

РАСЧЕТ ФАЗОВЫХ ОШИБОК ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ

Э. Г. МИРЗАБЕКЯН, Р. Н. СИМОНЯН

Рассматриваются погрешности поляризационного метода измерения разности фаз в диапазоне СВЧ, обусловленные несовершенством отдельных СВЧ узлов и многократными отражениями. Оценены погрешности для одного конкретного фазоизмерителя.

На рис. 1 приведена блок-схема поляризационного метода измерения разности фаз. Электромагнитные волны \dot{E}_1 , \dot{E}_2 , разность фаз между которыми подлежит измерению, суммируется в пространственно-ортогональных направлениях в круглом волноводе (секция № 1). Полученная эллиптически поляризованная волна в дальнейшем проходит через фазовую „пластину“ $\frac{\lambda}{4}$ (секция № 2), расположенную под углом 45° к плоскости XOZ , на выходе которого получается эллиптически поляризованная волна с отношением осей эллипса [2] и ориентацией

$$r = \frac{|\dot{E}_2| - |\dot{E}_1|}{|\dot{E}_2| + |\dot{E}_1|}, \quad \beta = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} [\arg \dot{E}_2 - \arg \dot{E}_1] = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \psi.$$

Таким образом, совместное действие секций 1 и 2 сводится к преобразованию измеряемой разности фаз в соответствующую ориентацию эллипса поляризации. Отметим, что вместо секции № 1 и № 2 можно применять волноводно-щелевой возбуждатель, описанный в [2].

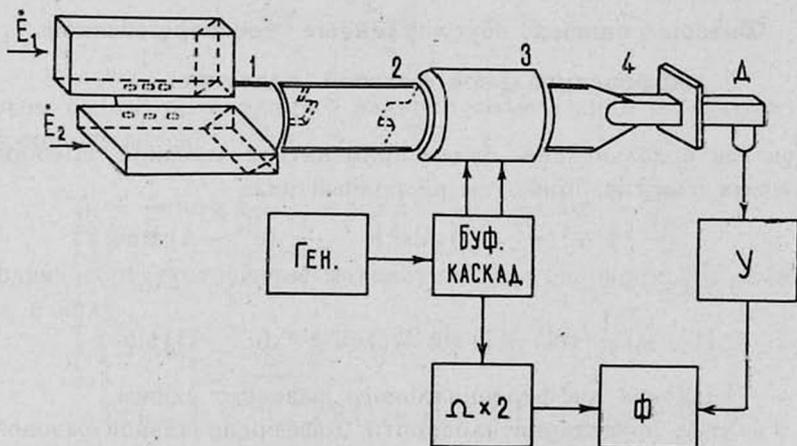


Рис. 1.

Вращающаяся с частотой f „пластина“ $\frac{\lambda}{2}$ (секция № 3) [3] приводит во вращение с частотой $2f$ плоскость поляризации этого эллипса. Затем эта волна, пройдя через анализатор поляризации (секция № 4),

детектируется и усиливается узкополосным усилителем, настроенным на частоту $4f$. Начальная фаза Φ полученного сигнала линейно зависит от ориентации эллипса — β :

$$\Phi = 2\beta = \frac{\pi}{2} - \psi. \quad (1)$$

В дальнейшем эта фаза измеряется низкочастотным фазометром, опорный канал которого питается от задающего генератора с последующим удвоением этой частоты.

Схематически принцип работы данного метода можно наглядно записать в следующем виде:

$$\psi \rightarrow \beta \rightarrow \Phi.$$

Зависимость (1) имеет место при идеальности отдельных узлов (секции 1, 2, 3, 4) СВЧ тракта. В реальном случае она имеет вид

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - f + \varepsilon(\rho, \psi, \Delta_l \Gamma_l),$$

где $\rho = \left| \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \right|$, а Δ_l, Γ_l — величины, характеризующие несовершенство отдельных узлов СВЧ тракта.

В дальнейшем для расчета величины ε будут учтены следующие источники ошибок: а) ошибки, обусловленные несовершенством фазовых пластин $\frac{\lambda}{4}$ и $\frac{\lambda}{2}$, выражающимся несоответствием реального дифференциального фазового сдвига 90° и 180° и несогласованностью пластин, б) ошибки, обусловленные многократными отражениями остальных узлов.

Фазовые ошибки, обусловленные несовершенством дифференциальной фазовой „пластины” $\frac{\lambda}{4}$.

Так как в дальнейшем будет применяться матрица преобразования фазовых пластин, приведем её полный вид:

$$\|S_\varphi\| = \begin{vmatrix} 1 + (e^{j\varphi} - 1) \cos^2 \beta & \frac{1}{2} (e^{j\varphi} - 1) \sin 2\beta \\ \frac{1}{2} (e^{j\varphi} - 1) \sin 2\beta & 1 + (e^{j\varphi} - 1) \sin^2 \beta \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Здесь φ — величина дифференциального фазового сдвига, β — угол ориентации плоскости дифференциальной фазовой пластины относительно плоскости ХОZ. Реальный дифференциальный фазовый сдвиг „пластины” $\frac{\lambda}{4}$ можно выразить так:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta_1.$$

Появление члена Δ_1 может быть вызвано неточностью изготовления пластины на центральной рабочей частоте F_0 и его частотной зависимостью $\Delta_1(F_0 - F)$. Для простоты дальнейших математических выводов сделаем предположение о малости величины

$$\Delta_1 \ll 1.$$

Обозначим через $\|S_{\lambda/4}\|$ — реальную матрицу преобразования „пластины $\frac{\lambda}{4}$ “. Подставляя в (2) $\varphi = \frac{\pi}{2} + \Delta_1$ и $\beta = \frac{\pi}{4}$ с учетом того, что $\Delta_1 \ll 1$ получим

$$\|S_{\lambda/4}\| = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} j+1-\Delta_1 & j-1-\Delta_1 \\ j-1-\Delta_1 & j+1-\Delta_1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Состояние поляризации волны на выходе секции № 1 и на выходе секции № 2 можно характеризовать матрицами

$$\|\vec{E}_1^{(x,y)}\| = E_1 \begin{vmatrix} 1 \\ p \end{vmatrix}, \quad \|\vec{E}_2^{(x,y)}\| = E_1 \|S_{\lambda/4}\| \begin{vmatrix} 1 \\ p \end{vmatrix},$$

где $p = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}$.

Расчеты упрощаются переходом от представления в линейно-поляризованных базисах к представлению в циркулярно поляризованных базисах, осуществляющимся с помощью матрицы $\|Q\|$ [1]

$$\begin{vmatrix} E_{2 \text{ Вых}}^{(+)} \\ E_{2 \text{ Вых}}^{(-)} \end{vmatrix} = \|Q\| \cdot \|\vec{E}_2^{(x,y)}\|, \quad (4)$$

где

$$\|Q\| = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{vmatrix}. \quad (5)$$

В новом базисе ориентация β эллипса поляризации на выходе секции № 2 определяется

$$\beta_1 = \frac{1}{2} [\arg \dot{E}_{2 \text{ Вых}}^{(-)} - \arg \dot{E}_{2 \text{ Вых}}^{(+)}] = \frac{1}{2} \arg \frac{\dot{E}_{2 \text{ Вых}}^{(-)}}{\dot{E}_{2 \text{ Вых}}^{(+)}}. \quad (6)$$

Выполнив соответствующие математические операции, (4) можно привести к виду

$$\begin{vmatrix} \dot{E}_{2 \text{ Вых}}^{(+)} \\ \dot{E}_{2 \text{ Вых}}^{(-)} \end{vmatrix} = \frac{E_1}{2\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 2p(j-1) - \Delta_1(1+j)(p+1) \\ 2(1+j) - \Delta_1(1-j)(p+1) \end{vmatrix}.$$

Отсюда, имея в виду (6), получим

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \arg \frac{1+j\delta}{jp-\delta}, \quad \text{где } \delta = \frac{\Delta_1}{2}(1+p).$$

После некоторых преобразований эту формулу можно привести к виду

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\frac{\Delta_1^2}{4} (1 + p^2) + \left(\frac{\Delta_1^2}{2} + 1\right) p \cdot \cos \psi}{\frac{\Delta_1}{2} (1 - p^2) + p \sin \psi}.$$

Фаза низкочастотного сигнала определяется соотношением

$$\Phi_1 = 2\beta_1.$$

Имея в виду (1), фазовая ошибка, обусловленная несовершенством „пластины $\frac{\lambda}{4}$ “, определяется

$$\delta_{\lambda/4} = \Phi_1 - \Phi = 2\beta_1 - \frac{\pi}{2} + \psi.$$

Подставляя сюда выражение для β_1 , окончательно получим

$$\delta_{\lambda/4} = \operatorname{arctg} \frac{\frac{\Delta_1^2}{4} (1 + p^2) + \left(\frac{\Delta_1^2}{2} + 1\right) p \cos \psi}{\frac{\Delta_1}{2} (1 - p^2) + p \sin \psi} + \psi - \frac{\pi}{2}.$$

Ошибка $\delta_{\lambda/4}$ при постоянном значении p может быть учтена при калибровке прибора. В случае произвольного изменения p будем иметь флуктуации фазы.

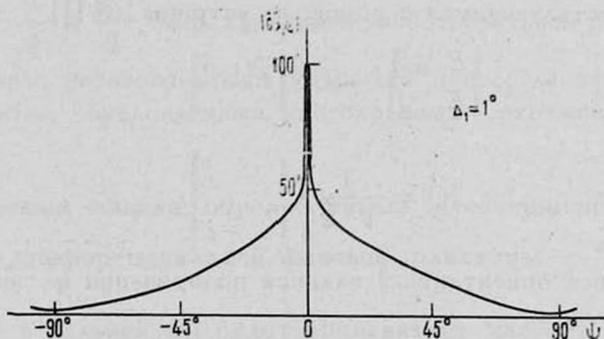


Рис. 2.

На рис. 2 приведена кривая зависимости ошибки фазы от величины измеряемой разности фаз ψ при изменении p в пределах $0,5 \div 2$ (12 дБ, изменение по мощности) и $\Delta_1 = \pm 1^\circ$, то есть кривая $\delta'_{\lambda/4} = |\delta_{\lambda/4}(p = 0,5) - \delta_{\lambda/4}(p = 1)|$ представляющая максимальную ошибку.

**Фазовые ошибки, обусловленные несовершенством
вращателя плоскости поляризации („пластины $\frac{\lambda}{2}$ “)**

Поляризованная волна на входе „пластины $\frac{\lambda}{2}$ “ определяется матрицей

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{\text{ВХ}}^{(x)} \\ \varepsilon_{\text{ВХ}}^{(y)} \end{pmatrix} = \|S_{\lambda/4}\| \begin{pmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $\|S_{\lambda/4}\|$ — матрица преобразования поляризации идеальной „пластины $\frac{\lambda}{4}$ “. Предполагая, что $\varphi = 90^\circ$, $\beta = 45^\circ$, из выражения (2) получим

$$\|S_{\lambda/4}\| = \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Поляризация волны на выходе „пластины $\frac{\lambda}{2}$ “ определяется

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{\text{ВЫХ}}^{(x)} \\ \varepsilon_{\text{ВЫХ}}^{(y)} \end{pmatrix} = E_1 \|S_{\lambda/2}\| \cdot \|S_{\lambda/4}\| \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ p \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $\|S_{\lambda/2}\|$ — реальная матрица преобразования „пластины $\frac{\lambda}{2}$ “. Элементы этой матрицы получим подстановкой в (2) $\varphi = \pi + \Delta_2$, $\beta = \Omega t$, где Ω — угловая частота вращения „пластины $\frac{\lambda}{2}$ “:

$$\|S_{\lambda/2}\| = \begin{pmatrix} 1 - (2 - j\Delta_2) \cos^2 \Omega t & -\frac{1}{2} (2 + j\Delta_2) \sin 2\Omega t \\ -\frac{1}{2} (2 + j\Delta_2) \sin 2\Omega t & 1 - (2 + j\Delta_2) \sin^2 \Omega t \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Предположим, что анализатор поляризации — секция № 4 — настроен на компоненту $\varepsilon_{\text{ВЫХ}}^{(x)}$. Тогда, при квадратичности вольт-амперной характеристики детектора напряжение на его нагрузке определяется

$$U = \gamma \cdot \varepsilon_{\text{ВЫХ}}^{(x)} \cdot \varepsilon_{\text{ВЫХ}}^{(x)*}. \quad (11)$$

Подставляя выражения (10), (8) в (9), получим

$$\varepsilon_{\text{ВЫХ}}^{(x)} = ZE_1 \left\{ 1 - jp - (2 + j\Delta_2) \left[(1 - jp) \cos^2 \Omega t + \frac{1}{2} (p - j) \sin 2\Omega t \right] \right\},$$

$$\text{где } Z = e^{j\frac{\pi}{4}} \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Подставляя этот результат в (11), для составляющей напряжения U с частотой 4Ω получим

$$U_{4\Omega} = \gamma p E_1^2 \sin(4\Omega t + \Phi) + \frac{\Delta_2}{2} \gamma E_1^2 \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \sin(4\Omega t + \theta).$$

Первый член есть напряжение при идеальности „пластины $\frac{\lambda}{2}$ “, второй член обусловлен неидеальностью пластины. Ошибку фазы, обусловленную вторым членом, можно определить из рис. 3 как

$$\delta_{\lambda/2} = \frac{\Delta_2}{2p} \sqrt{M_1^2 + M_2^2},$$

где

$$M_1 = \frac{p^2}{2} (\sin 2\Phi - \cos 2\Phi) - p \cos \Phi - \frac{1}{2},$$

$$M_2 = \frac{p^2}{2} (\sin 2\Phi + \cos 2\Phi) + p \sin \Phi - \frac{1}{2}.$$

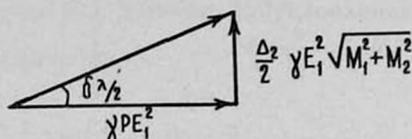


Рис. 3.

Поступая аналогично предыдущему, можно получить кривую зависимости ошибки $\delta'_{\lambda/2}$ от ψ , когда p изменяется в пределах $0,5 + 2$, $\Delta_2 = \pm 2^\circ$, то есть кривую $\delta'_{\lambda/2} = |\delta_{\lambda/2}(p=0,5) - \delta_{\lambda/2}(p=2)|$, представляющую максимальную ошибку (рис. 4).

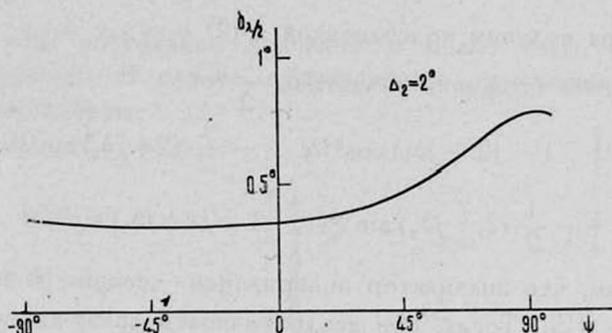


Рис. 4.

Фазовые ошибки, обусловленные многократными отражениями отдельных частей СВЧ тракта

Эквивалентную схему высокочастотной части фазометра с точки зрения распространения волн можно представить в виде (рис. 5), где

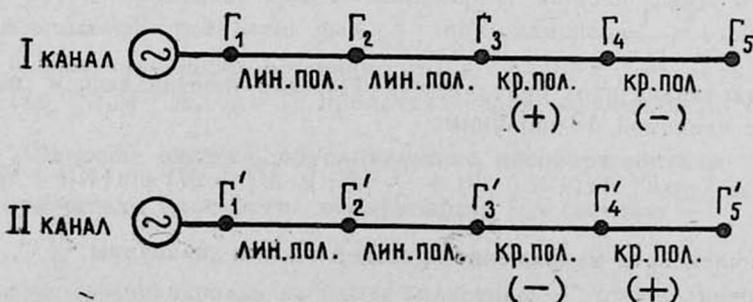


Рис. 5.

точками обозначены неоднородности и указан характер поляризации в отдельных участках. На рисунке введены следующие обозначения:

Γ_1, Γ'_1 — коэффициенты отражения генератора со стороны фазометра для первого и второго каналов;

Γ_2, Γ'_2 — коэффициенты отражения переходов от прямоугольного волновода к круглому (секция № 1);

Γ_3, Γ'_3 — коэффициенты отражения „пластины $\frac{\lambda}{4}$ “ в направлениях x, y ;

Γ_4, Γ'_4 — коэффициенты отражения „пластины $\frac{\lambda}{2}$ “ для волн с правой и левой круговой поляризацией;

Γ_5, Γ'_5 — коэффициенты отражения анализатора поляризации (вместе с нагрузкой) для волн с левой и правой круговой поляризацией.

Как показано в [4], добавочный фазовый угол, обусловленный многократными отражениями, выражается

$$\varepsilon = \text{arctg} \left(\sum |\Gamma_i| \cdot |\Gamma_k| \sin 2kL_{ik} \right), \quad (12)$$

где L_{ik} — расстояние между неоднородностями,
 k — фазовая постоянная линии передачи.

Если обозначить через ε_1 и ε_2 соответствующие добавочные фазовые углы, возникающие в первом и втором каналах, то добавочный фазовый угол в показании фазометра следует рассчитать по формуле

$$\delta = \varepsilon_1 - \varepsilon_2.$$

Предположим, что $|\Gamma_m| \leq 0,05$ ($KCB \leq 1,1$) тогда при числе неоднородностей $n = 5$ формулу (12) можно упростить. При этом

$$\delta = \sum (|\Gamma_i| \cdot |\Gamma_k| - \Gamma'_i \cdot \Gamma'_k \sin 2\beta L_{ik}).$$

Максимальная погрешность фазы за счет многократных отражений между неоднородностями i, k равна

$$\delta_{ik} = |\Gamma_i| \cdot |\Gamma_k| - |\Gamma'_i| \cdot |\Gamma'_k|.$$

Если учесть калибровку фазометра на частоте F_0 , то максимальную погрешность следует взять

$$\delta_{\max i, k} = 2 \delta_{ik}.$$

Следуя методу И. Б. Лайхтмана при работе в широком диапазоне частот, частотную и результирующую погрешности следует оценивать по среднеквадратичному значению

$$\delta_{\max i, k} = 2 \cdot 0,7 \cdot \delta_{ik},$$

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum (\delta_{\max ik}^*)^2}. \quad (13)$$

Предполагая, что величина $|\Gamma'_m|$ отличается от $|\Gamma_m|$ на $\pm 20\%$ из (13), получим

$$\delta_{\Sigma} \approx 0,27^\circ.$$

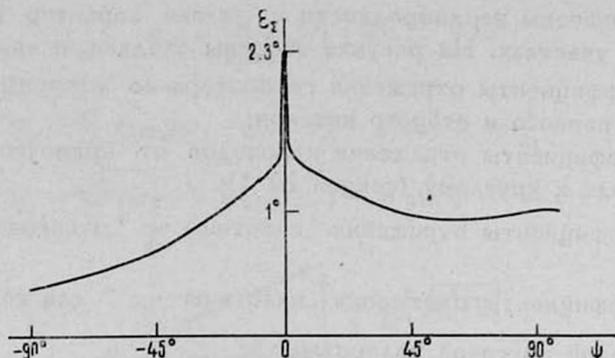


Рис. 6.

На основе полученных результатов на рис. 6 показана зависимость суммарной фазовой ошибки (разрешение по фазе) от величины измеряемой разности фаз.

Институт радиопизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 12.III.1971

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин, Поляризация радиолокационных сигналов, 1966, Изд. Сов. радио.
2. В. Н. Олейников, В. В. Бойков, Радиотехника и электроника, 5, 1970.
3. Э. Г. Мирзабекян, Сообщения Бюраканской обсерватории АН АрмССР, вып. XIX, 1956.
4. Н. Т. Бова, Э. Н. Каплан, И. Б. Лайхтман, Изв. вузов СССР, Радиотехника, V, № 3, 1962.

ՓՈՒԼԵՐԻ ՏԱՐԲԵՐՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓՄԱՆ ԲԵՎԵՌԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻ ՓՈՒԼԱՑԻՆ ՍԽԱԼՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Է. Հ. ՄԻՐԶԱԲԵԿՅԱՆ, Ռ. Ն. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

Տվյալ աշխատանքում ուսումնասիրված փուլերի տարբերության չափման, բևեռացման մեթոդի փուլային սխալների առաջացման մի քանի աղբյուրներ:

Գնահատված են փուլային սխալների մեծությունները, պայմանավորված առանձին հանդուցների անկատարելիությամբ և բազմապատիկ անդրադարձումներով:

Գնահատված է գումարային սխալը որոշակի փուլաչափի համար, որը կազմում է $0,4 \div 2,3^\circ$ կախված չափվող փուլերի տարբերության մեծություններից:

PHASE ERROR CALCULATION FOR PHASE DIFFERENCE MEASUREMENTS IN THE POLARIZATION METHOD

E. H. MIRZABEKIAN, R. N. SIMONIAN

In this work some sources giving rise to phase errors in the polarization method of phase difference measurements are taken into consideration.

The magnitudes of phase errors due to the nonperfectness of single units and multiple reflections are estimated.

The resultant error for a definite phasemeter is estimated to give $0,4 \div 2,3^\circ$ subject to the phase difference being measured.