

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

ИЗМЕРИТЕЛЬ S-ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Предложена структурная схема измерителя S-параметров волноводного четырехполосника, реализующего модуляционный метод измерения. Проводится анализ его работы в режиме калибровки и измерения. Описан алгоритм обработки измерительной информации, позволяющий снизить погрешность измерения, обусловленную неточностью установки фазовых сдвигов управляемого фазовращателя.

Ключевые слова: модуль коэффициента отражения, направленный ответвитель, двойной волноводный тройник, измеритель S-параметров СВЧ устройств, модуляционный метод, фазовращатель.

Измерение параметров волноводных элементов часто реализуется с помощью устройств на основе направленных ответвителей и двойных волноводных тройников. Существенным недостатком этих устройств является зависимость точности измерения от величины направленности применяемых ответвителей или от величины развязки между плечами тройников. При малых значениях модуля коэффициента отражения от входов исследуемого четырехполосника измерительный сигнал становится соизмеримым с паразитным и погрешность измерения может достигать более 100%. Повысить направленность серийно выпускаемых ответвителей или развязку между плечами тройников в миллиметрового диапазона за счет повышения качества их изготовления не удастся, так как возможности современного технологического оборудования практически исчерпаны. В связи с этим повышение точности измерения структурными методами является задачей актуальной.

Целью работы является исследование возможностей повышения точности измерений S-параметров СВЧ устройств модуляционным методом.

Известен измеритель, реализующий интерференционный метод с модуляцией поднесущей. Он широко используется в автоматических измерителях S-параметров СВЧ устройств [1]. При этом амплитудный модулятор обычно размещают в измерительном канале (рисунок 1).

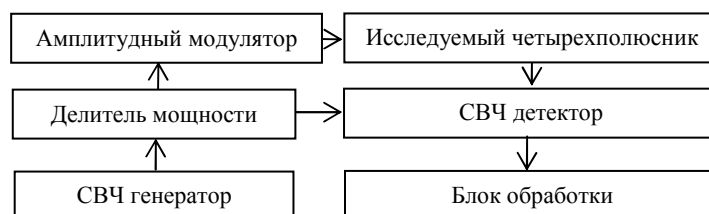


Рисунок 1 — Структурная схема измерителя с модулированной поднесущей

В случае обеспечения синусоидальной модуляцией СВЧ сигнала на входе СВЧ детектора будет происходить интерференция сигналов вида

$$e_1 = E_1 \cos \omega t, \quad e_2 = E_2 (1 + M \cos \Omega t) \cos(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

где E_1 и E_2 — амплитуды волн в опорном и измерительном каналах; Ω и M — частота модулирующего сигнала и глубина модуляции соответственно.

Полагая квадратичной характеристику диода СВЧ детектора и наличие в блоке индикации селективного усилителя на частоту Ω , нетрудно показать, что для выходного сигнала справедливо соотношение

$$U_{\text{вых}} = 2K_d kM (U_2^2 - U_1 U_2 \cos \alpha) \cos \Omega t, \quad (2)$$

где K_d — коэффициент передачи детектора; k — коэффициент усиления селективного усилителя; U_1 , U_2 — амплитуды сигналов на входе СВЧ детектора.

При $E_2 \ll E_1$ нелинейным членом U_2^2 в формуле (2) можно пренебречь, тогда между $U_{\text{вых}}$ и U_2 будет линейная зависимость, что обеспечивает (по аналогии с супергетеродинным приемом) высокую чувствительность и возможность точного измерения фазовых сдвигов при больших ослаблениях

чотирьохполосника. Однак для забезпечення $E_2 \ll E_1$ в схемі цього вимірювача необхідно вводити значительне ослаблення в вимірювальний канал, що знижує чутливість і скорочує динамічний діапазон.

Устранити описаний недолік вдасться введенням в опорний канал другого амплітудного модулятора [2]. В цьому пристрої сигнал вимірювального каналу подають на досліджувану чотирьохполосник, а після цього вже модулюють. В результаті складові вимірювального сигналу, вносячи внесок в похибку вимірювання через кінцеву направленість відбитого відбитого сигналу, виявляються промодульовані частотою $\Omega_1 + \Omega_2$ або $\Omega_1 - \Omega_2$ і потрапляють в смугу пропускання фільтра, налаштованого на частоту $\Omega_1 + \Omega_2$ або $\Omega_1 - \Omega_2$. Крім того, в цьому пристрої сигнал частотою $\Omega_1 + \Omega_2$ або $\Omega_1 - \Omega_2$ нормується на сигнал з частотою $2\Omega_1$. В результаті вимірювальний сигнал виявляється залежним від коефіцієнта модуляції M_2 амплітудного модулятора вимірювального каналу, який змінюється в діапазоні частот через зміну рівня модульованого СВЧ сигналу.

Устранити вказаний недолік дозволяє вимірювач S-параметрів, структурна схема якого показана на рисунку 2.

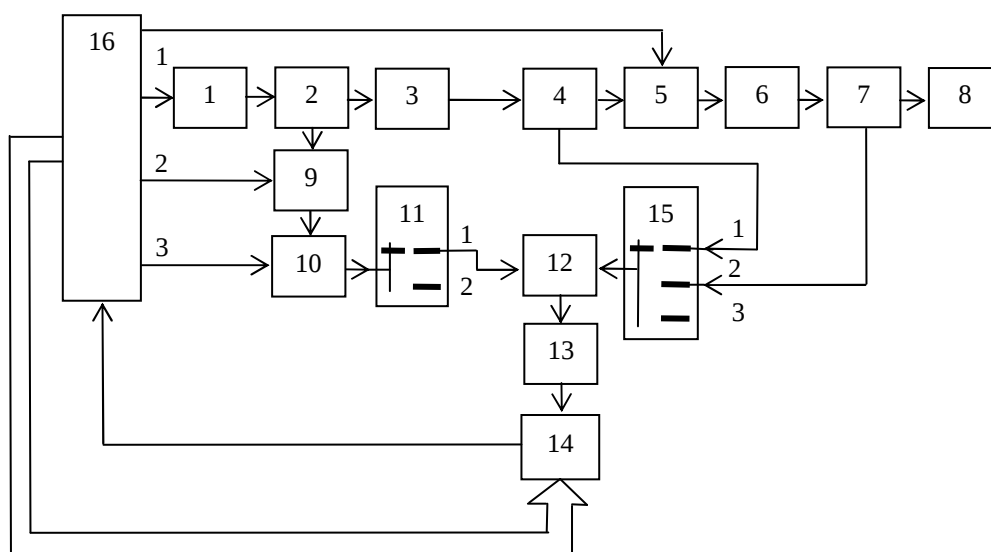


Рисунок 2 — Структурна схема вимірювача

Вимірювач працює наступним чином. Генератор 1 виробляє СВЧ-сигнал, який відбитим 2 ділиться на дві частини. Перша частина сигналу (вимірювальний сигнал) через основний канал відбитого 2 поступає через феритовий клапан 3 на відбитий 4 відбитого сигналу і далі на амплітудний модулятор 5. Модулятор 5 під впливом сигналу з вихода 1 блоку 16 управління і індикації модулює цей сигнал низькочастотним напругою частотою Ω_2 . Промодульований сигнал подається на досліджувану чотирьохполосник 6. Частина його з амплітудою E_2 відбивається від входу чотирьохполосника 6, проходить через модулятор 5 в зворотному напрямку, проходить через основний канал відбитого 4, де переізолюється в другий його канал і потрапляє на перший вхід комутатора 15. Друга частина промодульованого частотою Ω_2 сигналу проходить через чотирьохполосник 6 на відбитий 7, переізолюється через первинний його канал в другий і далі поступає на другий вхід комутатора 15. Немодульована частина сигналу падаючої хвилі з амплітудою E_3 через кінцеву направленість відбитого 4 просачивається в другий канал відбитого 4 відбитого сигналу і також потрапляє на другий вхід суматора 12. Частина сигналу від СВЧ генератора 1 переізолюється через первинний канал відбитого 2 в його другий канал і далі поступає на амплітудний модулятор 9, який під впливом сигналу з вихода 2 блоку 16 управління модулює цей сигнал з частотою Ω_1 . Промодульований сигнал подається на фазовращатель 10, який під впливом сигналу з вихода 3 блоку 16 управління встановлюється в перше своє положення. В цьому положенні фазовий зсув β_1 фазовращателя 10 вибирається в діапазоні

$$0 \leq \beta_1 < \pi/4. \quad (3)$$

Сигнал з вихода фазовращателя 10 подається на вхід комутатора 11. С першого вихода комутатора 11 сигнал з амплітудою E_1 поступає на перший вхід суматора 12, який виходом підключений до входу квадратичного детектора 13.

Режиму измерения предшествует режим калибровки.

На первом этапе калибровки при согласованной нагрузке на выходе основного канала ответвителя 4 отраженной волны коммутатор 11 устанавливается в первое положение, коммутатор 15 в третье, а фазовращатель 10 в свое первое положение. При этом часть сигнала от СВЧ генератора 1 попадает во вторичный канал ответвителя 2 и далее поступает на амплитудный модулятор 9. Промодулированный частотой Ω_1 сигнал с выхода модулятора 9 поступает на фазовращатель 10. С выхода фазовращателя 10 сигнал поступает на первый вход сумматора 12 через установленный в первое положение коммутатор 11. На второй вход сумматора 12 сигнал не поступает, и напряжение на выходе амплитудного детектора 13 имеет вид

$$U_{\text{ОП1}} = K_{\text{Д}}^2 E_0^2 C_1 K_{\text{Ф1}}^2 K_{\Sigma 1}^2 (1 + M_1 \cos \Omega_1 t)^2, \quad (4)$$

где $K_{\text{Д}}$ — коэффициент преобразования детектора 13; E_0 — амплитуда волны на выходе СВЧ генератора 1; C_1 — переходное затухание ответвителя 2; M_1 — коэффициент модуляции модулятора 9; $K_{\text{Ф1}}$ — модуль коэффициента передачи фазовращателя 10; $K_{\Sigma 1}$ — модуль коэффициента передачи сумматора 12 по первому входу.

Блок 14 синхронных детекторов выделяет из спектра продетектированного сигнала составляющую вида

$$U_{\text{ОП1}}^* = 2K_{\text{Д}}^2 E_0^2 C_1 M_1 K_{\text{Ф1}}^2 K_{\Sigma 1}^2 K_{\Omega 1}^2, \quad (5)$$

где $K_{\Omega 1}$ — модуль коэффициента передачи блока 14 синхронных детекторов по частоте Ω_1 .

Напряжение (2) поступает на блок 16 управления и индикации, где измеряется и запоминается для использования в режиме измерения.

Фазовращатель 10 под действием сигнала с выхода 3 блока 16 управления устанавливается во второе свое состояние. При этом фазовый сдвиг β_2 фазовращателя 10 выбирается в диапазоне

$$\pi/4 \leq \beta_2 < \pi/2. \quad (6)$$

Напряжение $U_{\text{ОП1}}^{**}$ измерителя во втором положении фазовращателя 10 образуется аналогично напряжению $U_{\text{ОП1}}^*$.

$$U_{\text{ОП1}}^{**} = 2K_{\text{Д}}^2 E_0^2 C_1 M_1 K_{\text{Ф2}}^2 K_{\Sigma 1}^2 K_{\Omega 1}^2, \quad (7)$$

где $K_{\text{Ф2}}$ — модуль коэффициента передачи фазовращателя 10 во втором его состоянии.

Напряжение (3) поступает на блок 16 управления и индикации, где измеряется и запоминается для использования в режиме измерения.

На втором этапе калибровки при согласованной нагрузке на выходе основного канала ответвителя 4 отраженной волны коммутатор 11 устанавливается во второе положение, а коммутатор 15 — в первое положение. При этом часть сигнала СВЧ генератора 1 за счет конечной направленности ответвителя 4 просачивается в его вторичный канал и далее поступает через коммутатор 15 на второй вход сумматора 12. В результате на выходе детектора 13 появляется постоянное напряжение $U_{\text{КН}}$

$$U_{\text{КН}} = K_{\text{Д}}^2 E_0^2 (1 - C_1) K_{\text{ВЕНТ}}^2 dK_{\Sigma 2}^2, \quad (8)$$

где $K_{\text{ВЕНТ}}$ — модуль коэффициента передачи ферритового вентиля; $K_{\Sigma 2}$ — модуль коэффициента передачи сумматора 12 по второму входу.

На третьем этапе калибровки коммутаторы 11 и 15 остаются во втором и первом положениях соответственно. Вместо четырехполюсника 6 к выходу амплитудного модулятора 5 подключается подвижный короткозамыкатель. При этом отраженный от него сигнал проходит через модулятор 5 на ответвитель 4, где переизлучается в свой вторичный канал и далее через коммутатор 15 поступает на второй вход сумматора 12. Подвижный короткозамыкатель устанавливается в положение при котором сигнал на выходе детектора 13 достигает максимального значения $U_{\text{КЗ}}$.

$$U_{\text{КЗ1}} = K_{\text{Д}}^2 E_0^2 (1 - C_1) K_{\text{ВЕНТ}}^2 (1 - C_2) \Gamma_{\text{КЗ}}^2 C_2 K_{\Sigma 2}^2 (1 + M_2 \cos \Omega_2 t)^2 + 2\sqrt{U_{\text{СН}}} K_{\text{Д}} E_0 (1 - C_1) K_{\text{ВЕНТ}} (1 - C_2) \Gamma_{\text{КЗ}} \sqrt{C_2} K_{\Sigma 2} (1 + M_2 \cos \Omega_2 t), \quad (9)$$

где C_2 — переходное затухание ответвителя 4; M_2 — коэффициент амплитудной модуляции модулятора 5; $\Gamma_{\text{КЗ}}$ — модуль коэффициента отражения короткозамыкателя.

Напряжение на выходе блока 14 синхронных детекторов имеет вид

$$U_{K31}^* = K_D^2 E_0^2 (1 - C_1) K_{\text{ВЕНТ}}^2 (1 - C_2) \Gamma_{K3}^2 M_2^2 C_2 K_{\Sigma 2}^2 K_{\Omega 2} + 2\sqrt{U_{\text{CH}}} K_D E_0 (1 - C_1) K_{\text{ВЕНТ}} (1 - C_2) \Gamma_{K3} M_2 \sqrt{C_2} K_{\Sigma 2} K_{\Omega 2}, \quad (10)$$

где $K_{\Omega 2}$ — модуль коэффициента передачи блока 14 синхронных детекторов на частоте Ω_2

Анализ выражения (10) показывает, что первое его слагаемое представляет собой составляющую напряжения, характеризующую модуль коэффициента передачи измерительного канала от СВЧ генератора до СВЧ детектора при идеальной направленности ответвителя 4. В реальном случае непосредственно измерить эту составляющую не представляется возможным из-за просачивания сигнала СВЧ генератора 1 через основной канал ответвителя 4 на вход сумматора 12.

Введем обозначение для указанной составляющей напряжения

$$U_{K30} = K_D^2 E_0^2 (1 - C_1) K_{\text{ВЕНТ}}^2 (1 - C_2) \Gamma_{K3}^2 M_2^2 C_2 K_{\Sigma 2}^2 (1 + M_2 \cos \Omega_2 t)^2. \quad (11)$$

Тогда выражение (9) можно представить в виде

$$U_{K31}^* = U_{K30} + 2\sqrt{U_{K30} U_{\text{CH}}}. \quad (12)$$

Решая уравнение (12) относительно U_{K30} находим

$$U_{K30} = \sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}}. \quad (13)$$

Таким образом, измерив напряжения U_{K31}^* и U_{CH} , можно вычислить U_{K30} , которое необходимо для дальнейших измерений и поэтому запоминается в блоке 16.

На четвертом этапе калибровки коммутатор 11 переводится в первое положение, а коммутатор 15 остается в первом положении. Вместо четырехполосника 6 к выходу амплитудного модулятора 5 подключен подвижный короткозамыкатель, отражающая плоскость которого совмещается с отражающей плоскостью исследуемого четырехполосника. При этом напряжение на выходе блока 14 синхронных детекторов при двух положениях фазовращателя имеет вид:

$$U_{K32} = 2\sqrt{U_{\text{ОП1}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right) \cos(\pi - \beta_1); \quad (14)$$

$$U_{K33} = 2\sqrt{U_{\text{ОП2}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right) \cos(\pi - \beta_2), \quad (15)$$

где β_1 и β_2 — дифференциальные фазовые сдвиги между сигналами опорного и измерительного каналов после установки фазовращателя 10 в первое и второе состояния.

Значения β_1 и β_2 вычисляются из выражений (14) и (15) по формулам:

$$\beta_1 = \arccos \left[\frac{-U_{K32}}{2\sqrt{U_{\text{ОП1}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right)} \right]; \quad (16)$$

$$\beta_2 = \arccos \left[\frac{-U_{K33}}{2\sqrt{U_{\text{ОП2}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right)} \right], \quad (17)$$

и запоминаются.

В режиме измерения отключается короткозамыкатель, подключается исследуемый четырехполосник 6, коммутаторы 11 и 15 устанавливаются в первое положение. При этом напряжение на выходе блока 14 синхронных детекторов при двух положениях фазовращателя 10 имеет вид

$$U_{X1} = 2\sqrt{U_{\text{ОП1}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right) \Gamma_X \cos(\varphi_X - \beta_1); \quad (18)$$

$$U_{X2} = 2\sqrt{U_{\text{ОП2}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right) \Gamma_X \cos(\varphi_X - \beta_2). \quad (19)$$

Искомый фазовый сдвиг коэффициента отражения от входа исследуемого четырехполосника 6 вычисляется по формуле

$$\varphi_X = \arctg \frac{\sqrt{U_{\text{оп2}} U_{X1}} \cos \beta_2 - \cos \beta_1}{\sin \beta_1 - \frac{\sqrt{U_{\text{оп2}} U_{X1}}}{\sqrt{U_{\text{оп1}} U_{X2}}} \sin \beta_2}. \quad (20)$$

Модуль коефіцієнта отраження от входа исследуемого четырехполосника 6 вычисляется либо по формуле

$$\Gamma_X = \frac{U_{X1}}{2\sqrt{U_{\text{оп1}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right) \cos(\varphi_X - \beta_1)}, \quad (21)$$

либо по формуле

$$\Gamma_X = \frac{U_{X2}}{2\sqrt{U_{\text{оп2}}} \left(\sqrt{U_{\text{CH}} + U_{K31}^*} - \sqrt{U_{\text{CH}}} \right) \cos(\varphi_X - \beta_2)}. \quad (22)$$

Модуль и фаза коэффициента передачи четырехполосника 6 определяются по аналогичной методике.

Анализ выражений (1)...(22) показывает, что предлагаемый измеритель позволяет минимизировать погрешности за счет конечной направленности ответвителя 4 отраженной волны, расширить частотный диапазон измерителя за счет измерения фазовых сдвигов фазовращателя в режиме калибровки. При этом обеспечивается возможность установки произвольных значений фазовых сдвигов с последующим контролем их значений и использовании этой информации в режиме измерений.

Снижение погрешностей измерения за счет конечной направленности ответвителей и неточности установки фазовых сдвигов управляемого фазовращателя позволяет снизить требования к точности изготовления этих дорогостоящих элементов СВЧ тракта, а значит снизить и затраты на их производство. В итоге снижается себестоимость измерительной аппаратуры СВЧ-диапазона и расширяется ее рабочий диапазон.

Задачами дальнейших исследований являются:

- разработка и экспериментальное исследование волноводного варианта управляемого фазовращателя миллиметрового диапазона;
- разработка и экспериментальное исследование устройства управления фазовращателем.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Елизаров А.С. Автоматизация измерений параметров линейных невзаимных СВЧ четырехполосников / А.С. Елизаров. — М.: Сов. радио, 1978. — 168 с.
2. А.С. СССР №1623437, кл. G01 R 27/04. Способ определения S-параметров четырехполосника А.Н. Трушкина / А.Н. Трушкин; заявитель СевНТУ. — № 4849074/09, кл. G01R27/04; заявл. 09.07.1990, опубл. 07.03.1993, Бюл. № 9.

Поступила в редакцию 3.10.2010 г.

Трушкин О.М. Вимірювач S-параметрів чотириполосника

Запропоновано структурну схему вимірювача S-параметрів хвильоводного чотириполосника, що реалізує модуляційний метод вимірювання. Проводиться аналіз його роботи в режимі калібрування та вимірювання. Описаний алгоритм обробки вимірювальної інформації, що дозволяє знизити похибку вимірювання, обумовлену неточністю установки фазових зсувів керованого фазообертача.

Ключові слова: модуль коефіцієнта віддзеркалення, спрямований відгалужувач, подвійний хвильоводний трійник, вимірник S-параметрів НВЧ пристроїв, модуляційний метод, фазообертач.

Trushkin A.N. Measuring the S-parameters of a quadripole

A schematic diagram of the S-parameters for the quadripole realizing the modulation method of measurement is suggested. The analysis of its operation in the mode of calibration and measurement is carried out. An algorithm of processing of the measurement data that allows for reduction of the measurement error caused by the inaccuracy of installation of the phase shifts of the controlled phase shifter is described.

Keywords: module of reflectivity, directed device, double waveguide branch box, measuring device of S-parameters of devices, modulation method, phase device.