

В. И. МЕЛЕШКО, канд. техн. наук, В. И. ВЬЮНИК, Б. И. ГОНЧАРОВ,
канд. техн. наук, Т. А. МАЛАШИХИН

О МНОГОЗОНДОВОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ МОДУЛЯ И ФАЗЫ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ СВЧ-ТРАКТА

Быстрое развитие техники СВЧ требует создания совершенных методов и средств измерения параметров СВЧ-трактов. Особое значение при этом приобретает возможность автоматизации процесса измерений с использованием современных микропроцессорных средств. Применение этих средств позволяет получить значительно более высокие точностные характеристики и существенно увеличить производительность создаваемых измерительных комплексов.

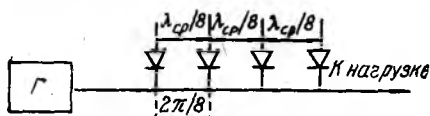


Рис. 1

Один из основных параметров, характеризующих передачу энергии по СВЧ тракту — комплексный коэффициент отражения $\rho = |\rho| \exp [i\varphi]$, где $|\rho|$ — модуль коэффициента отражения, а φ — его фаза.

В работе исследован известный [1] четырехзондовый метод определения модуля и фазы комплексного коэффициента отражения. Достоинством его является то, что он легко поддается автоматизации.

Приводится вывод явных формул для ρ и φ , изучены точностные характеристики этого метода, а также возможные его модификации для n — детекторов. Тем самым развиваются многозондовые методы измерения ρ и φ с использованием микропроцессорных средств. Основное внимание уделено измерению фазы. Данные методы успешно применяются в автоматизированных системах контроля СВЧ элементов.

Суть метода четырех зондов состоит в следующем.

В линии с четырьмя зондами (рис. 1), расположенными один от другого на расстоянии $\lambda_{ср}/8$, (где $\lambda_{ср}$ — расчетная длина волны в волноводе на средней частоте), измеряются напряжения, наводимые полями падающей и отраженной волны в зондах. Суммарные поля падающей и отраженной волн в точках размещения зондов описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_1 &= |E_n| \cos(\omega t - 3\pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t + 3\pi\delta/8 + \varphi); \\ E_2 &= |E_n| \cos(\omega t - \pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t + \pi\delta/8 + \varphi); \\ E_3 &= |E_n| \cos(\omega t + \pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t - \pi\delta/8 + \varphi); \\ E_4 &= |E_n| \cos(\omega t + 3\pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t - 3\pi\delta/8 + \varphi). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $|E_n|$ и $|E_0|$ — амплитуды падающей и отраженной волны; φ —

фаза отраженной волны, $\delta = \lambda_{cp}/\lambda$ — расстройка, вызванная отличием рабочей длины волны от ее среднего значения. Напряжения на нагрузках квадратичных детекторов равны $U_{\partial k} = aE_k^2$, (k — номер детектора) (2).

После подстановки (1) в (2) и выделения постоянной составляющей получим значения напряжений на нагрузках детекторов:

$$\begin{aligned} U_{\partial 1} &= a |E_n|^2 / 2 [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(3\pi\delta/4 + \varphi)]; \\ U_{\partial 2} &= a |E_n|^2 / 2 [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(\pi\delta/4 + \varphi)]; \\ U_{\partial 3} &= a |E_n|^2 / 2 [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(\pi\delta/4 - \varphi)]; \\ U_{\partial 4} &= a |E_n|^2 / 2 [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos(3\pi\delta/4 - \varphi)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $|\rho| = |E_0|/|E_n|$ — модуль коэффициента отражения, а a — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств детектора. Примем a одинаковыми для всех детекторов и равными единице. Найдем из (3) выражение для φ и $|\rho|$.

Вычитая из $U_{\partial 1}U_{\partial 3}$, а из $U_{\partial 2}U_{\partial 4}$, имеем

$$\begin{aligned} U_x &= U_{\partial 1} - U_{\partial 3} = -2 |E_n|^2 |\rho| \sin \pi\delta/2 \sin(\varphi + \pi\delta/4); \\ U_y &= U_{\partial 2} - U_{\partial 4} = -2 |E_n|^2 |\rho| \sin \pi\delta/2 \sin(\varphi + \pi\delta/4). \end{aligned}$$

Откуда

$$U_x |U_y = \sin(\varphi + \pi\delta/4) | \sin(\varphi - \pi\delta/4); \quad U_x/U_y (\sin\varphi \cos\pi\delta/4 - \cos\varphi \sin\pi\delta/4) = \sin\varphi \cos\pi\delta/4 + \cos\varphi \sin\pi\delta/4.$$

Путем несложных преобразований получаем выражение

$$\varphi = \arctg [(-U_x - U_y)/(U_y - U_x) \operatorname{tg}\pi\delta/4]. \quad (4)$$

Возводя в квадрат U_x и U_y и складывая, записываем

$$\begin{aligned} U_x^2 + U_y^2 &= 4 |\rho|^2 \sin^2 \pi\delta/2 \sin^2(\varphi + \pi\delta/4) + 4 |\rho|^2 \sin^2 \pi\delta/2 \sin^2(\varphi - \pi\delta/4) = \\ &= 2 |\rho|^2 \sin^2 \pi\delta/2 [2 \sin^2 \varphi \cos^2 \pi\delta/4 + 2 \cos^2 \varphi \sin^2 \pi\delta/4] = \\ &= 2 |\rho|^2 \sin^2 \pi\delta/2 [\cos 2\varphi (-\cos^2 \pi\delta/4 + \sin^2 \pi\delta/4) + \\ &\quad + (\cos^2 \pi\delta/4 - \sin^2 \pi\delta/4)]. \end{aligned}$$

Отсюда

$$|\rho| = \sqrt{(U_x^2 + U_y^2)/4 \sin^2 \pi\delta/2 [\cos 2\varphi (\sin^2 \pi\delta/4 - \cos^2 \pi\delta/4) + (\cos^2 \pi\delta/4 - \sin^2 \pi\delta/4)]}. \quad (5)$$

Если расстройка отсутствует, т.е. $\delta = 1$, то выражения (4), (5) упрощаются. Например,

$$\varphi = \arctg [(-U_x - U_y)/(U_y - U_x)]. \quad (6)$$

Анализируя установленные формулы, можно прийти к некоторым общим выводам относительно методики измерений фазы, наметить пути повышения точности и достоверности таких измерений.

Прежде всего отметим, что правая часть формулы (6) представляет собой арктангенс в смысле главного значения, функции \arctg , обратной функции tg . Значения функции \arctg лежат в интервале от $-\pi/2$

до $\pi/2$. При короткозамыкающей (КЗ) нагрузке фаза $\varphi = \pi$, так как при отражении от металла происходит скачок фазы на π . Формула же (6) дает при КЗ нагрузке $\varphi = 0$. Поэтому в выражение (6) нужно добавить член, равный π , т. е. рассматривать не главное значение arctg , а седнюю с ним ветвь

$$\varphi = \text{arctg} [(-U_x - U_y)/(U_y - U_x)] + \pi. \quad (7)$$

Важным моментом является также относительное расположение зондов и поля стоячей волны при К.З. нагрузке. В случае симметричного расположения зондов относительно максимума стоячей волны, вычисляемая по формуле (7) фаза $\varphi = \pi$. При несимметричном же их расположении к истинному значению фазы $\varphi_{\text{ист}}$ добавляется некоторая величина $\varphi_{\text{доб}}$ (добавочная), которую необходимо в этом случае постоянно учитывать, т.е. $\varphi_{\text{ист}} = \varphi_{\text{изм}} - \varphi_{\text{доб}}$, где $\varphi_{\text{изм}}$ — измеряемое и вычисляемое значение фазы. Таким образом, необходима начальная калибровка измерителя при КЗ нагрузке, для определения $\varphi_{\text{доб}}$.

Перейдем к обобщению описанного метода для случая произвольного числа зондов $n \geq 2$. Для этого рассмотрим сначала шестизондовую систему и запишем поля в точках размещения зондов, аналогично тому, как это сделано в (1). Поле в точках размещения зондов есть суперпозиция полей падающей и отраженной волны. С учетом различия набега фазы и дополнительного сдвига фазы отраженной волны, вызванного скачком фазы на нагрузке (отсчет фазы производится от плоскости симметрии анализатора), получим систему уравнений, описывающую поля в точках размещения зондов:

$$\begin{aligned} E_1 &= |E_n| \cos(\omega t - 5\pi/8) + |E_0| \cos(\omega t + 5\pi/8 + \varphi); \\ E_2 &= |E_n| \cos(\omega t - 3\pi/8) + |E_0| \cos(\omega t + 3\pi/8 + \varphi); \\ E_3 &= |E_n| \cos(\omega t - \pi/8) + |E_0| \cos(\omega t + \pi/8 + \varphi); \\ E_4 &= |E_n| \cos(\omega t + \pi/8) + |E_0| \cos(\omega t - \pi/8 + \varphi); \\ E_5 &= |E_n| \cos(\omega t + 3\pi/8) + |E_0| \cos(\omega t - 3\pi/8 + \varphi); \\ E_6 &= |E_n| \cos(\omega t + 5\pi/8) + |E_0| \cos(\omega t - 5\pi/8 + \varphi). \end{aligned} \quad (8)$$

Данная система записана для случая $\lambda = \lambda_{\text{ср}}$, т. е. для некоторой фиксированной длины волны $\lambda_{\text{ср}}$; относительно которой определены расстояния между зондами, равные $\lambda_{\text{ср}}/8$, или в угловых единицах $2\pi/8$. Для других длин волн $\lambda \neq \lambda_{\text{ср}}$ набег фазы в точках размещения зондов превысит набег фазы, присутствующий в формулах (8), во столько раз, во сколько раз $\lambda_{\text{ср}}$ будет больше λ .

С учетом этого формулы (8) можно переписать для общего случая $\lambda \neq \lambda_{\text{ср}}$ в виде

$$\begin{aligned} E_1 &= |E_n| \cos(\omega t - 5\pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t + 5\pi\delta/8 + \varphi); \\ E_2 &= |E_n| \cos(\omega t - 3\pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t + 3\pi\delta/8 + \varphi); \\ E_3 &= |E_n| \cos(\omega t - \pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t + \pi\delta/8 + \varphi); \\ E_4 &= |E_n| \cos(\omega t + \pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t - \pi\delta/8 + \varphi); \\ E_5 &= |E_n| \cos(\omega t + 3\pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t - 3\pi\delta/8 + \varphi); \\ E_6 &= |E_n| \cos(\omega t + 5\pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t - 5\pi\delta/8 + \varphi). \end{aligned} \quad (9)$$

Сравнивая (1) и (9) и используя метод математической индукции, записываем систему уравнений для произвольного числа детекторов n :

$$E_k = |E_n| \cos(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) + |E_0| \cos(\omega t + (n - 2k + 1)\pi\delta/8), \quad (10)$$

где n — общее число детекторов; k — номер детектора, $k = 1, 2, \dots, n$.

Приводим систему уравнений, описывающих напряжения на нагрузках детекторов, подставив (10) в (2):

$$\begin{aligned} U_{\partial k} = aE_k^2 = a [& |E_n| \cos(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) + \\ & + |E_0| \cos(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8 + \varphi)]^2 = a |E_n|^2 [\cos(\omega t - \\ & - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) + |\rho| \cos(\omega t + (n - 2k + \\ & + 1)\pi\delta/8 + \varphi)]^2 = a |E_n|^2 [\cos^2(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) + \\ & + 2|\rho| \cos(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) \cos(\omega t + (n - \\ & - 2k + 1)\pi\delta/8 + \varphi) + |\rho|^2 \cos^2(\omega t + (n - 2k + 1)\pi\delta/8 + \varphi)]. \end{aligned}$$

Выражение в квадратных скобках содержит три слагаемых. Первое слагаемое можно представить как

$$\begin{aligned} \cos^2(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) = \cos^2 \omega t \cos^2((n - 2k + \\ + 1)\pi\delta/8) + 2\cos \omega t \cos((n - 2k + 1)\pi\delta/8) \sin \omega t \sin((n - \\ - 2k + 1)\pi\delta/8) + \sin^2 \omega t \sin^2((n - 2k + 1)\pi\delta/8). \end{aligned}$$

Путем несложных преобразований, выделяя постоянную (не зависящую от частоты) составляющую, получаем

$$\cos^2(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) = 1/2. \quad (11)$$

Второе слагаемое

$$\begin{aligned} 2|\rho| \cos(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) \cos(\omega t + (n - 2k + 1)\pi\delta/8 + \varphi) = \\ = 2|\rho| \cos(-(n - 2k + 1)\pi\delta/4 - \varphi) + \cos(2\omega t + \varphi)]. \end{aligned} \quad (12)$$

Выделяя в (12) постоянную составляющую, имеем

$$\begin{aligned} 2|\rho| \cos(\omega t - (n - 2k + 1)\pi\delta/8) \cos(\omega t + (n - 2k + 1)\pi\delta/8 + \varphi) = \\ = 2|\rho| \cos(-(n - 2k + 1)\pi\delta/4 - \varphi)/2 = \\ = |\rho| \cos((n - 2k + 1)\pi\delta/4 + \varphi). \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогично для третьего слагаемого находим постоянную составляющую

$$|\rho|^2 \cos^2(\omega t + (n - 2k + 1)\pi\delta/8 + \varphi) = |\rho|^2/2. \quad (14)$$

Складывая (12), (13), (14), получаем систему, описывающую напряжения на нагрузках детекторов:

$$U_{\partial k} = a |E_n|^2/2 [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos((n - 2k + 1)\pi\delta/4 + \varphi)], \\ k = 1, 2, \dots, n.$$

Предположим, что ошибки в измерении напряжения $U_{\partial k}$ на детекторах являются гауссовыми, с нулевым средним и дисперсиями

σ_k^2 , $k = 1, \dots, n$. Тогда оценка $\hat{\theta}$ максимального правдоподобия неизвестных параметров $\hat{\theta} = \begin{pmatrix} \rho \\ \varphi \end{pmatrix}$ будет определяться как

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} \|\Sigma^{-1}(F(\theta) - y)\|^2, \quad (15)$$

где $\|\cdot\|$ — евклидова норма вектора, $\Sigma = \operatorname{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$;

$$F(\theta) = \begin{pmatrix} f_1(\theta) \\ \vdots \\ f_n(\theta) \end{pmatrix}; \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix};$$

$$f_k(\theta) = a |E_n|^2 / 2 [1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos((n - 2k + 1)\pi/4 + \varphi)],$$

$$y_k = U_{\partial_k}, \quad k = 1, \dots, n.$$

Численное определение оценки осуществляется итерационным методом псевдообратных операторов [3]

$$\theta^{l+1} = \theta^l - (\Sigma^{-1}F_{\theta}(\theta^l))^+ (\Sigma^{-1}(F_{\theta}(\theta^l) - y)),$$

где $A^+ = (A^*A)^{-1}A^*$ — псевдообратная матрица; A^* — транспонированная матрица, $\Sigma = \operatorname{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, $j = 1, 2, \dots, n$.

В соответствии со статистической корреляционно-информационной теорией радиосистем [4] дисперсионная матрица оценки θ есть

$$D(\hat{\theta}) = [F_{\hat{\theta}}^*(\theta_n) \Sigma^{-2} F_{\theta}(\theta_n)]^{-1} = [\Sigma_{k=1}^n \sigma_k^{-2} f_{\hat{\theta}}^*(\theta_n) f_{\theta}(\theta_n)]^{-1}, \quad (16)$$

(θ_n — истинные значения искомых параметров).

Из (16) следует, что дисперсия оценки фазы имеет вид

$$D(\hat{\varphi}) = [\Sigma_{k=1}^n \sigma_k^{-2} f_{\varphi}^*(\theta_n) f_{\varphi}(\theta_n)]^{-1}. \quad (17)$$

Отсюда для четырехзондового метода, например, получаем

$$D(\hat{\varphi}) = \sigma^{-2} a |E_n|^2 / 2 (F^*F)^{-1} = \sigma^{-2} a |E_n|^2 / 16. \quad (18)$$

Здесь

$$F = \begin{pmatrix} -2 \sin(3\pi/4 + \varphi); \\ -2 \sin(\pi/4 + \varphi); \\ 2 \sin(\pi/4 - \varphi); \\ 2 \sin(3\pi/4 - \varphi). \end{pmatrix}.$$

Из (18) видно, что при равноточных измерениях напряжений на нагрузках детекторов погрешность измерения фазы при гауссовых помехах не зависит от значения фазы.

Аналогично устанавливается дисперсия оценки фазы в соответствии с (15) при равноточных измерениях напряжений на нагрузках детекторов в общем случае n детекторов. Эта дисперсия имеет вид

$$D(\hat{\varphi}) = \sigma^{-2} a |E_n|^2 / 4n$$

и также является инвариантной относительно самого значения фазы.

На рис. 2 показаны значения дисперсии $D(\varphi)$ оценки φ (зависимость от различных истинных значений фазы φ и для различных значений количества зондов n). Прямая $\eta_1(\varphi)$ соответствует $n = 2$; $\eta_2(\varphi) - n = 4$; $\eta_3(\varphi) - n = 6$. При этом взято $\sigma^{-2}a|E_n|^2/2 = 1$. Для неравноточных измерений, когда $a|E_n|^2/2 = 1$; $\sigma_1^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = 1$; $\sigma_2^2 = 0,5$, дисперсия $D(\varphi)$, как это следует из общей формулы (17), принимает вид соответствующий кривой $\eta_4(\varphi)$.

В таблице приведены результаты различных значений, полученные четырехзондовым методом и при помощи измерительной линии при различных нагрузках. Измерения проводились на частоте 9,6 ГГц. Из таблицы видно, что отклонения значений фаз вполне допустимое. Преимуществом четырехзондового метода является то, что измерения велись в автоматическом режиме.

Номер измерения	Фаза, измеренная четырех зондовым анализатором	Фаза, измеренная измерительной линией	Отклонение значений фаз
1	0,75	0,66	0,09
2	0,825	0,77	0,055
3	0,809	0,79	0,019
4	0,994	0,962	0,032
5	0,734	0,802	-0,068

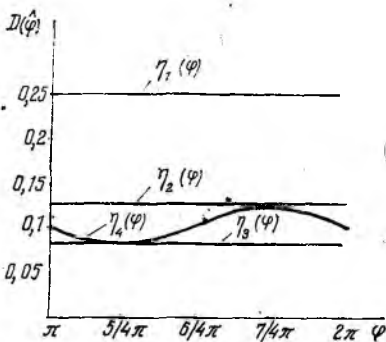


Рис. 2

Список литературы: 1. Бондаренко И. К., Дейнега Г. А., Маграчев З. В. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов. М., 1969. 372 с. 2. Валитов Р. А. Радиотехнические измерения. М., 1963. 632 с. 3. Мелешко В. И. Итерационные методы возмущенных псевдообратных операторов для вычисления обобщенных решений желинейных уравнений // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1980. № 3. С. 573—585. 4. Фалькович С. Е., Хомяков Э. Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. М., 1981. 287 с.

Поступила в редколлегию 29.07.88

УДК 621.382.2

В. П. ТИМОФЕЕВ, канд. физ.-мат. наук, С. С. ХВОСТОВ,
Е. В. КРАВЕЦ, Б. И. ГОНЧАРОВ, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СВЧ-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТРЕХСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Активное применение микропроцессорной техники в измерительных системах различного назначения позволяет реализовать многофункциональные адаптивные устройства, которые обладают высокими метрологическими характеристиками и существенно повышают производительность труда, например, в службах входного и выходного конт-