областями применения таких приборов и особенно с ростом требований к их точности, возник ряд метрологических проблем частного и общего характера, которые рассмотрены в данной работе. В частности, на величину точности влияют связи, имеющиеся внутри рефлектомет-

¹Коротков Константин Станиславович, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: korsar@phys.kubsu.ru

²Левченко Антон Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: poorly@mail.ru

³Мильченко Дмитрий Николаевич, соискатель Кубанского государственного университета, генеральный директор ОАО «Компания Ритм»; e-mail: ritm@mail.kuban.ru

⁴Гатченко Максим Анатольевич, студент Кубанского государственного университета, инженер ОАО «Компания Ритм»; e-mail: fmg-magnus@mail.ru

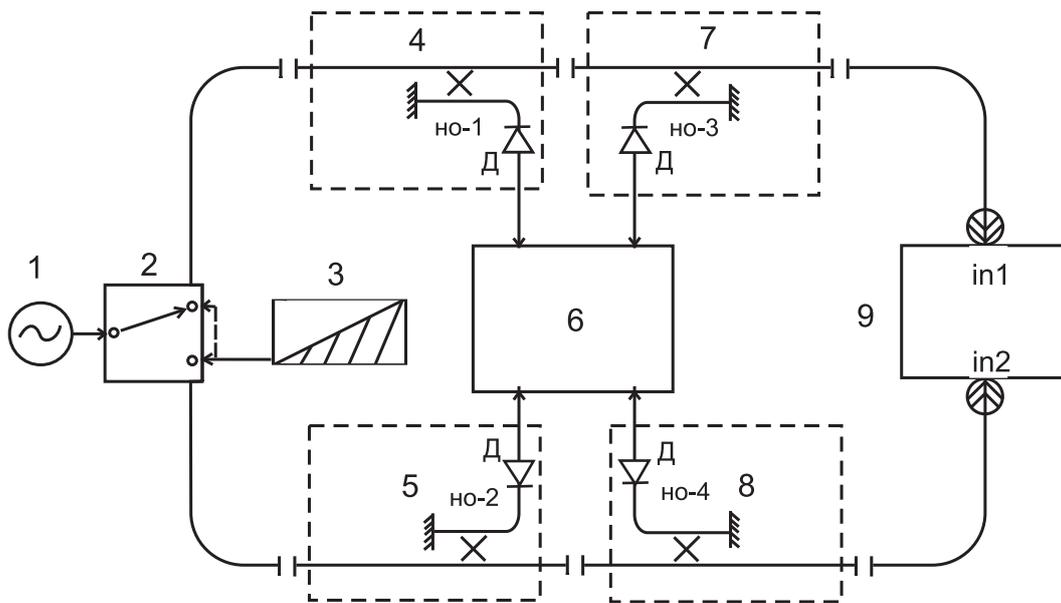


Рис. 1. Структурная схема измерителя характеристик четырехполосников: 1 — генератор зондирующих сигналов СВЧ; 2 — переключатель; 3 — согласованная нагрузка; 4, 5, 7, 8 — направленные ответвители (рефлектометры); Д — детекторные диоды, находящиеся во вторичном канале НО; 6 — векторный вольтметр, 9 — испытуемый четырехполосник СВЧ; $in1$, $in2$ — его входные порты (разъемы)

ра, которые не полностью учитываются в существующих методах измерений.

1. Анализ влияния рефлектометров

Процесс измерения коэффициентов передачи испытуемых четырехполосников с помощью измерителя характеристик четырехполосников СВЧ можно представить как определение общего коэффициента передачи S_{21}^{ob} трех последовательно включенных четырехполосников в системе S -параметров, два из которых эквивалентны входным портам $in1$ и $in2$ на рис. 1, а третий есть испытуемый четырехполосник СВЧ.

При этом входной порт $in1$ характеризуется собственной матрицей рассеяния: $(S^{in1}) = \begin{pmatrix} S_{11}^{in1} & S_{12}^{in1} \\ S_{21}^{in1} & S_{22}^{in1} \end{pmatrix}$, входной порт $in2$ характеризуется собственной матрицей рассеяния $(S^{in2}) = \begin{pmatrix} S_{11}^{in2} & S_{12}^{in2} \\ S_{21}^{in2} & S_{22}^{in2} \end{pmatrix}$, а испытуемый четырёхполосник характеризуется собственной матрицей рассеяния $(S^x) = \begin{pmatrix} S_{11}^x & S_{12}^x \\ S_{21}^x & S_{22}^x \end{pmatrix}$.

В соответствии с теорией клеточных матриц [5] коэффициент передачи общей матри-

цы рассеяния:

$$S_{21}^{ob} = S_{21}^{in1} S_{21}^x S_{21}^{in2} (1 - S_{22}^{in1} S_{11}^x - S_{22}^x S_{11}^{in2} - S_{22}^{in1} S_{21}^x S_{11}^{in2} S_{12}^x + S_{22}^{in1} S_{11}^x S_{22}^{in2} S_{11}^{in2})^{-1}.$$

Из формулы видно, что собственные S -параметры обоих входных портов измерителя характеристик четырехполосников СВЧ оказывают существенное влияние на результаты измерений и должны учитываться при определении коэффициента передачи испытуемого четырехполосника.

Входные порты измерителя четырехполосника СВЧ — это входные разъемы рефлектометра. Поэтому проанализируем влияние параметров рефлектометра на результаты измерений.

В ряде литературных источников [5, 6] для отыскания общего коэффициента передачи каскадно-соединенных четырехполосников в диапазоне СВЧ рекомендуется применять систему T -параметров, связывающую сигналы на выходе и входе объекта, тем самым характеризуя его так называемой матрицей передачи. Однако матрицы передачи по определению [7] не содержат в явном виде зависимости коэффициентов отражения отдельных четырёхполосников, что, в свою очередь, при вычислениях требует

многократного перевода S -параметров в T и обратно. Рефлектометр представляет собой сложную конструкцию, и применение системы T -параметров для учета его влияния на результаты измерения является бесперспективным.

Исходя из вышесказанного, будем анализировать влияние параметров рефлектометра на результаты измерений с помощью направленных графов в системе S -параметров. Анализ начнем с режима измерения коэффициентов отражения испытуемых устройств СВЧ, так как в этом случае в измерениях участвует один из двух входных портов, и следовательно, их анализ можно проводить раздельно.

Ориентированный граф рефлектометра, состоящего из включенных для измерения коэффициентов отражения встречно направленных ответвителей НО-1 и НО-3, представлен на рис. 2. Зондирующий сигнал СВЧ, падающий на испытуемый объект, детектируется детектором D_1 со вторичного канала НО-1, а отраженный детектором D_2 — со вторичного канала НО-3.

В этом режиме коэффициент отражения Γ_x испытуемого устройства (двух или четырехполосника СВЧ) определяется отношением амплитуд сигналов U_1 с детектора D_1 и U_2 с детектора D_2 , которые, в свою очередь, характеризуются путями графов для детектора D_1

$$a_1 - b_4 = S_{41} + S_{21}\Gamma_2 S_{42} + S_{31}S'_{11}S_{43} + S_{31}S'_{11}S_{23}\Gamma_2 S_{42},$$

для детектора D_2

$$a_1 - b'_2 = S_{31}S'_{21} + S_{31}S'_{31}\Gamma_x S'_{23} + S_{31}S'_{41}\Gamma_3 S'_{32} + S_{31}S'_{41}\Gamma_3 S'_{34}\Gamma_x S'_{23}.$$

На основании этих путей по формуле Мэзона может быть получено выражение (1.1)

$$\begin{aligned} \Gamma_{изм} &= \frac{U_2}{U_1} = \\ &= \left(S_{31}S'_{21} + S_{31}S'_{31}\Gamma_x S'_{23} + S_{31}S'_{41}\Gamma_3 S'_{32} + \right. \\ &\quad \left. + S_{31}S'_{41}\Gamma_3 S'_{34}\Gamma_x S'_{23} \right) \times \\ &\quad \times \left(1 - S_{33}S'_{11} + S'_{44}\Gamma_3 + S'_{22}\Gamma_4 + S'_{33}\Gamma_x + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left. + S'_{31}\Gamma_x S'_{13}S_{33} + S_{33}S'_{41}\Gamma_3 S'_{24}\Gamma_4 S'_{12} \right)^{-1} \times \\ &\quad \times \left(S_{41} + S_{21}\Gamma_2 S_{42} + S_{31}S'_{11}S_{43} + \right. \\ &\quad \left. + S_{31}S'_{11}S_{23}\Gamma_2 S_{42} \right)^{-1} \times \\ &\quad \times \left(1 - \Gamma_\Gamma S_{11} + S_{33}S'_{11} + S_{22}\Gamma_2 + S_{44}\Gamma_1 + \right. \\ &\quad \left. + S_{41}\Gamma_1 S_{24}\Gamma_2 S_{14} + S_{21}\Gamma_2 S_{14} \right), \quad (1.1) \end{aligned}$$

определяющее величину измеренного коэффициента отражения $\Gamma_{изм}$ испытуемой нагрузки через элементы матриц рассеяния НО-1 и НО-3. Из этого выражения следует, что основную величину погрешности при измерениях коэффициентов отражения вносит направленность НО-3, из-за которой, даже при отсутствии отраженного от испытуемой нагрузки сигнала, на детекторе D_2 может присутствовать сигнал с ненулевым напряжением U_2 . При этом величина направленности, определяемая путем $S'_{41}\Gamma_3 S'_{24}$, зависит от величины коэффициента отражения согласованной нагрузки Γ_3 вторичного канала НО-3. Аналогично вышесказанному и величина напряжения U_1 с детектора D_1 зависит от коэффициента отражения согласованной нагрузки Γ_2 .

Для измерения коэффициента отражения $\Gamma_x = 0,01$ необходимо иметь направленность не менее минус 40 дБ, но для обеспечения погрешности не более 10 %, эта направленность должна быть не хуже минус 60 дБ, чего достичь крайне сложно. Направленность в основном определяет и нижний предел измеряемых амплитуд, и, как следствие, — динамический диапазон их измерений. В свою очередь, это обстоятельство требует разработки методов улучшения направленности, что как раз и возможно с учётом всех путей направленного графа, характеризующего рефлектометр.

Ориентированный граф рефлектометра на рис. 2 позволяет найти выражения для расчета элементов матрицы рассеяния собственных S^{in} -параметров входных портов измерителя характеристик четырехполосников СВЧ.

Выражение для коэффициента передачи входного порта S_{21}^{in} представимо в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_{21}^{in} &= S_{31}S'_{31}(1 - S_{33}S'_{11} + 2S'_{33}\Gamma_x + \\ &\quad + S_{44}\Gamma_1 + S_{22}\Gamma_2 + 2S'_{44}\Gamma_3 + \\ &\quad + 2S'_{22}\Gamma_4 + S_{42}\Gamma_1 S_{24}\Gamma_2 + S_{32}S'_{11}S_{23}\Gamma_2 + \\ &\quad + S'_{42}\Gamma_3 S'_{24}\Gamma_4 + S_{33}S'_{31}\Gamma_x S'_{13})^{-1}, \quad (1.2) \end{aligned}$$

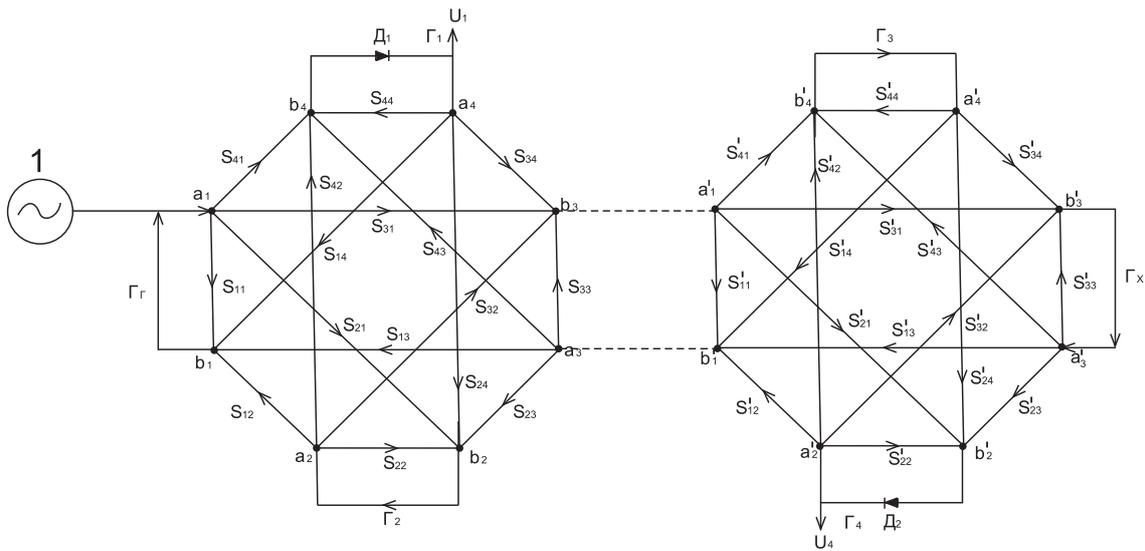


Рис. 2. ориентированный граф рефлектометра в режиме измерения коэффициентов отражения: 1 – генератор зондирующих сигналов СВЧ; $\mathcal{D}_1, \mathcal{D}_2$ – детекторные диоды; Γ_2, Γ_3 – коэффициенты отражения согласованных нагрузок вторичных каналов НО-1 и НО-3; Γ_1, Γ_4 – коэффициенты отражения детекторов $\mathcal{D}_1, \mathcal{D}_2$ соответственно; Γ_x – коэффициент отражения испытуемой нагрузки; Γ_Γ – коэффициент отражения СВЧ тракта, соединяющего вход рефлектометра с генератором зондирующего сигнала.

для коэффициента отражения на входе S_{11}^{in} входного порта:

$$\begin{aligned}
 S_{11}^{in} = & S_{11} + [2S_{31}S'_{11}S_{13} + \\
 & + S_{41}S_{14}(1 - S_{22}\Gamma_2)\Gamma_1 + \\
 & + S_{21}S_{12}(1 - S_{44}\Gamma_1)\Gamma_2 + \\
 & + S'_{41}S'_{14}(1 - S'_{22}\Gamma_4)\Gamma_3 + \\
 & + S'_{21}S'_{12}\Gamma_4(1 - \Gamma_3S'_{44})] \times \\
 & \times [(1 - S_{44}\Gamma_1)(1 - S_{22}\Gamma_2) \times \\
 & \times (S_{42}S_{24}\Gamma_1\Gamma_2)(1 - S'_{44}\Gamma_3) \times \\
 & \times (1 - S'_{22}\Gamma_4)(S'_{42}S'_{24}\Gamma_3\Gamma_4)]^{-1}, \quad (1.3)
 \end{aligned}$$

для коэффициента отражения выхода входного порта:

$$\begin{aligned}
 S_{22}^{in} = & S'_{33} + [S_{33}S'_{31}S'_{13} + \\
 & + (1 - S_{22}\Gamma_2)(S_{43}S_{34} + S_{32}S_{23})\Gamma_1 + \\
 & + (1 - S'_{22}\Gamma_4)(S'_{34} + S'_{32}S'_{23})\Gamma_3 + \\
 & + S'_{43}S'_{34}(1 - \Gamma_3S'_{44})\Gamma_4] \times \\
 & \times [(1 - S_{44}\Gamma_1)(1 - S_{22}\Gamma_2) \times \\
 & \times (S_{42}S_{24}\Gamma_1\Gamma_2)(1 - S'_{44}\Gamma_3) \times \\
 & \times (1 - S'_{22}\Gamma_4)(S'_{42}S'_{24}\Gamma_3\Gamma_4)]^{-1}. \quad (1.4)
 \end{aligned}$$

Из (1.3) видно, что существенное влияние на входной коэффициент отражения S_{11}^{in} ока-

зывают коэффициенты отражения Γ_2, Γ_3 согласованных нагрузок и коэффициенты отражения Γ_1, Γ_4 детекторов, степень влияния которых напрямую зависит от величины их переходных ослаблений НО.

Кроме того, из (1.3) и (1.4) следует вывод, что величина коэффициента отражения испытуемой нагрузки Γ_x влияет на величину собственных S^{in} -параметров входных портов и, как следствие, на сам результат измерения параметров этой нагрузки. Полученные выражения позволяют оценивать и рассчитывать степень влияния электрических параметров направленных ответвителей на погрешности измерений.

На основе графа рефлектометра (рис. 2) можно построить ориентированный граф входного порта, составленный из его собственных S^{in} -параметров (рис. 3).

В ряде работ [5, 8] S_{11}^{in} трактуется как направленность входного порта. Действительно:

$$\frac{U_{пад}}{U_{отр}} = S_{11}^{in} \quad \text{при} \quad \Gamma_x = 0. \quad (1.5)$$

Однако по классическому определению [7] направленность в НО есть отношение напряжений отраженной и падающей волны на выходе его вторичного канала, прошедшего через переходное ослабление этого НО. Как видно из графа на рис. 2, направлен-

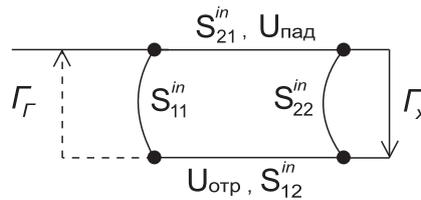


Рис. 3. направленный граф входного порта: S_{11}^{in} — коэффициент отражения на входе входного порта; S_{22}^{in} — коэффициент отражения выхода входного порта; S_{12}^{in}, S_{21}^{in} — коэффициенты передачи в прямом и обратном направлении входного порта соответственно; Γ_x — коэффициент отражения испытываемой нагрузки; Γ_G — коэффициент отражения тракта, связывающего генератор зондирующих сигналов СВЧ и вход рефлектометра.

ность определяется его путями $S_{21}G_2S_{42}$ для НО-1 и $S'_{41}G_3S'_{24}$ для НО-3, кроме того $\Gamma_x = 0$ на практике недостижимо. Поэтому считать S_{11}^{in} направленностью некорректно.

Заключение

В результате проведенного анализа рассмотрены особенности применения рефлектометров при измерениях комплексных коэффициентов передачи и отражения четырехполюсников в диапазоне СВЧ. Показано, что величина коэффициента отражения испытываемой нагрузки влияет на величину собственных S -параметров входных портов и, как следствие, на сам результат измерения параметров этой нагрузки. Представленные выражения для теоретических расчетов собственных S -параметров матриц рассеяния входных портов рефлектометров учитывают все пути, влияющие на погрешность измерений, проводимых при помощи измерителей S -параметров, в схему которых входят рефлектометры. Это даёт возможность снизить погрешности измерений за счёт учёта всех этих путей и расширить динамический диапазон измеряемых величин путём учёта погрешностей, вносимых направленностью рефлектометров.

Литература

1. Бецкий О. В., Лебедев Н. Н. Современные представления о механизмах воздействия низ-

2. Ушаков В. Л., Алипов Е. Д., Щеглов В. С., Беляев И. Я. Особенности спектра действия микроволн частотного диапазона 51–52 ГГц на клетки // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. № 6. С. 1–10.
3. Лыньков Л. М., Богущ В. А., Борботько Т. В., Украинец Е. А., Колбун Н. В. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения // Доклады БГУИР № 3. 2004. Минск. С. 152–167.
4. Reflectometer. Measurements – Revisited. Application Note 2000; Rev. B. anritsu US URL: http://www.eu.anritsu.com/files/reflectometer_an.pdf.
5. Силаев М. А., Брянцев Е. Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. М.: Советское радио, 1970. 248 с.
6. Абубакиров Б. А., Гудков К. Г., Нечаев Э. В. Измерение параметров радиотехнических цепей. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
7. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Советское радио, 1967. 651 с.
8. Астафьев Ш. Г., Шевченко И. Н., Мильченко Д. Н., Коньшев А. В. Системы и средства метрологического обеспечения эталонных и рабочих средств измерения параметров СВЧ трактов // Сборник статей по материалам VII всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в РФ». Поведники, Моск. обл., 2008. С. 117–121.

Ключевые слова: S -параметры, четырехполюсник, радиоизмерительные приборы, СВЧ рефлектометр

Статья поступила 26 августа 2010 г.

Кубанский государственный университет

ОАО «Компания Ритм»

© Коротков К. С., Левченко А. С., Мильченко Д. Н., Гатченко М. А., 2010