

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗНОСТИ ФАЗ В ДИАПАЗОНЕ ВОЛН СВЧ

Э. Г. МИРЗАБЕКЯН, Р. Н. СИМОНЯН

В данной работе рассмотрен поляризационный способ измерения малых изменений разности фаз в диапазоне волн СВЧ, сущность которого заключается в умножении малых изменений разности фаз перед измерением. Показано, что такое умножение сопровождается переносом измеряемого изменения разности фаз из диапазона волн СВЧ в диапазон звуковых частот. Получено соотношение для оптимального выбора коэффициента умножения. Оценены точность и порог фазовой чувствительности.

В работе [1] предложен один метод измерения малых изменений разности фаз в диапазоне волн СВЧ, обеспечивающий умножение измеряемой величины. Из анализа этого метода следовало, что по мере увеличения коэффициента умножения, поляризация волны на выходе секции 1 приближается к круговой, следствием чего является уменьшение напряжения полезного сигнала на нагрузке детектора на фоне постоянной составляющей (малая глубина модуляции). При флуктуирующих мощностях измеряемых сигналов, выделение полезного сигнала в некоторых случаях может стать невозможным. Для преодоления этой трудности до вращателя плоскости поляризации можно применять специальный преобразователь поляризации [2], преобразующего эллиптическую поляризацию в линейную, изменение ориентации которой следует за изменением ориентации преобразуемого эллипса поляризации. При таком построении фазоизмеритель, очевидно, окажется громоздким. Ниже предлагается второй метод такого рода измерения, обеспечивающий линейную поляризацию. Фазоизмерительное устройство, созданное на основе этого метода, в конструктивном отношении значительно компактнее.

Сущность предлагаемого метода заключается в следующем: СВЧ колебания E_1 , E_2 , изменение разности фаз между которыми подлежит измерению, суммируются в пространственно-ортогональных направлениях в круглом волноводе при помощи разделителя поляризации (секция 1, рис. 1). Полученная таким образом поляризованная волна преобразуется по поляризации при помощи фазовой „пластины $\frac{\lambda}{4}$ “ (секция 2), расположенной под углом 45° относительно плоскости XOZ, и поглощающей пластины (секция 3) с коэффициентом передачи по напряженности поля равным S , расположенной в плоскости XOZ. Такое расположение поглощающей пластины, как будет видно в дальнейшем, не носит принципиального характера и выбрано для упрощения математических расчетов. Преобразованная по поляризации

волна, проходя через вращатель поляризации с частотой вращения плоскости поляризации $\frac{\Omega}{2\pi}$ (секция 4) и через анализатор поляризации (секция 5), попадает на вход приемника, состоящего из детектора СВЧ волн и избирательного усилителя на частоте $\frac{\Omega}{\pi}$.

При слабых сигналах можно применить принцип супергетеродинного приема. В дальнейших рассуждениях предполагается квадратичная вольт-амперная характеристика диода, хотя это и не имеет принципиального значения. Выходным напряжением усилителя питается измерительный канал низкочастотного фазометра. Опорный канал этого фазометра питается напряжением от задающего генератора после удвоения частоты.

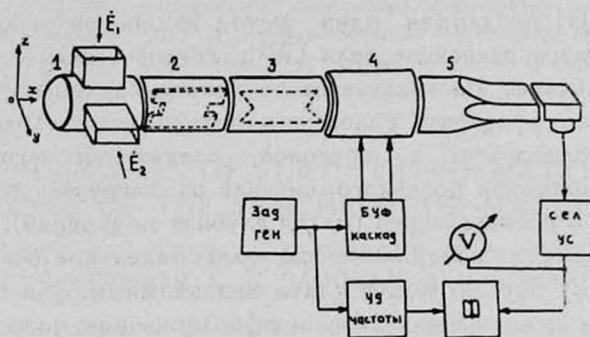


Рис. 1.

Для анализа работы указанного фазометра введем следующие обозначения.

Пусть $\vec{E}_1 = E_x e^{j(\omega t - \varphi_x)}$, $\vec{E}_2 = E_y e^{j(\omega t - y)}$.

Представим φ_y в следующем виде:

$$\varphi_y = \frac{\varphi}{2} + \Delta, \quad (1)$$

где Δ есть подлежащее измерению малое изменение разности фаз сигналов (при первоначальном сдвиге в $\frac{\pi}{2}$); φ_x — без ограничения общности можно положить равной нулю.

Вследствие суммирования $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ в пространственно ортогональных направлениях в секции 1, полученная поляризованная волна может быть характеризована следующей матрицей [3]:

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} \vec{E}_2 \\ \vec{E}_1 \end{bmatrix}.$$

С учетом обозначений (1) она принимает следующий вид:

$$\vec{e} = -je^{j\omega t} E_x \left\| \begin{matrix} \dot{e}_2 \\ \dot{E}_1 \end{matrix} \right\|^{-1},$$

где $\dot{e} = \frac{\dot{E}_y}{E_x}$.

Обозначим через $\|H_\varphi\|$ — поляризационную матрицу Джонса для фазовой „пластины“ $\frac{\lambda}{4}$, ориентированной под углом 45° относительно плоскости XOZ, через $\|H_s\|$ — аналогичную матрицу для поглощающей пластины, а через $\|H_t\|$ — поляризационную матрицу Джонса для вращателя плоскости поляризации и анализатора поляризации (секции 4 и 5) при их совместном рассмотрении.

При таких обозначениях напряженность электрического поля на входе приемника определяется выражением

$$\dot{\varepsilon}_n = \sigma \|H_t\| \cdot \|H_s\| \cdot \|H_\varphi\| \cdot \vec{e}, \quad (2)$$

где σ — постоянный коэффициент, зависящий от волновых сопротивлений входного прямоугольного волновода приемника и входных прямоугольных волноводов фазометра:

$$\|H_t\| = \|\sin(\Omega t + \psi_0), \cos(\Omega t + \psi_0)\|,$$

ψ_0 — угол ориентации анализатора поляризации;

$$\|H_s\| = \begin{vmatrix} S & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad \|H_\varphi\| = e^{j\frac{\pi}{4}} \begin{vmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{vmatrix}.$$

Напряжение на выходе приемника выражается соотношением

$$U(\rho, S, \Delta) = \beta \cdot \dot{\varepsilon}_n \cdot \dot{\varepsilon}_n^*, \quad (3)$$

где β — некоторый постоянный коэффициент.

После определения значения $\dot{\varepsilon}_n$ из формулы (2) и подстановки его в (3) получим

$$U(\rho, S, \Delta) = U_0(\rho, S, \Delta) + W(\rho, S, \Delta) \cos[2\Omega t + 2\psi_0 - \varphi(\rho, S, \Delta)]. \quad (4)$$

Здесь U_0 — постоянная составляющая выходного сигнала, которая не представляет интереса для данной задачи и поэтому в дальнейшем не будет рассматриваться.

$$W(\rho, S, \Delta) = \frac{1}{2} \beta E_x^2 \sqrt{G_1^2 + G_2^2}, \quad (4a)$$

$$G_1 = -2S\rho \sin \Delta, \quad G_2 = \frac{1}{2} (1 - S^2)(1 + \rho^2) - \rho(1 + S^2) \cos \Delta,$$

$$\varphi(\rho, S, \Delta) = \operatorname{arctg} \frac{\delta \sin \Delta}{\gamma \cos \Delta - 1}, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{4\rho S}{(1 - S^2)(1 + \rho^2)}, \quad \gamma = \frac{2\rho(1 + S^2)}{(1 - S^2)(1 + \rho^2)}.$$

Как видно из выражения (4), в спектральном составе выходного напряжения содержится низкочастотное гармоническое колебание с частотой $\frac{\Omega}{\pi}$ и начальной фазой $\psi' = 2\psi_0 - \varphi(\rho, S, \Delta)$, находящейся в функциональной зависимости от Δ . Функция $\varphi(\rho, S, \Delta)$ дает закон преобразования изменения разности фаз из диапазона волн СВЧ в изменение разности фаз в диапазоне низких (звуковых) частот.

Определим коэффициент умножения по изменению фаз $D_\Delta(\rho, S, \Delta)$ как абсолютное значение частной производной функции ψ' по Δ :

$$D_\Delta(\rho, S, \Delta) = \left| \frac{\partial \psi'}{\partial \Delta} \right|.$$

После несложных математических преобразований эту функцию можно привести к виду

$$D_\Delta(\rho, S, \Delta) = \rho \left| \frac{\gamma - \cos \Delta}{\rho^2 \sin^2 \Delta + (\gamma \cos \Delta - 1)^2} \right|. \quad (6)$$

Для наглядности на рис. 2 приведены графики функции $D_\Delta(\rho, S, \Delta)$ для значений $S = 0,05; 0,1; 0,2$; и $\rho = 1$.

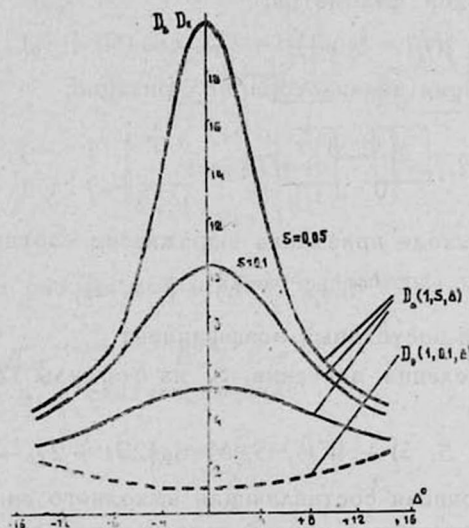


Рис. 2.

Как видно из этих графиков, коэффициент умножения при $\rho = 1$ достигает своего максимального значения при $\Delta = 0$ и выражается:

$$D_\Delta(1, S, 0) = \frac{1}{S},$$

то-есть установление желаемого коэффициента умножения достигается определенным выбором поглощающей пластины. Из (1) следует, что при $\Delta = 0$ и $\rho = 1$ на вход секции с поглощающей пластиной поступает линейно-поляризованная волна, плоскость поляризации которой парал-

лельна плоскости поглощающей пластины. Пройдя через эту пластину, волна опять останется линейно поляризованной с той же ориентацией. Дальнейшее изменение ориентации плоскости поляризации входной линейно-поляризованной волны приводит к изменению ориентации плоскости поляризации выходной линейно-поляризованной волны, при этом последнее изменение тем сильнее, чем больше поглощающая способность пластины. В этом и заключается физический эффект умножения. В том случае, когда измеряется изменение разности фаз в произвольной окрестности начального сдвига фаз Φ_0 СВЧ сигналов, поглощающая пластина, для достижения аналогичной ситуации, должна быть установлена под углом

$$\alpha = \frac{1}{4} \pi - \frac{1}{2} \Phi_0 \quad (7)$$

относительно плоскости XOZ.

На рис. 2 пунктирной линией показана зависимость выходного нормированного напряжения D_E от изменения разности фаз в пределах $\pm 15^\circ$ при значениях ρ и S соответственно 1 и 0,1:

$$D_E = \frac{W(1, 0, 1, \Delta)}{W(1, 0, 1, 0)}.$$

Из анализа формулы (6) вытекает, что функция $D_\Delta(\rho, S, 0)$ (максимальная величина коэффициента умножения) в двух точках

$$\rho_1 = \frac{1-S}{1+S} \quad \text{и} \quad \rho_2 = \frac{1+S}{1-S}$$

обращается в бесконечность. Этот факт физически может быть объяснен следующим образом: при значениях ρ очень близких к величинам ρ_1 и ρ_2 поляризация волны на выходе секции 3 близка к круговой, угол ориентации которой сильно зависит от Δ . Из (6) также нетрудно определить ту область изменения ρ , где максимальный коэффициент умножения по изменению разности фаз имеет наименьшую зависимость от изменения величины ρ . Разрешая относительно ρ уравнение

$$\frac{\partial D_\Delta(\rho, S, 0)}{\partial \rho} = 0,$$

получим

$$\rho_0 = 2(1-S^2) + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S^4}{(1-S^2)^2} + 4}.$$

При значениях $S \leq 0,1$ ρ_0 близко к единице. Например, при $S = 0,1$ имеем $1 - \rho_0 \approx 0,005$. В дальнейших рассуждениях будем считать, что $\rho_0 = 1$.

При этом допускаемые ошибки пренебрежимо малы. Как следует из (6), коэффициент умножения по изменению разности фаз находится в функциональной зависимости от Δ , следствием чего является нелинейность шкалы фазометра. В частном случае, когда $S \geq 0,01$, из

(6) легко определить нелинейность шкалы фазометра. При изменении Δ в пределах $-0,5^\circ \leq \Delta \leq +0,5^\circ$ нелинейность не превышает 3%.

Оценка фазовых ошибок и порог фазовой чувствительности

Согласно вышеприведенным рассуждениям, показания низкочастотного фазометра определяются соотношением

$$\psi' = D_\Delta(\rho, S, \Delta) \cdot \Delta.$$

Оценим фазовые ошибки измерения для $S_1 \gg 3,1 \cdot 10^{-2}$. Для этого случая внутри интервала $-0,5^\circ \leq \Delta \leq +0,5^\circ$ с удовлетворительной точностью эту же формулу можно написать в виде

$$\psi' = D_\Delta(\rho, S, 0) \cdot \Delta.$$

Отсюда

$$\Delta = \frac{\psi'}{D_\Delta(\rho, S, 0)}. \quad (8)$$

Из (8) определим ошибку измерения как

$$\varepsilon = \left| \frac{\partial \Delta}{\partial \psi'} \Delta \psi' \right|_{\rho=s_0} + \left| \frac{\partial \Delta}{\partial \rho} \Delta \rho \right|_{s=s_0} + \left| \frac{\partial \Delta}{\partial S} \Delta S \right|_{\rho=1}.$$

Здесь $\Delta \psi'$ — разрешающая способность низкочастотного фазометра;

ΔS — ошибка измерения величины коэффициента передачи по напряженности поглощающей пластины.

Обозначим

$$\varepsilon = \varepsilon_\psi + \varepsilon_\rho + \varepsilon_s. \quad (9)$$

Из (8), имея в виду (6), получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_\psi &= S \cdot \Delta \psi', \\ \varepsilon_\rho &= \frac{\rho^2 - 1}{\rho} \cdot \frac{(1 - S^2) \Delta \rho \cdot \Delta}{2\rho(1 + S^2) - (1 - S^2)(1 + \rho^2)}, \\ \varepsilon_s &= \frac{1}{S} \Delta S \cdot \Delta. \end{aligned}$$

В предположении, что $\rho \approx 1$ и $S \ll 1$, выражение для ε_ρ можно упростить, придав ему вид

$$\varepsilon_\rho = \frac{(\Delta \rho)^2 \cdot \Delta}{4S^2}.$$

Подставляя полученные выражения в (9), получим

$$\varepsilon = S \cdot \Delta \psi' + \frac{1}{S^2} \left(\frac{\Delta \rho}{2} \right)^2 \Delta + \frac{1}{S} \Delta S \cdot \Delta. \quad (10)$$

Из (10) видно, что для определенных значений $\Delta \psi'$, Δ , $\Delta \rho$, ΔS можно найти такое значение S , при котором ошибка ε минимальна. Сделаем упрощающее предположение $-\frac{\Delta S}{S} = \beta = \text{const.}$

Решая уравнение $\frac{d\varepsilon}{dS} = 0$, получим

$$S_{\text{опт.}} = \sqrt[3]{\frac{(\Delta\rho)^2}{2} \cdot \frac{\Delta}{\Delta\psi'}}.$$

Соответственно, оптимальный коэффициент умножения определяется

$$D_{\text{опт.}} = \frac{1}{S_{\text{опт.}}}.$$

Предположим, что $\Delta\psi' = 0,5^\circ$, $\beta = 10^{-1}$, а $\Delta\rho$ в течение измерения не превышает 1%, тогда $S_{\text{опт.}} \approx 0,037$, $D_{\text{опт.}} \approx 27$, $\varepsilon \approx 0,07^\circ$. Порог чувствительности по изменению разности фаз можно получить, если в (10) величину Δ устремить к нулю:

$$\delta_{\text{пор.}} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \varepsilon = S \cdot \Delta\psi'.$$

Подставляя численные значения, получаем

$$\delta_{\text{пор.}} \approx 0,018^\circ.$$

Предположение о стабильности величины ρ , вообще говоря, является довольно сильным ограничивающим условием, однако, в ряде случаев оно выполнимо, как например при фазовой пеленгации, а также радиодальнометрических измерениях малых изменений координат.

Краткое описание эксперимента и полученные результаты

Для экспериментальной проверки предложенного метода был собран макет на волне 3,2 см.

В качестве „пластины $\frac{\lambda}{2}$ “ служила полистироловая пластина.

Поглощающая пластина была выполнена из тонкой слюды с аквадаковым слоем и имела коэффициент затухания по мощности равный 29,5 дБ и соответственно коэффициент умножения $D_\lambda \approx 30$. Вращатель плоскости поляризации представлял „пластину $\frac{\lambda}{2}$ “ в круговом волноводе, являющимся осью синхронного двигателя [4]. Двигатель питался напряжением с частотой $f = 37$ Гц. Приемник СВЧ волны представлял кремниевый диод ДК-ВЗ с последующим узкополосным усилителем на частоте 74 Гц с полосой пропускания $\Delta f \approx 2$ Гц и коэффициентом усиления $K_v \approx 10^3$. Умножитель низкой частоты был собран на основе двухполупериодного выпрямителя с последующим фильтром на частоте 74 Гц. Низкочастотным фазометром служил стандартный фазометр Ф2-1.

СВЧ колебание от генератора при помощи волноводного тройника разделялось на два канала. В один канал был введен измерительный фазовращатель, собранный на основе Y циркулятора и короткозамыкателя с микрометрическим приспособлением. Этот фазовращатель позволял создать малое изменение разности фаз между каналами.

В другой канал был введен компенсирующий аттенуатор. Экспериментально был подтвержден качественный ход функциональной зависимости $D_{\Delta} = D_{\Delta}(\Delta)_{p=\text{const}}$ и найден порог фазовой чувствительности

$$\delta_{\text{пор.}} \approx 0,05^{\circ}.$$

Эта величина примерно в три раза больше расчетной. Такое расхождение может быть вызвано нестабильностью частоты ($f = 37$ МГц) задающего генератора, которая приводит к флуктуациям фазового сдвига в узкополосном усилителе.

Институт радиофизики и электроники
АН Армянской ССР

Поступила 25.XI.1970

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Э. Г. Мирзабекян, Р. Н. Симонян, Изв. АН АрмССР, Физика, 6, 1, 1971.
2. Р. Н. Симонян, Э. Д. Мирзабекян, Изв. АН АрмССР, Физика, 4, 4, 1969.
3. Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин, Поляризация радиолокационных сигналов, Изд. «Советское радио», 1966.
4. Э. Г. Мирзабекян, «Сообщения» Бюраканской обсерватории АН АрмССР, XIX, 1956.

ՓՈԽԼԵՐԻ ՓՈՔՐ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ԲԵՎԵՌԱՅՄԱՆ ՄԵԹՈԴ Գ. Բ. Հ. ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ

Է. Հ. ՄԻՐԶԱԲԵԿՅԱՆ, Բ. Ն. ՍԻՄՈՆՅԱՆ

Ներկա աշխատանքում քննարկված է փուլերի փոքր փոփոխությունների չափման բևեռացման մեթոդ, որի էությունը կայանում է մինչև փուլաշափիչը փուլերի փոքր փոփոխությունների բաղադրատկան մեջ:

Ցույց է տրված, որ այդպիսի բաղադրատկանը ուղեկցվում է չափվող փուլերի փոփոխությունների տեղափոխմամբ Գ. Բ. Հ. տիրույթից դեպի ձայնային հաճախականությունների տիրույթ:

A POLARIZATION METHOD FOR SMALL PHASE DIFFERENCE VARIATION MEASUREMENTS IN THE MW RANGE

E. H. MIRZABEKIAN, R. N. SIMONIAN

A polarization method for small phase difference variation measurements in MW the essence of which lies in a preliminary multiplication of the small variation being measured, is considered.

Such a multiplication is shown to be accompanied by conversion of the phase difference variation from MW into the AF range.

A relationship for optimum choice of the multiplication factor is obtained.

The accuracy and the phase threshold sensitivity are estimated.