
А. Б. ЕГОРОВ, И. П. ЗАХАРОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ КАНАЛОВ
МНОГОЗОНДОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

Применение дискретной (многозондовой) измерительной линии позволяет реализовать многофункциональные быстродействующие средства измерения энергетических параметров сигнала и параметров нагрузки линии передачи СВЧ [1—3]. Указанные параметры определяются из уравнений косвенных измерений как функции дискретных значений пространственного распределения квадрата амплитуды напряженности электрического поля E^2 . При этом погрешности результатов измерений могут увеличиваться почти на порядок по сравнению с погрешностью определения E^2 [3]. Следовательно, важнейшая задача метрологического обеспечения многозондовых средств измерений — точное определение коэффициентов передачи их измерительных каналов.

Предположим, что зонды дискретной измерительной линии представляют собой емкостные ненаправленные точечные элементы связи, в линии передачи распространяются монохроматические колебания СВЧ основного типа, а выходные напряжения детекторных преобразователей пропорциональны E^2 .

Напряжение на выходе i -го измерительного канала U_i после установления переходных процессов в линии передачи описывается выражением

$$U_i = K_i E_{\text{ПАД}}^2 \frac{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos(\varphi_H + 2\beta l - 2\beta x_i)}{1 + \Gamma_H^2 \Gamma_{\Gamma}^2 - 2\Gamma_H \Gamma_{\Gamma} \cos(2\beta l + \varphi_H + \varphi_{\Gamma})}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ПАД}}$ — амплитуда электрической составляющей падающей волны; K_i — коэффициент преобразования i -го канала; Γ_H , φ_H , Γ_{Γ} , φ_{Γ} — модуль и фаза коэффициентов отражения нагрузки и генератора; x_i , l — расстояния между генератором и i -м зондом и длина линии передачи; $\beta = 2\pi/\lambda$; λ — длина волны в линии передачи.

Принимая за базовый j -й канал измерения, можно вычислить относительные коэффициенты передачи остальных i -х каналов как $K_{ij} = K_i/K_j$. Коэффициенты K_{ij} определяются точнее, чем K_i , поскольку их нахождение сводится к измерению напряжений и не требует измерения мощности в линии передачи. Зная относительные коэффициенты, можно измерить Γ_H , φ_H , λ . Для нахождения энергетических параметров СВЧ-сигнала потребуется произвести дополнительную калибровку всего средства измерения.

Рассмотрим методы определения относительных коэффициентов передачи каналов многозондовых средств измерений и проведем оценивание их погрешностей. При исследовании погрешностей не будем рассматривать составляющую инструментальной погрешности, обусловленную неточностью измерения напряжений.

Метод согласованной нагрузки. Самым простым методом определения K_{ij} представляется метод согласованной нагрузки. При этом в линии передачи устанавливается бегущая волна ($\Gamma_H = 0$), и K_{ij} определяется как отношение напряжений на выходах i -го и j -го каналов $K_{ij} = U_i/U_j$ (2). Погрешность определения K_{ij} , кроме инструментальной составляющей, содержит методическую составляющую, обусловленную рассогласованием реальной нагрузки ($\Gamma_H \neq 0$). Оценку относительного коэффициента передачи i -го канала $\overline{K}_{ij}$ можно записать из выражений (1), (2) как

$$\overline{K}_{ij} = K_{ij} \frac{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_i}{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_j}, \quad (3)$$

где $\alpha_{i(j)} = \varphi_H + 2\beta l + 2\beta x_{i(j)}$. В этом случае относительная погрешность определения K_{ij} , обусловленная рассогласованием нагрузки

$$\delta_1 = \frac{\overline{K}_{ij}}{K_{ij}} - 1 = 4\Gamma_H \frac{\sin \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2} \sin \frac{\alpha_i - \alpha_j}{2}}{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_j}, \quad (4)$$

имеет максимальное значение $\delta_{1M} = 4\Gamma_H/(1 - \Gamma_H)^2$ (5), увеличивающееся с ростом Γ_H . Для малых Γ_H , выражая (5) через коэффициент стоячей волны $K_{\text{СТУ}}$, получаем $\delta_{1M} \approx 2(K_{\text{СТУ}} - 1)$ (6).

Из этого выражения следует, что для образцовой нагрузки с $K_{\text{СТУ}} = 1,05$ максимальное значение погрешности δ_1 составит 10 %.

Метод максимума. Развитием метода согласованной нагрузки является метод максимума. Для реализации данного метода используется нагрузка с переменной фазой коэффициента отражения. Изменяя φ_H , можно поочередно установить максимальное значение напряжения U_{iM} на выходе каждого канала, а затем определить относительный коэффициент передачи i -го канала как $K_{ij} = U_{iM}/U_{jM}$ (7). Выражение для U_{iM} легко получить из уравнения (1)

$$U_{iM} = K_i E_{\text{пад}} \frac{1 + \Gamma_H^2}{1 + \Gamma_H^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_H \Gamma \cos(2\beta x_i + \varphi_\Gamma)} \quad (8)$$

при условии

$$\varphi_H = -2\beta l + 2\beta x_i + 2\pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Отсюда видно, что U_{iM} зависит от x_i и, следовательно, будет различным для разных i .

Подставляя (8) в (7), получаем оценку относительного коэффициента передачи i -го канала

$$\overline{K}_{ij} = K_{ij} \frac{1 + \Gamma_H^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_H \Gamma \cos \gamma_i}{1 + \Gamma_H^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_H \Gamma \cos \gamma_j}, \quad (9)$$

где $\gamma_{i(j)} = 2\beta x_{i(j)} + \varphi_\Gamma$. Тогда относительная методическая погрешность определения K_{ij} , обусловленная рассогласованием генератора и нагрузки примет вид

$$\delta_2 = \frac{\overline{K}_{ii}}{K_{ii}} - 1 = \frac{4\Gamma_H \Gamma \sin \frac{\gamma_j + \gamma_i}{2} \sin \frac{\gamma_j - \gamma_i}{2}}{1 + \Gamma_H^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_H \Gamma \cos \gamma_i}. \quad (10)$$

Полученное выражение для δ_2 полностью соответствует соотношению (4) для δ_1 при замене $\Gamma_H \Gamma$ на Γ_H . Максимальное значение δ_2 :

$$\delta_{2M} = 4\Gamma_H \Gamma / (1 - \Gamma_H \Gamma)^2. \quad (11)$$

Метод максимума более трудоемок в реализации, но может обеспечить погрешность, меньшую в $1/\Gamma_\Gamma$ раз, по сравнению с методом согласованной нагрузки. Значение Γ_Γ ограничивается техническими требованиями на генератор, однако эти ограничения обычно не менее 0,2. Это может привести к большим значениям δ_{2M} .

Метод детерминированной нагрузки. Методическую погрешность, имеющую место в методе согласованной нагрузки, можно снизить, применяя метод детерминированной нагрузки [3]. В этом случае, при известных параметрах нагрузки Γ_H , φ_H , а также параметрах l , x_i , x_j , относительный коэффициент передачи i -го канала можно определить из выражений (2), (3) как

$$K_{ij} = \frac{K_i}{K_j} \frac{U_i (1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_i)}{U_j (1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_j)}. \quad (12)$$

Метод обладает инструментальной погрешностью, составляющая которой δ_3 , обусловленная неточностью определения Γ_H , φ_H , опре-

деляется в результате дифференцирования выражений (12) в следующем виде: $\delta_g = |a_g \Delta_g| + |a_\phi \Delta_\phi|$ (13), где Δ_g , Δ_ϕ — абсолютные погрешности определения Γ_H , ϕ_H ;

$$a_g = 4(1 - \Gamma_H^2) \frac{\sin \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2} \sin \frac{\alpha_i - \alpha_j}{2}}{(1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_i)(1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_j)}; \quad (14)$$

$$a_\phi = 4\Gamma_H \frac{\left[(1 + \Gamma_H^2) \cos \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2} + 2\Gamma_H \cos \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2} \right] \sin \frac{\alpha_i - \alpha_j}{2}}{(1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_i)(1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_j)}. \quad (15)$$

Анализ выражения (12) показывает, что устранить составляющую погрешности, обусловленную неточностью определения Γ_H можно, обеспечив условие $\cos \alpha_i = \cos \alpha_j$ (16), что соответствует равенству амплитуд напряженностей поля в точках установки i -го и j -го зондов. В этом случае K_{ij} необходимо определять из выражения (2). Формула (12) описывает оценку относительного коэффициента преобразования K_{ij} , неточность которого обусловлена невыполнением равенства (16). Последнее определяет инструментальную погрешность

$$\delta_4 = \frac{\overline{K_{ij}}}{K_{ij}} - 1 = \frac{2\Gamma_H (\cos \alpha_j - \cos \alpha_i)}{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_i} \approx \frac{2\Gamma_H \sin \alpha_i \Delta \alpha_i}{1 + 2\Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \alpha_i}. \quad (17)$$

Погрешность δ_4 увеличивается с ростом Γ_H , поэтому для ее уменьшения необходимо выбирать Γ_H малым. В этом случае максимальное значение δ_4 составит $\delta_{4M} \approx 2\Gamma_H \Delta \alpha_i$ (18).

Условие (16) наиболее легко реализуется для эквидистантного расположения зондов. Тогда равенство амплитуд напряженностей поля для i -го и j -го зондов достигается, когда вариацией ϕ_H (или l) устанавливается максимум (или минимум) выходного сигнала на $(i + j)/2$ -м зонде.

Например, для четырехзондовой эквидистантной дискретной измерительной линии, последовательно устанавливая максимум (или минимум) выходного сигнала на втором и третьем зондах, определяем коэффициенты $K_{31} = U_3/U_1$, $K_{42} = U_4/U_2$. После этого, увеличивая фазу нагрузки на $\beta \Delta x$, где Δx — расстояние между зондами, т. е. устанавливая максимум амплитуды напряженности электрического поля между вторым и третьим зондами, определяем коэффициент $K_{23} = U_2/U_3$. Тогда, считая базовым первый зонд, находим $K_{21} = K_{31}K_{23}$ и $K_{41} = K_{42}K_{21}$.

Таким образом, рассмотренные методы требуют для своей реализации малые рассогласования нагрузки.

Метод согласованной нагрузки неприменим для точного определения относительных коэффициентов передачи каналов многозондовых средств измерений на СВЧ ввиду его значительной погрешности даже для образцовых нагрузок.

Применение метода максимума позволяет снизить погрешность определения относительных коэффициентов передачи каналов в $1/\Gamma$ раз по сравнению с методом согласованной нагрузки.

При больших значениях Γ_r для эквидистантных дискретных измерительных линий целесообразно применять метод детерминированной нагрузки.

Список литературы: 1. Бондаренко И. К., Дейнега Г. А., Маграчев З. В. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов.— М. : Сов. радио, 1969.— 304с.
2. А. с. 277094 СССР. Измеритель проходящей мощности СВЧ / В. Д. Кукуш, В. М. Волков, И. К. Овчинников // Открытия. Изобретения.— 1972.— № 27.— С. 224—225. 3. Егоров А. Б., Захаров И. П., Белокурский Ю. П. Автоматизированная система для измерения параметров сигнала и нагрузки в рассогласованных линиях передачи // Радиотехника.— 1986.— Вып. 77.— С. 26—35.

Поступила в редколлегию 20.04.87