УДК 621.372.812

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА ПОЛОСКОВОМ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Афонин И.Л., Лащенко И.В., Цыцура С.В.

Рассмотрена возможность построения поляризационного измерителя на основе полоскового металлодиэлектрического волновода (ПМДВ) [1].

Поляризационный измеритель представляет собой средство измерения КСВ, фазы коэффициента отражения или полного сопротивления, во вторичном круглом волноводе которого возбуждается волна с круговой поляризацией. Вторичный волновод устанавливается перпендикулярно оси основного полоскового металлодиэлектрического волновода, связь между ними осуществляется с помощью крестообразных щелей связи, прорезанных в металлической пластине ПМДВ. Электромагнитная волна, распространяющаяся от генератора в первичном волноводе, возбуждает в круглом волноводе две линейно поляризованные волны. Поскольку щели ориентированы вдоль осей OX и OZ, а компоненты магнитного поля волны H_x и H_z в ПМДВ сдвинуты по фазе на $\pi/2$ и амплитуды волн равны друг другу, в круглом волноводе суммарная волна будет иметь круговую поляризацию. Отраженная от исследуемого микроволнового устройства волна также возбуждает в круглом волноводе волну H_{11} круговой поляризации, но противоположного вращения. В результате сложения волн с круговой поляризацией, но разных направлений вращения в круглом волноводе устанавливается эллиптически поляризованная волна.

Вращающаяся детекторная головка, размещенная в круглом волноводе, позволяет определить максимальное и минимальное значения амплитуд поля, отношение которых равно коэффициенту стоячей волны в основном тракте. Фаза коэффициента отражения объекта измерения определяется по углу поворота малой оси эллипса (минимума поля) относительно начального положения, которое устанавливается при калибровке.

Известные поляризационные измерители полных сопротивлений Р3-32, Р3-48 охватывают диапазоны частот от 0,02 до 12 ГГц [2] и имеют погрешность измерения по КСВ ±7% – для коаксиального варианта и ±4% – для волноводного варианта, погрешность измерения фазы коэффициента отражения составляет соответственно 7º и 4º.

Погрешности этих измерителей определяются собственными КСВ ответвителя круговой поляризации, неравномерности связи зонда детектора с полем из-за несоосности оси вращения зонда и оси круглого волновода, неидеальностью возбуждения поля круговой поляризации, погрешностью расчетного значения меры фазового угла, используемой при калибровке,

разрешающей способностью отсчетного устройства по углу поворота, а также погрешностью установки частоты.

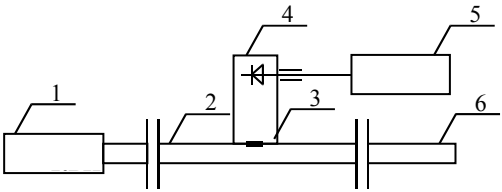

Рисунок 1 – Функциональная схема поляризационного измерителя:
1 - генератор КВЧ; 2 - ответвитель круговой поляризации; 3 - отрезок круглого волновода; 4 - детекторная головка; 5 - индикатор; 6 - исследуемое

Рассматриваемые поляризационные измерители предназначены для измерения параметров микроволновых устройств в коротковолновой части сантиметрового и миллиметровом диапазонах длин волн. Перечисленные составляющие результирующей погрешности являются общими для всех поляризационных измерителей за исключением погрешности, связанной с неидеальностью возбуждения поля круговой поляризации. Поэтому эту составляющую результирующей погрешности рассмотрим подробно.

Функциональная схема поляризационного измерителя и упрощенный ориентированный граф его микроволновой части изображены соответственно на рисунках 1 и 2.

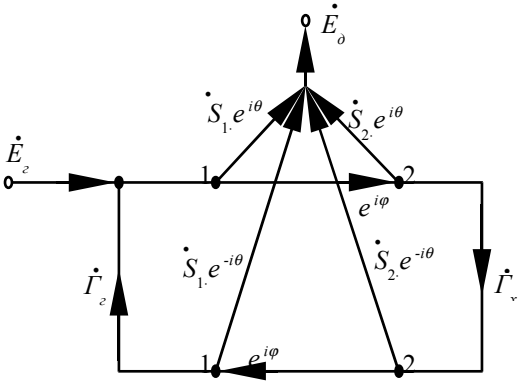

Рисунок 2 - Упрощенный граф поляризационного измерителя

Поворот детектора в круглом волноводе совпадает с направлением вращения вектора E одной из волн с круговой поляризацией и противоположен направлению вращения вектора E другой волны. Это обстоятельство можно учесть введением множителя $e^{i\theta}$ к коэффициенту передачи волноводного канала для падающей волны и множителя $e^{-i\theta}$ – для отраженной волны; θ – угол поворота детектора.

В соответствии с графом сигнал на детекторе $E_д$ равен

$$\dot{E}_д = \frac{\dot{E}_г \cdot \dot{S}_1 \cdot e^{i\theta} \cdot \left(1 + \frac{\dot{S}_2}{\dot{S}_1} \cdot e^{i\varphi} + \frac{\dot{S}_2}{\dot{S}_1} \cdot e^{i\varphi} \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{-i2\theta} + e^{i2\varphi} \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{-i2\theta}\right)}{1 - \dot{\Gamma}_г \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{i2\varphi}}, \qquad (1)$$

где $\dot{E}_г$ – сигнал генератора; $\dot{S}_1$ – коэффициент передачи щели 1 (поперечной щели креста); $\dot{S}_2$ – коэффициент передачи щели 2 (продольной щели креста); φ – фазовый сдвиг между сигналами, ответвляемыми щелями 1 и 2; $\dot{\Gamma}_г$ – коэффициент отражения генератора; $\dot{\Gamma}_x$ – коэффициент отражения исследуемого микроволнового устройства.

Обозначим амплитуду линейно поляризованной волны, возбужденную щелью 1, через $\dot{U}_1$, а щелью 2 – $\dot{U}_2$, т.е. $\dot{U}_1 = \dot{E}_г \cdot \dot{S}_1$, $\dot{U}_2 = \dot{E}_г \cdot \dot{S}_2$, тогда (1) можно переписать в других обозначениях:

$$\dot{E}_д = \frac{\dot{U}_1 \cdot e^{i\theta} \cdot \left(1 + \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \cdot e^{i\phi} + \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \cdot e^{i\phi} \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{-i2\theta} + e^{i2\phi} \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{-i2\theta}\right)}{1 - \dot{\Gamma}_г \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{i2\phi}}. \qquad (2)$$

После квадратичного детектирования сигнал U, снимаемый с детектора имеет вид

$$U = \frac{k \cdot U_1^2 \cdot \left|1 + \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \cdot e^{i\phi} + \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \cdot e^{i\phi} \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{-i2\theta} + e^{i2\phi} \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{-i2\theta}\right|^2}{\left|1 - \dot{\Gamma}_г \cdot \dot{\Gamma}_x \cdot e^{i2\phi}\right|^2} =$$

$$= k \cdot U_1^2 \cdot \frac{\left[1 + \frac{U_2^2}{U_1^2} + \frac{U_2^2}{U_1^2} \cdot \Gamma_x^2 + \Gamma_x^2 + 2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \cos\phi + 2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \Gamma_x \cdot \cos(\phi + \phi_x - 2 \cdot \theta)\right]}{1 - \Gamma_x^2 \cdot \Gamma_г^2 - 2 \cdot \Gamma_x \cdot \Gamma_г \cdot \cos(\phi_г + \phi_x + 2 \cdot \phi)} +$$

$$+ k \cdot U_1^2 \cdot \frac{\left[2 \cdot \Gamma_x \cdot \cos(2\phi + \phi_x - 2 \cdot \theta) + 2 \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} \cdot \Gamma_x \cdot \cos(\phi_x - 2 \cdot \theta)\right]}{1 - \Gamma_x^2 \cdot \Gamma_г^2 - 2 \cdot \Gamma_x \cdot \Gamma_г \cdot \cos(\phi_г + \phi_x + 2 \cdot \phi)} +$$

$$+ k \cdot U_1^2 \cdot \frac{\left[2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \Gamma_x \cdot \cos(\phi + \phi_x - 2 \cdot \theta) + 2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \Gamma_x^2 \cdot \cos\phi\right]}{1 - \Gamma_x^2 \cdot \Gamma_г^2 - 2 \cdot \Gamma_x \cdot \Gamma_г \cdot \cos(\phi_г + \phi_x + 2 \cdot \phi)}, \qquad (3)$$

где Γ_x, φ_x – модуль и фаза коэффициента отражения исследуемого устройства; $\Gamma_г$, $\varphi_г$ – модуль и фаза коэффициента отражения генератора; $к$ – коэффициент детектирования. (3)

После преобразования (3) можно представить в виде

$$U = k \cdot U_1^2 \cdot \frac{\left(1 + \Gamma_x^2\right) \cdot \left(1 + \frac{U_2^2}{U_1^2} + 2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \cos\phi\right)}{1 - \Gamma_x^2 \cdot \Gamma_г^2 - 2 \cdot \Gamma_x \cdot \Gamma_г \cdot \cos(\phi_г + \phi_x + 2 \cdot \phi)} +$$

$$+ k \cdot U_1^2 \cdot \frac{\cos(\phi_x - 2 \cdot \theta) \cdot \left(4 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \Gamma_x \cdot \cos\phi + 2 \cdot \Gamma_x \cdot \cos 2\phi + 2 \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} \cdot \Gamma_x\right)}{1 - \Gamma_x^2 \cdot \Gamma_г^2 - 2 \cdot \Gamma_x \cdot \Gamma_г \cdot \cos(\phi_г + \phi_x + 2 \cdot \phi)} -$$

$$- k \cdot U_1^2 \cdot \frac{\sin(\phi_x - 2 \cdot \theta) \cdot \left(4 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \Gamma_x \cdot \sin\phi + 2 \cdot \Gamma_x \cdot \sin 2\phi\right)}{1 - \Gamma_x^2 \cdot \Gamma_г^2 - 2 \cdot \Gamma_x \cdot \Gamma_г \cdot \cos(\phi_г + \phi_x + 2 \cdot \phi)}. \qquad (4)$$

В идеальном измерителе фазовый сдвиг φ между сигналами, ответвляемыми щелями связи, равен 90º; амплитуды волн U_1 и U_2 равны между собой. В этом случае в соответствии с (4) имеем

$$U = U_0 = \frac{2 \cdot k \cdot U_1^2 \cdot \left[1 + \Gamma_x^2 - 2 \cdot \Gamma_x \cdot \sin(\phi_x - 2 \cdot \theta)\right]}{1 + \Gamma_x^2 \cdot \Gamma_г^2 + 2 \cdot \Gamma_x \cdot \Gamma_г \cdot \cos(\phi_г + \phi_x)}. \qquad (5)$$

При повороте детектора максимальное значение сигнала $U_{0\max}$ наблюдается тогда, когда $\sin(\varphi_x - 2\theta) = -1$, а минимальное значение $U_{0\min}$ будет при $\sin(\varphi_x - 2\theta) = +1$.

Отношение этих сигналов равно:

$$\frac{U_{0\max}}{U_{0\min}} = \left(\frac{1 + \Gamma_x}{1 - \Gamma_x}\right)^2 = (КСВ)^2, \text{ откуда } КСВ = \sqrt{\frac{U_{0\max}}{U_{0\min}}}. \qquad (6)$$

Выражение (6) определяет искомое значение КСВ.

Фаза коэффициента отражения φ_x связана с углом поворота θ. Направление на минимум сигнала определяется выражением $\sin(\varphi_x - 2\theta) = 1$, откуда

$$\varphi_x - 2\theta = 90°; \ \varphi_x = 90° + 2\theta.$$

Угол 90º можно скомпенсировать начальной калибровкой фазы и тогда $\varphi_x = 2\theta$ или $\theta = \varphi_x/2$ – направление на минимум сигнала соответствует половине фазы коэффициента отражения исследуемой нагрузки.

В реальном измерителе, построенном на основе ответвителя круговой поляризации, амплитуды волн U_1 и U_2 несколько отличаются друг от друга. Их отношение в зависимости от частоты в 20%-ной рабочей полосе частот варьируется от 1,02 до 0,98. Фазовый сдвиг φ между волнами равен 90º, однако, из-за технологического допуска на ортогональность щелей может наблюдаться небольшое отклонение Δφ от 90º, поэтому $\varphi = 90° + \Delta\varphi$. В связи с вышеизложенным, отношение максимального $U_{\max}$ и минимального $U_{\min}$ сигналов, полученных при повороте детектора (изменении угла θ), определит измеренное значение $(КСВ)_{изм}$

$$(KCB)_{изм} = \sqrt{\frac{U_{\max}}{U_{\min}}}\,, \qquad (7)$$

где $U_{\max}$ и $U_{\min}$ определяются из выражения (4).

Как видно из этого выражения, на величину сигнала U при изменении угла θ влияют два слагаемых: $A_1 \cdot \sin(\varphi_x - 2\theta)$ и $A_2 \cdot \cos(\varphi_x - 2\theta)$, где

$$A_1 = -\left(4 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \Gamma_x \cdot \sin\phi + 2 \cdot \Gamma_x \cdot \sin 2\phi\right),$$

$$A_2 = 4 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \Gamma_x \cdot \cos\phi + 2 \cdot \Gamma_x \cdot \cos 2\phi + 2 \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} \cdot \Gamma_x\,.$$

Для определения $U_{\max}$ и $U_{\min}$ проведем замену

$$A_1 \cdot \sin(\varphi_x - 2\theta) + A_2 \cdot \cos(\varphi_x - 2\theta) = A \cdot \sin(\varphi_x - 2\theta + \alpha),$$

где $$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}\,,\ tg\alpha = \frac{A_2}{A_1}\,. \qquad (8)$$

С учетом этих представлений, отношение $U_{\max}/U_{\min}$ равно

$$\frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{\left(1 + \Gamma_x^2\right) \cdot \left(1 + \frac{U_2^2}{U_1^2} + 2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \cos\phi\right) + A}{\left(1 + \Gamma_x^2\right) \cdot \left(1 + \frac{U_2^2}{U_1^2} + 2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \cos\phi\right) - A}\,. \qquad (9)$$

Направление на минимум сигнала определяется соотношением $\varphi_x - 2\theta + \alpha = 90°$, откуда $\varphi_x = 90° + 2\theta - \alpha$, а после начальной калибровки

$$\varphi_x = 2\theta - \alpha. \qquad (10)$$

Подставляя в (8) значения A_1 и A_2, получаем

$$A = 2 \cdot \Gamma_x \cdot \sqrt{4 \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} + 1 + 4 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \cos\phi + \frac{U_2^4}{U_1^4} + 4 \cdot \frac{U_2^3}{U_1^3} \cdot \cos\phi + 2 \cdot \frac{U_2^2}{U_1^2} \cdot \cos 2\phi}\,; \qquad (11)$$

$$\alpha = arctg\left(-\frac{2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \cos\phi + \cos 2\phi + \frac{U_2^2}{U_1^2}}{2 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \sin\phi + \sin 2\phi}\right). \qquad (12)$$

Учитывая, что $\varphi = 90° + \Delta\varphi$, и, подставляя в (7) соотношения (9) и (11), находим

$$(KCB)_{изм} = \sqrt{\frac{\left(1+\Gamma_x^2\right)\left(1+\frac{U_2^2}{U_1^2}-2\frac{U_2}{U_1}\sin\Delta\phi\right)+2\Gamma_x\sqrt{4\frac{U_2^2}{U_1^2}+1-4\frac{U_2}{U_1}\sin\Delta\phi+\frac{U_2^4}{U_1^4}-4\frac{U_2^3}{U_1^3}\sin\Delta\phi-2\frac{U_2^2}{U_1^2}\cos 2\Delta\phi}}{\left(1+\Gamma_x^2\right)\left(1+\frac{U_2^2}{U_1^2}-2\frac{U_2}{U_1}\sin\Delta\phi\right)-2\Gamma_x\sqrt{4\frac{U_2^2}{U_1^2}+1-4\frac{U_2}{U_1}\sin\Delta\phi+\frac{U_2^4}{U_1^4}-4\frac{U_2^3}{U_1^3}\sin\Delta\phi-2\frac{U_2^2}{U_1^2}\cos 2\Delta\phi}}. \quad (13)$$

Погрешность измерения КСВ - δКСВ – определится как

$$\delta KCB = \frac{(KCB)_{изм} - KCB}{KCB} = \frac{(KCB)_{изм}}{KCB} - 1 = (KCB)_{изм}\cdot\frac{1-\Gamma_x}{1+\Gamma_x} - 1. \quad (14)$$

Подставляя в (14) значение $(КСВ)_{изм}$ из (13) при заданных величинах U_2/U_1 и $\Delta\varphi$ для определенных значений Γ_x находится погрешность измерения КСВ δk.

Погрешность измерения фазы коэффициента отражения $\Delta\varphi_x$ в общем случае, как следует из (10), определяется соотношением (12):

$$\Delta\phi_x = \alpha = \mathrm{arctg}\left(-\frac{2\cdot\frac{U_2}{U_1}\cdot\sin\Delta\phi+\cos 2\Delta\phi-\frac{U_2^2}{U_1^2}}{2\cdot\frac{U_2}{U_1}\cdot\cos\Delta\phi-\sin 2\Delta\phi}\right). \quad (15)$$

Рассмотрим погрешности δКСВ и $\Delta\varphi_x$ для нескольких частных случаев.

1 $\Delta\varphi = 0,\ \frac{U_2}{U_1} = 1$.

Подстановка этих значений в (13)-(15) дает следующие результаты:

$$(KCB)_{изм} = \frac{1+\Gamma_x}{1-\Gamma_x};\quad \delta КСВ = 0;\ \Delta\varphi_x = 0.$$

2 $\Delta\varphi = 0,\ \frac{U_2}{U_1} \neq 1$. При этих данных получаем

$$(KCB)_{изм} = \frac{1+\Gamma_x}{1-\Gamma_x};$$

$$\delta KCB = \frac{1+\Gamma_x}{1-\Gamma_x}\cdot\frac{1-\Gamma_x}{1+\Gamma_x} - 1 = 0; \quad (16)$$

$$\Delta\phi_x = arctg\left(\frac{1-\frac{U_2^2}{U_1^2}}{2\frac{U_2}{U_1}}\right). \quad (17)$$

В данном случае погрешность измерения КСВ не зависит от отношения U_2/U_1.

3 $\Delta\varphi \neq 0,\ \dfrac{U_2}{U_1} = 1$.

$$(KCB)_{изм} = \sqrt{\frac{\left(1+\Gamma_x^2\right)\cdot\left(1-\sin\Delta\phi\right)+\Gamma_x\cdot\sqrt{6-6\cdot\sin\Delta\phi-2\cdot\cos 2\Delta\phi}}{\left(1+\Gamma_x^2\right)\cdot\left(1-\sin\Delta\phi\right)-\Gamma_x\cdot\sqrt{6-6\cdot\sin\Delta\phi-2\cdot\cos 2\Delta\phi}}};$$

$$\delta KCB = \sqrt{\frac{\left(1+\Gamma_x^2\right)\left(1-\sin\Delta\phi\right)+\Gamma_x\sqrt{6-6\sin\Delta\phi-2\cos 2\Delta\phi}}{\left(1+\Gamma_x^2\right)\left(1-\sin\Delta\phi\right)-\Gamma_x\sqrt{6-6\sin\Delta\phi-2\cos 2\Delta\phi}}}\cdot\frac{1-\Gamma_x}{1+\Gamma_x}-1; \quad (18)$$

$$\Delta\phi_x = \operatorname{arctg}\left(\frac{2\cdot\sin\Delta\phi+\cos 2\Delta\phi-1}{2\cdot\cos\Delta\phi-\sin 2\Delta\phi}\right). \quad (19)$$

Полученные формулы (13)-(19) позволяют рассчитать погрешности измерения КСВ и фазы коэффициента отражения для различных случаев, при которых возбуждаемая волна в круглом волноводе не является волной с круговой поляризацией. Однако рассматриваемый поляризационный измеритель, построенный на основе ответвителя круговой поляризации с крестообразным элементом связи волноводов, имеет фазовый сдвиг $\varphi = 90^\circ$. Поэтому погрешности измерения КСВ и фазы этим прибором вычисляются по формулам (16) и (17). В результате имеем следующее

$$\delta КСВ = 0; \quad \Delta\varphi_x = 4{,}83^\circ.$$

Расчет погрешности $\Delta\varphi_x$ проведен для значения отношения $U_2/U_1 = 0{,}919$.

Как следует из расчетов, в заданной рабочей полосе частот погрешности из-за неидеальности возбуждения поля круговой поляризации не превышают аналогичные погрешности известных поляризационных измерителей в диапазоне частот волновода. Более того, результирующие погрешности измерения КСВ в полосе частот разработанного прибора зависят только от технологического допуска на ортогональность щелей.

Таким образом, рассмотренный поляризационный измеритель позволяет с приемлемой точностью измерять коэффициент стоячей волны и фазу коэффициента отражения микроволновых устройств, построенных на базе полоскового металлодиэлектрического волновода.

Библиография

1 А.с. 1532983 СССР, МКИ[3] Н 01 Р 3/16. Диэлектрический волновод / И.В. Кудрявченко, А.В. Мельников, В.В. Саламатин (СССР). – № 4375460/24 - 09; Заявлено 05. 02. 88; Опубл. 30. 12. 89, Бюл. № 48. – 2 с.

2 Справочник по радиоизмерительным приборам: В 3-х т. / Под ред. В.Н. Насонова. — М.: Сов. радио, 1979. — 1024 с.

Поступила в редакцию 28.09.2000 г.