

# 互易无耗二端口网络 $S$ 参数测量 的一点注记

吴 宏 雄

(中山大学无线电电子学系, 广州 510275)

**摘要** 本文指出互易有耗二端口网络  $S$  参数的测量方法和数据处理方法完全可用于互易无耗二端口网络中, 使这两种网络的  $S$  参数测量统一起来。文中给出若干计算和测量实例。

**关键词** 微波网络;  $S$  参数; 数据处理方法

## 1. 引言

微波系统中很多最基本、最常用的元件都属于互易二端口网络。因而, 对表征其特性的  $S$  参数的测量一直受到重视, 提出了多种数据处理方法<sup>[1-4]</sup>。另一方面, 既然无耗网络是有耗网络的特例, 那么通常处理有耗网络的 Deschamps 图解法<sup>[5]</sup>和各种数值法<sup>[6-8]</sup>是否可用于无耗网络呢? 现有文献对此很少论及; 在用 Deschamps 等法求  $S$  参数时, 也都毫无例外地举有耗网络的计算例, 加之在具体测量时, 记录这两种网络各自的驻波最小点数据的做法稍微有异(当然, 其本质是一样的), 以致给人造成这样的印象: 处理有耗网络的各种方法似乎不能用于无耗网络; 或者说用之精度极差, 结果不佳<sup>[2]</sup>。

本文在回顾互易有耗二端口网络  $S$  参数测量的基础上, 用实例表明, 可以将有耗网络的处理方法用于无耗网络中, 使它们的  $S$  参数测量完全统一起来。文中对若干无耗网络数据分别按有耗和无耗网络处理法进行计算, 结果非常一致。

## 2. $S$ 参数测量的回顾及其在无耗网络中的应用

现按文献[8]的方法概要地回顾一下有耗二端口网络的  $S$  参数测量。

根据网络理论, 任意互易二端口网络的输出端 2 接反射系数为  $\Gamma_2$  的短路活塞时, 其输入端 1 的反射系数  $\Gamma_1$  为<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned}\Gamma_1 &= S_{11} + S_{12}\Gamma_2/(1 - S_{22}\Gamma_2) \\ &= S_{11} + S_{12}^*S_{22}^*/(1 - |S_{22}|^2) + |S_{12}|^2\exp[j(2\varphi - \theta_{22} + 2\theta_{12})]/(1 - |S_{22}|^2) \quad (1)\end{aligned}$$

式中

$$\exp(j2\varphi) = \{\exp[j(\varphi + \theta_{22})] - |S_{22}|\} / \{1 - |S_{22}|\exp[j(\varphi + \theta_{22})]\}$$

在此和以后, 文中所用符号的意义与文献[8]相同, 不赘述。

由(1)式可见, 当移动短路活塞, 使  $\Gamma_2$  描出一单位圆(其圆心为  $O(0,0)$ )的同时,  $\Gamma_1$

1991.07.15 收到, 1992.07.09 定稿。

吴宏雄 男, 1935 年生, 副教授, 主要从事微波, 毫米波技术的教学和研究工作。

的测量点  $\Gamma_i(x_i, y_i)$ , ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) 也描出一圆, 如图 1 所示。若设此圆圆心为  $C(x_c, y_c)$ , 半径为  $R$ , 则有

$$\left. \begin{aligned} C(x_c, y_c) = \vec{OC} = S_{11} + S_{12}^2 S_{22}^* / (1 - |S_{22}|^2) \\ R = |S_{12}|^2 / (1 - |S_{22}|^2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中箭头表示复矢量。与此同时, 在  $\Gamma_2$  圆上由短路活塞的移动所决定的直径线  $1'-5'$ ,  $2'-6'$ ,  $\dots$  也将相应地变换为正交于  $\Gamma_1$  圆的  $\odot P_1, \odot P_2, \dots$ 。这些圆都交于点  $O'$  (象心) 和点  $T$  ( $\Gamma_2 = \infty$  时的象), 且有

$$\vec{OO'} = S_{11}, \quad \vec{OT} = S_{11} - S_{12}^2 / S_{22} \quad (3)$$

因上述各圆的圆心都在直线  $\overline{AB}$  上, 从而  $\overline{AB} \perp O'T$ ,  $M$  点为其垂足, 此外, 由图还可看出

$$\left. \begin{aligned} \vec{O'T} = \vec{OT} - \vec{OO'} = -S_{12}^2 S_{22}^* / |S_{22}|^2 \\ \vec{CO} = \vec{OO'} - \vec{OC} = -S_{12}^2 S_{22}^* / (1 - |S_{22}|^2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

即  $CO'T$  也为一直线。这样, 求得  $M(x_M, y_M)$  后, 便可由定比分点公式算出  $O'(x_{O'}, y_{O'})$ :

$$\left. \begin{aligned} x_{O'} = (x_M + \lambda x_c) / (1 + \lambda) \\ y_{O'} = (y_M + \lambda y_c) / (1 + \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $\lambda = \overline{MO'} / (\overline{MC} - \overline{MO'})$ , 而  $\overline{MC} = \sqrt{(x_M - x_c)^2 + (y_M - y_c)^2}$ 。在求得  $C, O'$  和  $R$  后,  $S$  参数的模可表为

$$|S_{11}| = |\vec{OO'}|, \quad |S_{22}| = |\vec{CO'}| / R, \quad |S_{12}| = \sqrt{R(1 - |S_{22}|^2)} \quad (6)$$

而它们的相角分别为

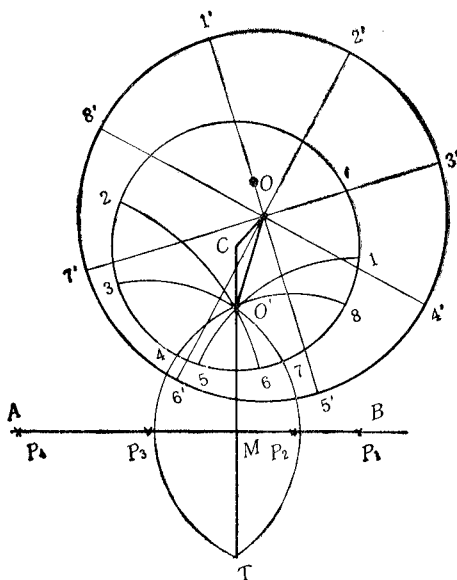


图 1 复平面上被测网络的输入输出反射系数图

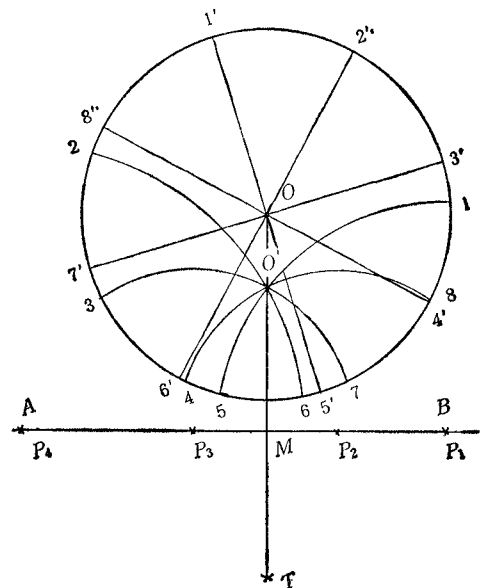


图 2 被测网络无耗, 输入输出反射系数重合在一起

$$\theta_{11} = \arg(\overrightarrow{OO'}) = \arctan(y_{O'}/x_{O'}) \quad (7)$$

$$\theta_{12} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{12i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \left( 2 \arctan \frac{y_i - y_{O'}}{x_i - x_{O'}} - \arctan \frac{y_i - y_C}{x_i - x_C} - \phi_i \right) \quad (8)$$

$$\theta_{22} = 2\theta_{12} - \arctan[(y_C - y_{O'})/(x_C - x_{O'})] \quad (9)$$

至此,我们提出,上述有耗网络  $S$  参数的求解方法也可推广到无耗网络中.这是因为:

(1) 从本质上看,“无耗”网络实际上也是有耗的,只是其损耗甚小而已.因此,只要测量仪器的灵敏度高到足以测出接近于 1 的反射系数,就可将“无耗”网络当作有耗网络来处理.

(2) 如果被测网络确实无耗,则由无耗网络的么正性条件  $[S]^*[S] = [1]$ , 可得

$$\left. \begin{aligned} S_{11} + S_{12}S_{22}^*/(1 - |S_{22}|^2) &= 0, & |S_{12}|^2 &= 1 - |S_{22}|^2 \\ |S_{11}| &= |S_{22}|, & 2\theta_{12} &= \theta_{11} + \theta_{22} - \pi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

据此,(2)式就变成

$$\overrightarrow{OC} = 0, \quad R = 1 \quad (11)$$

从图解上看,就是  $C$  点和  $O$  点,  $\Gamma_1$  圆和  $\Gamma_2$  圆都各自合二为一,同时  $O, O'$  和  $T$  三点共线,如图 2 所示.但是整个求解过程和各参数的计算公式都不受任何影响.也就是说,只要在有耗网络处理法中计及无耗条件,就可用它来求解无耗网络参数.但是,若在(1)式中一开始就直接代入无耗条件,则可得

$$\Gamma_1 = \exp[j(2\varphi + \theta_{11} - \pi)] \quad (12)$$

从而,可推导出仅用于计算无耗二端口网络参数的正切关系式<sup>[3]</sup>

$$\sin \beta_1(D - D_0) \cos \beta_2(S_0 - S) - \rho \cos \beta_1(D - D_0) \sin \beta_2(S_0 - S) = 0 \quad (13)$$

### 3. 计算实例

计算时要注意的,由于文献中现有的无耗网络数据一般不存在两两相距为  $\lambda_g/4$  的点对,因此不能用文献[5,7,8]中的方法求被测的无耗网络参数.因为这些方法都是根据 Deschamps 的图解法原理而提出的,都要求数据中应包含相距为  $\lambda_g/4$  的点对;否则,或无法计算,或结果不佳.这表明,文献[5,7,8]等方法的应用是有局限性的.然而,文献[6]则不同,它对测量点无特殊要求,既可是偶数点,也可是奇数点,且点间距离可任意选择.因此,它可用于计算任意测量情况下的  $S$  参数.曾经有人指出,文献[6]中权因子的人为性削弱了它的适用范围.但是,计算表明,加权与否对结果影响甚微.尤其是对于无耗网络,则完全没有影响.因为这时权因子为一常数.在有耗网络的计算中,如属必要,也可令权因子为 1,以便排除它的影响.

表 1 给出的是,选自文献[9,10]的无耗二端口网络数据分别按有耗网络法<sup>[6]</sup>和无耗网络法<sup>[2,3]</sup>的计算结果,并都按文献[2]的(7)式计算残差.由比较可见,各法所得的结果满意地一致.这表明,有耗网络的处理方法完全可用于无耗网络.

表 2 给出的是,利用自动测量线<sup>[11]</sup>对三种不同驻波比的无耗二端口网络按通常有耗网络法测得的数据.由于在这些数据中存在着相距为  $\lambda_g/4$  的点对,因此可用 Deschamps 图解法和相应的数值法求出有关参数.此外,为比较起见,还给出按无耗网络处理的结

表 1 几种计算方法所得结果的比较

数据来源	数据组号	参数		$\rho$	$\theta_{11}(\circ)$	$\theta_{22}(\circ)$	$\min F$
		方法	文献				
文献[9]	1	文献[6]		1.8702	143.42	106.83	$2.63 \times 10^{-2}$
		文献[2]		1.8559	143.32	107.24	$2.67 \times 10^{-2}$
		文献[3]		1.8748	143.41	106.81	$2.63 \times 10^{-2}$
	2	文献[6]		1.1220	-53.70	-25.25	$1.82 \times 10^{-4}$
		文献[2]		1.1205	-53.08	-25.99	$1.68 \times 10^{-4}$
		文献[3]		1.1208	-53.01	-26.01	$1.62 \times 10^{-4}$
	3	文献[6]		20.1372	-75.04	-45.02	$4.00 \times 10^{-4}$
		文献[2]		20.0420	-75.03	-45.04	$4.00 \times 10^{-4}$
		文献[3]		20.1414	-75.04	-45.02	$4.00 \times 10^{-4}$
文献[10]	4	文献[6]		1.0515	111.41	72.84	$3.90 \times 10^{-3}$
		文献[2]		1.0511	112.59	71.52	$4.00 \times 10^{-3}$
		文献[3]		1.0515	111.49	72.84	$3.90 \times 10^{-3}$

表 2 几组实验数据 ( $\lambda_{g1} = 43.54 \text{ mm}$ ,  $\lambda_{g2} = 43.51 \text{ mm}$ )

数据组号	参数		序号							
	短路活塞相角( $\circ$ )		1	2	3	4	5	6	7	8
I	$D_{\text{min}} - D_T$ (mm)		21.6240	18.6107	15.2330	12.0066	9.2100	6.8023	4.5760	2.3254
			21.5852	20.2571	19.7470	19.4059	19.0866	18.6522	17.7069	11.1214
			15.1073	12.4870	9.8522	7.0976	4.2554	1.3658	20.3403	17.6510

表 3 表 2 数据用不同方法处理的结果

数据组号	参数		$\rho$	$\theta_{11}(\circ)$	$\theta_{22}(\circ)$	$\min F$
	方法	文献				
I	无耗法	[2]	1.2485	-98.00	-97.66	$6.1 \times 10^{-3}$
		[6]	1.2485	-97.66	-98.00	$6.1 \times 10^{-3}$
	有耗法	[7]	1.2469	-97.87	-97.79	$6.3 \times 10^{-3}$
		[5]	1.24	-98.0	-97.4	$1.49 \times 10^{-4}$
II	无耗法	[2]	8.5782	140.44	140.39	$3.0 \times 10^{-3}$
		[6]	8.5782	140.39	140.44	$3.0 \times 10^{-3}$
	有耗法	[7]	8.6386	140.29	140.86	$8.0 \times 10^{-3}$
		[5]	8.55	140.0	140.8	$1.5 \times 10^{-4}$
III	无耗法	[2]	1.0598	62.55	7.18	$3.4 \times 10^{-3}$
		[6]	1.0598	62.55	7.18	$3.4 \times 10^{-3}$
	有耗法	[7]	1.0599	62.00	7.72	$3.4 \times 10^{-3}$
		[5]	1.06	62.0	8.0	$8.0 \times 10^{-3}$

果,如表 3 所示。由表可见,各法的结果也非常吻合。这表明,有耗网络  $S$  参数的测量方法完全可用于无耗网络。

#### 4. 结论

互易有耗二端口网络  $S$  参数的测量方法和数据处理方法都可以直接用于互易无耗二端口网络,使这两种网络  $S$  参数的测量完全统一起来(当然,无耗网络仍可使用自己特有的处理方法)。这一结论对互易多端口网络  $S$  参数的测量有较大的实用价值<sup>[12]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] A. Weissfloch, *Elektrische Nachrichten Technik u. Elektroakustik*, 61(1943)4, 103—106.
- [2] 梁昌洪,邱长兴,电子科学学刊,10(1988)1,1—7.
- [3] 吴宏雄,徐炜,电子科学学刊,12(1990)5,473—478.
- [4] 吴宏雄,杨文超,微波学报,1990年,第1期,第62—66页.
- [5] G. A. Deschamps, *J. Appl. Phys.*, 24(1953)8, 1046—1050.
- [6] D. Kajfez, *IEEE Trans. on IM*, IM-24 (1975)1, 4—11.
- [7] 梁昌洪,李润旗,雷振亚,电子学报,18(1990)3,1—6.
- [8] 吴宏雄,邱熹凡,梁伟雄,微波,1986年,第3期,第1—15页.
- [9] 周清一,微波测量技术,国防工业出版社,北京,1964年,76—91页.
- [10] 张世箕,测量误差及数据处理,科学出版社,北京,1979年,265—274页.
- [11] 吴宏雄,郑小健,潘楚华,微波学报,1988年,第3期,第1—8页.
- [12] 吴宏雄,电子科学学刊,13(1991)6,561—567.

## A NOTE ON THE $S$ -PARAMETER MEASUREMENTS FOR THE RECIPROCAL LOSSLESS TWO-PORT NETWORK

Wu Hongxiong

(Zhongshan University, Guangzhou 510275)

**Abstract** It is pointed out that methods usually used to measure and process  $S$ -parameters of reciprocal dissipative two-port networks can be used to any reciprocal lossless two-port networks. Therefore, the method of  $S$ -parameter measurement of these two kinds of networks can be unified. Some examples of calculation and experiment are given.

**Key words** Microwave network;  $S$ -parameters; Data processing methods