

互易多端口网络 S 参数测量的统计 回归方法*

梁昌洪 史小卫

(西安电子科技大学, 西安 710071)

摘要 本文研究了在不转换端口条件下, 互易多端口网络 S 参数测量的统计回归方法。主要是逐次回归理论和广义 Kajfez 方法。文中给出了实验数据和处理结果。

关键词 多端口网络; S 参数; 逐次回归理论; 广义 Kajfez 方法

一、引言

近年来, 随着通信、雷达系统复杂性的增加, 微波集成电路、MMIC 等技术的发展使多端口网络的应用越来越广泛。1990年, 文献[1]提出了处理无耗多端口的广义测量方程, 使这一领域问题有所突破。但是, 应该看到一般有耗多端口网络 S 参数的测量尚未形成系统理论, 特别是不转换端口的测量技术。

本文采用的一般互易多端口网络 S 参数的测量模型如图1所示^[2]。除端口1外, 其余 $(n-1)$ 个端口均接有滑动短路器 $\Gamma_i (i=2, 3, \dots, n)$, 并分别处于第 $j (j=1, 2, \dots, n)$ 个位置, 由端口1的反射系数 Γ_{1j} 来反演出网络的全部 S 参数。

文中提出了两种方法: 逐次回归理论与广义 Kajfez 方法, 并较详细地分析了它们的理论和应用实例。

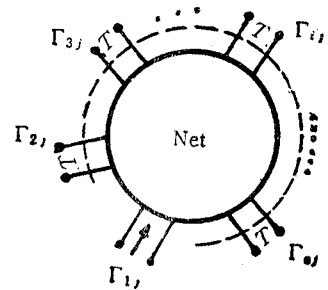


图1 N 端口有耗网络的 S 参数测量

二、双端口网络 S 参数的普遍圆回归理论

在 Deschamps 图解法基础上发展起来的双端口 S 参数测量的圆回归理论是作者 1983 年提出的^[3]。由于理论完整, 方法实用无须引入人为的权因子而得到了广泛应用^[4-7]。但是实际中也发现, 这种数据处理方法还有两点应该改进: S_{22} 相角 θ_{22} 平均值需要采用迭代法求解; 镜像圆心 S_{11} 的回归则限制滑动短路器只能作等距离移动。

针对上述问题, 我们作了进一步的研究。1990年, 文献[8]给出了 S_{22} 相角的简明闭

1991.05.16 收到, 1992.04.13 定稿。

* 机械电子工业部基金资助项目的一部分

式。文献 [4] 利用分式线性变换的保交比性给出了镜象圆心 S_{11} 回归的解析表示式。从而使此方法可以处理任何不等距的测量数据,且计算量极小。这种适应性更强的方法,称之为普遍圆回归理论。

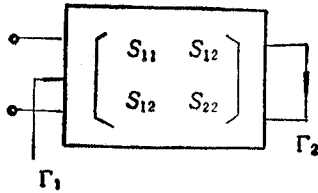


图 2 双端口网络 S 参数的测量圆:

双端口网络是多端口网络 S 参数测量的基础,如图 2 所示。其中,输入反射系数 Γ_1 ,负载反射系数 Γ_2 与网络 S 参数之间存在如下关系:

$$\Gamma_1 = (S_{11} - S_D \Gamma_2) / (1 - S_{22} \Gamma_2) \quad (1)$$

且 $S_D = S_{11} S_{22} - S_{12}^2$, 而滑动短路器 $\Gamma_2 = \exp(j\varphi)$ 。(1) 式是分式线性变换,它将圆 $|\Gamma_2| = 1$ 映为 Γ_1 平面上的

$$\Gamma_1 = \rho_c + \rho \quad (2)$$

式中的圆心 ρ_c 和动态半径 ρ 为

$$\rho_c = S_{11} + S_{12}^2 S_{22}^* / (1 - |S_{22}|^2) \quad (3)$$

$$\rho = S_{12} / (1 - |S_{22}|^2) \cdot [S_{22}^* \exp(-j\varphi) - 1] \exp(j\varphi) / [S_{22} \exp(j\varphi) - 1] \quad (4)$$

而半径值为

$$R = |\rho| = |S_{12}|^2 / (1 - |S_{22}|^2) \quad (5)$$

比较(3)、(4)两式可得

$$\rho_c - S_{11} = R |S_{22}| \exp[j(2\theta_{12} - \theta_{22})] \quad (6)$$

上面已设 $S_{12} = |S_{12}| \exp(j\theta_{12})$ 和 $S_{22} = |S_{22}| \exp(j\theta_{22})$ 。

1. 回归圆方程

假定所测得的 n 个输入反射系数 $\Gamma_{1i} = x_i + jy_i$, 它们应拟合成一个圆。设回归圆心为 $x_c + jy_c$, 回归半径为 R 。以

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n [R^2 - (x_i - x_c)^2 - (y_i - y_c)^2]^2 \quad (7)$$

为目标函数。令 ε 最小值, 可得^[3]

$$x_c = \frac{[D(x_i^3) + D(x_i y_i^2)] D(y_i^2) - [D(x_i^2 y_i) + D(y_i^3)] D(x_i y_i)}{2[D(x_i^2) D(y_i^2) - D(x_i y_i) D(x_i y_i)]} \quad (8)$$

$$y_c = \frac{[D(x_i^2 y_i) + D(y_i^3)] D(x_i^2) - [D(x_i^3) + D(x_i y_i^2)] D(x_i y_i)}{2[D(x_i^2) D(y_i^2) - D(x_i y_i) D(x_i y_i)]} \quad (9)$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]} \quad (10)$$

其中

$$D(x_i^2) = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2, \quad D(y_i^2) = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$$

$$D(x_i y_i) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right),$$

$$D(x_i^3) = \sum_{i=1}^n x_i^3 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)$$

$$D(y_i^2) = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right),$$

$$D(x_i y_i^2) = \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

$$D(x_i^2 y_i) = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)$$

2. 镜像圆心回归^[4]

镜像圆心, 定义为 $\Gamma_2 = 0$ 所对应输入反射系数 Γ_1 平面上的点。十分明显, 此即 S_{11} 。我们知道, 分式线性变换 $W = (az + b)/(cz + d)$ 具有如下的保交比性

$$\frac{(W_1 - W_3)/(W_2 - W_3)}{(W_1 - W_4)/(W_2 - W_4)} = \frac{(z_1 - z_3)/(z_2 - z_3)}{(z_1 - z_4)/(z_2 - z_4)} \quad (11)$$

对我们的问题应用上式, 并考虑 Γ_1 面和 Γ_2 面的四点对应关系

$$(\Gamma_{1i}, \Gamma_{1j}, \Gamma_{1m}, S_{11}) \longleftrightarrow (\Gamma_{2i}, \Gamma_{2j}, \Gamma_{2m}, 0) \quad (12)$$

其中 i, j, m 为任意 3 个测量点。容易得到

$$S_{11}^k = \frac{\Gamma_{1i} - \left(\frac{\Gamma_{2i}}{\Gamma_{2j}} \right) \cdot \frac{(\Gamma_{1i} - \Gamma_{1m})/(\Gamma_{1j} - \Gamma_{1m})}{(\Gamma_{2i} - \Gamma_{2m})/(\Gamma_{2j} - \Gamma_{2m})} \cdot \Gamma_{2i}}{1 - \left(\frac{\Gamma_{2i}}{\Gamma_{2j}} \right) \cdot \frac{(\Gamma_{1i} - \Gamma_{1m})/(\Gamma_{1j} - \Gamma_{1m})}{(\Gamma_{2i} - \Gamma_{2m})/(\Gamma_{2j} - \Gamma_{2m})}} \quad (13)$$

(13)式即任意一组(第 k 组)三个测量值所求得的 S_{11}^k 闭式, 而 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n (j \neq i)$ 和 $m = 1, 2, \dots, n (m \neq i, j)$ 。当进行 n 点测量时, 共有 $K = C_n^3 = n(n-1)(n-2)/6$ 组。故 S_{11} 的平均值为

$$S_{11} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K S_{11}^k \quad (14)$$

3. S_{22} 相角的平均^[8]

由(4)式和(6)式可得

$$|S_{12}| = \sqrt{R(1 - |S_{22}|^2)} \quad (15)$$

$$|S_{22}| = |\rho_c - S_{11}|/R \quad (16)$$

和

$$2\theta_{12} - \theta_{22} = \arg(\rho_c - S_{11}) \quad (17)$$

由(2)~(5)式易得^[7]

$$\theta_{22} = \arg S_{22}^i = -\arg\{[(\Gamma_{1i} - \rho_c)|S_{22}|^2 + (\rho_c - S_{11})\exp(j\varphi_i)]/(\Gamma_{1i} - S_{11})\} \quad (18)$$

于是平均值

$$\theta_{22} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{22}^i \quad (19)$$

上述方程, 不仅解除了滑动短路器的等距离约束, 而且全部以闭式形式出现。因此称之为普遍圆回归理论。

三、多端口网络 S 参数的逐次回归理论

我们来研究互易 N 端口网络, 设其 S 矩阵为 $[S]$. 如果第 j 个端口接负载 $\tilde{\Gamma}_j = a_j/b_j$ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$). 则有^[1]

$$1 - \sum_{i=1}^n S_{ii}\tilde{\Gamma}_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} \Delta_{ij}\tilde{\Gamma}_i\tilde{\Gamma}_j - \dots + (-1)^n S_D\tilde{\Gamma}_1\tilde{\Gamma}_2 \dots \tilde{\Gamma}_n = 0 \quad (20)$$

对于本文具体问题

$$\tilde{\Gamma}_j = \begin{cases} 1/\Gamma_1 = b_1/a_1, & j = 1 \\ \Gamma_j = a_j/b_j, & j \neq 1 \end{cases} \quad (21)$$

在(20)式中 $\Delta_{i_1 i_2 \dots i_k}$ 是 $[S]$ 矩阵中含第 i_1, i_2, \dots, i_k 行及列在内的主子行列式, 而 S_D 为 $[S]$ 的行列式.

先令 $\tilde{\Gamma}_2, \tilde{\Gamma}_3, \dots, \tilde{\Gamma}_{n-1}$ 不变, 而仅改变 $\tilde{\Gamma}_n$ 来测量 $\tilde{\Gamma}_1$. 这就是典型的双端口网络问题, 可以用上节介绍的方法求得. 其中的 S 参数必定是 $\tilde{\Gamma}_2 \sim \tilde{\Gamma}_{n-1}$ 的函数, 可记为 S'_{11}, S'_{22} 和 S'_D . 然而, 进行第二层次, 改变 $\tilde{\Gamma}_{n-1}$, 而 $\tilde{\Gamma}_2 \sim \tilde{\Gamma}_{n-2}$ 不变, 则 S'_{11}, S'_{22} 和 S'_D 从形式上与 $\tilde{\Gamma}_{n-1}$ 又构成第二层双端口网络 \dots , 以此类推, 即构成逐次回归理论.

为了使上述方法具体化, 这里进一步以三端口网络为例加以说明. 这时(20)式简化为

$$\Gamma_1 - S_{11} - S_{22}\Gamma_1\Gamma_2 - S_{33}\Gamma_1\Gamma_3 + \Delta_{12}\Gamma_2 + \Delta_{13}\Gamma_3 + \Delta_{23}\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3 - S_D\Gamma_2\Gamma_3 = 0 \quad (22)$$

由此可导出第一层次双线性变换

$$\Gamma_1 = \frac{\left(\frac{S_{11} - \Delta_{12}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}\right) - \left(\frac{\Delta_{13} - S_D\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}\right)\Gamma_3}{1 - \left(\frac{S_{33} - \Delta_{23}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}\right)\Gamma_3} = \frac{S'_{11} - S'_D\Gamma_3}{1 - S'_{22}\Gamma_3} \quad (23)$$

为 Γ_1 随 Γ_3 的变化, 对此可用普遍圆回归理论求出 S'_{11}, S'_{22} 和 S'_D . 特别注意到(23)式中

$$S'_{11} = \frac{S_{11} - \Delta_{12}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}, \quad S'_{22} = \frac{S_{33} - \Delta_{23}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}, \quad S'_D = \frac{\Delta_{13} - S_D\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2} \quad (24)$$

构成了第二层次的双线性变换. 在形式上, S'_{11}, S'_{22} 和 S'_D 处于输入反射系数的位置. 随 Γ_2 的变化, 又可回归出 $S_{11}, S_{22}, S_{33}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{23}$ 和 S_D . 这就是逐次回归方法.

原则上说, 三端口网络存在另一种逐次回归顺序:

$$\Gamma_1 = \frac{\left(\frac{S_{11} - \Delta_{13}\Gamma_3}{1 - S_{33}\Gamma_3}\right) - \left(\frac{\Delta_{12} - S_D\Gamma_3}{1 - S_{33}\Gamma_3}\right)\Gamma_2}{1 - \left(\frac{S_{22} - \Delta_{23}\Gamma_3}{1 - S_{33}\Gamma_3}\right)\Gamma_2} = \frac{S''_{11} - S''_D\Gamma_2}{1 - S''_{22}\Gamma_2} \quad (25)$$

理论和实践均表明: 应该把 $|S_{ii}|$ 较小的一端作为第一层次回归, 这样会取得较高的回归精度. 例如, 当 $|S_{22}| > |S_{33}|$ 时, 应采用(23)式的逐次回归.

四、广义 Kajfez 方法

多端口网络数据处理的另一种方法是文献 [9] 的推广, 我们称之为广义 Kajfez 方法。

仍以具体三端口方程(22)式为例。容易得出以 $S_{11}, S_{22}, S_{33}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{23}$ 和 S_D 为未知数的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{11}\Gamma_{21} & \Gamma_{11}\Gamma_{31} & -\Gamma_{21} & -\Gamma_{31} & -\Gamma_{11}\Gamma_{21}\Gamma_{31} & \Gamma_{21}\Gamma_{31} \\ 1 & \Gamma_{12}\Gamma_{22} & \Gamma_{12}\Gamma_{32} & -\Gamma_{22} & -\Gamma_{32} & -\Gamma_{12}\Gamma_{22}\Gamma_{32} & \Gamma_{22}\Gamma_{32} \\ 1 & \Gamma_{1n}\Gamma_{2n} & \Gamma_{1n}\Gamma_{3n} & -\Gamma_{2n} & -\Gamma_{3n} & -\Gamma_{1n}\Gamma_{2n}\Gamma_{3n} & \Gamma_{2n}\Gamma_{3n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ \Delta_{12} \\ \Delta_{13} \\ \Delta_{23} \\ S_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} \\ \Gamma_{12} \\ \Gamma_{13} \\ \Gamma_{1n} \end{bmatrix} \quad (26)$$

简记为

$$Ax = b \quad (27)$$

需要注意: 互易三端口网络只有 6 个独立未知量。而(26)式中七个未知量显然有一个是多余的。在有测量误差的条件下, 它将构成某种矛盾, 这也是该方法的一个不足之处。对于(27)式采用加权最小二乘法处理, 可得

$$Cx = q \quad (28)$$

式中 $C = A^+PA$ 为 Hermite 矩阵, $q = A^+Pb$ 为列矩阵。而 $P = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_n)$ ($p_i > 0$) 为权矩阵。经验地, 仍可采用文献[9]的推荐值

$$p_i = 1/(2 + |\Gamma_{1i}|^2) \quad (29)$$

具体地, 矩阵 C 和 q 的矩阵元为 ($C_{ji} = C_{ij}^*$)

$$\begin{aligned} C_{11} = C_{44} = C_{55} = C_{77} &= \sum_{i=1}^n p_i, & C_{22} = C_{33} = C_{66} &= \sum_{i=1}^n p_i |\Gamma_{1i}|^2 \\ C_{12} = C_{56} &= \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i} \Gamma_{2i}, & C_{13} = C_{46} &= \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i} \Gamma_{3i} \\ C_{14} = C_{57} &= -\sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{2i}, & C_{15} = C_{47} &= -\sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{3i} \\ C_{16} = -\sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i} \Gamma_{2i} \Gamma_{3i}, & C_{17} = \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{2i} \Gamma_{3i}, & C_{23} &= \sum_{i=1}^n p_i |\Gamma_{1i}|^2 \Gamma_{2i}^* \Gamma_{3i} \\ C_{24} = C_{35} = C_{67} &= -q_1^* = -\sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i}^*, & C_{25} &= -\sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i}^* \Gamma_{2i}^* \Gamma_{3i} \\ C_{26} = -q_3^* = -\sum_{i=1}^n p_i |\Gamma_{1i}|^2 \Gamma_{3i}, & C_{27} = -q_5^* &= \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i}^* \Gamma_{3i} \end{aligned}$$

$$C_{34} = - \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i}^* \Gamma_{2i} \Gamma_{3i}^*, \quad C_{36} = -q_2^* = - \sum_{i=1}^n p_i |\Gamma_{1i}|^2 \Gamma_{2i}$$

$$C_{37} = -q_4^* = \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i}^* \Gamma_{2i}, \quad C_{45} = \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{2i}^* \Gamma_{3i}$$

$$q_6 = - \sum_{i=1}^n p_i |\Gamma_{1i}|^2 \Gamma_{2i}^* \Gamma_{3i}^*, \quad q_7 = \sum_{i=1}^n p_i \Gamma_{1i} \Gamma_{2i}^* \Gamma_{3i}^*$$

从而可求出

$$x^T = [S_{11}, S_{22}, S_{33}, \Delta_{12}, \Delta_{13}, \Delta_{23}, S_D] \quad (30)$$

五、实验结果

实验中采用加载的 H-T 进行测量。端口 2、3 接滑动短路器，并分别从各自短路点

表 1 端口反射系数测量值

		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Γ_x	0.3050	0.3651	0.5137	0.6292	0.8221	-0.5107	-0.1232	0.1916
	Γ_y	0.8721	0.8923	0.8412	0.7432	0.4295	-0.5071	0.9050	0.9562
2	Γ_x	0.6958	0.7787	0.8856	0.9694	0.6044	-0.9035	-0.0291	0.4705
	Γ_y	0.7077	0.5083	0.2973	-0.0124	-0.6315	-0.0666	0.9660	0.8817
3	Γ_x	0.9021	0.8962	0.8687	0.5964	-0.1296	-0.9470	0.0339	0.6817
	Γ_y	0.2949	-0.0276	-0.3591	-0.7119	-0.8932	0.1333	0.9540	0.7198
4	Γ_x	0.8720	0.6457	0.3704	-0.0978	-0.5743	-0.8925	0.0958	0.8210
	Γ_y	-0.2833	-0.5853	-0.7868	-0.9622	-0.6355	0.2487	0.9140	0.4110
5	Γ_x	0.3727	-0.0923	-0.3952	-0.6481	-0.9306	-0.8699	0.1972	0.8490
	Γ_y	-0.7892	-0.8928	-0.8740	-0.6808	-0.3205	0.3657	0.9083	-0.2603
6	Γ_x	-0.6908	-0.8667	-0.9589	-0.8438	-0.9214	-0.8035	0.4142	-0.2332
	Γ_y	-0.5600	-0.3286	-0.1997	-0.0655	0.1184	0.5026	0.6724	-0.8483
7	Γ_x	-0.8225	-0.8074	-0.7359	-0.7273	-0.7390	-0.6347	-0.7226	-0.7093
	Γ_y	0.5175	0.4991	0.5575	0.5771	0.6243	0.7247	0.0663	0.4738
8	Γ_x	-0.1797	-0.1749	-0.1607	-0.1321	-0.1091	0.0838	-0.2934	-0.2032
	Γ_y	0.9294	0.9251	0.9459	0.9255	0.9135	0.8760	0.8769	0.9228

表 2 三端口有耗网络的数据处理

	逐次回归理论	广义 Kajfez 方法
S_{11}	0.2226exp(j102.0)	0.2315exp(j103.2)
S_{22}	0.2143exp(j94.0)	0.2175exp(j95.8)
S_{33}	0.5692exp(j65.3)	0.5639exp(j65.1)
S_{12}	0.7583exp(-j57.9) exp(j122.1)	0.7583exp(-j57.9) exp(j122.1)
S_{13}	0.5455exp(-j79.5) exp(j100.5)	0.5571exp(-j79.4) exp(j100.6)
S_{23}	0.5523exp(-j84.5) exp(j95.5)	0.5551exp(-j84.1) exp(j95.9)

开始,以 $1/16$ 波长为间隔进行移动,而在端口 1 测量输入反射系数。所测得的 64 个数据如表 1 所示。采用逐次回归理论和广义 Kajfez 方法处理的结果如表 2 所示。从表 2 可以看出:两种方法均十分有效;如果测量误差减小,则会使结果更加改善。大量计算机模拟已证实了这一结论。

六、结 语

本文研究的多端口互易网络 S 参数测量的统计回归方法已经在实际有耗三端口元件测量中得到了应用和证实。很易看出,这种方法对于 $n > 4$ 端口网络也是适合的。而且,在原则上说负载并不限于滑动短路器。

但是,应该指出:当网络本身损耗极高,或 $|S_{ii}| \approx 1$ 的特殊情况,方法的灵敏度会显著降低而误差也随之升高,庆幸的是,在一般实用条件下很少遇到上述情况,关于方法灵敏度的深入研究将是进一步的课题。

参 考 文 献

- [1] 邱长兴,梁昌洪,韩毅,电子科学学刊,12(1990)4,352—360.
- [2] S.Stein, *Proc. IRE.* 42(1965)3, 599.
- [3] 梁昌洪,西北电讯工程学院学报,10(1983)3,18—30.
- [4] 夏克金,赵朝生,杨弃疾,电子测量与仪器学报,3(1989)4,34—43.
- [5] 吴宏雄,邱嘉凡,梁伟雄,微波学报,1986年,第3期,第1—15页.
- [6] 寇廷耀,陈庆萍,杨弃疾,微波学报,1986年,第3期,第34—43页.
- [7] 梁昌洪,计算微波,西北电讯工程学院出版社,西安,(1985),§6.5.
- [8] 梁昌洪,李润旗,雷振亚,电子学报,13(1985)3,1—8.
- [9] D. Kajfez, *IEEE Trans, on IM*, IM-24(1975)1, 4—11.

STATISTICAL REGRESSION METHODS FOR S -PARAMETER MEASUREMENTS OF RECIPROCAL MULTI-PORT NETWORKS

Liang Changhong Shi Xiaowei

(*Xidian University, Xi'an 710071*)

Abstract Two kinds of statistical regression methods are presented for S -parameter measurements, without changing ports of reciprocal multi-port networks. The methods are named progressively regression theory and generalized Kajfez method. Measurement data done with a H-plane Tee and processed results are also presented.

Key words Multi-port network; S -parameter; Progressively regression methods; Generalized Kajfez method