

# 网络分析仪误差模型及应用

梁 军 刘 旺 孙圣和

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 本文基于信号流图理论,推导出网络分析仪测量双口网络时考虑系统误差影响的  $S$  参数测量方程,并给出通过校准确定各分项误差的方法以及利用计算机自动修正观测值的数学模型。实验表明,本文给出的网络分析仪误差校准方法及观测值的自动修正公式是非常有效的。

**关键词** 网络分析仪 双口网络 系统误差 误差模型

## 一、引言

网络分析仪在微波测量中的应用范围非常广泛,它是进行网络  $S$  参数测量的仪器。网络的  $S$  参数只有在完全匹配的系统中测量时,测量结果才准确。在网络分析仪中,既使用了无源器件(如微波开关、功率分配器、定向耦合器、衰减器等),又使用了有源器件(如接收机、微波信号源)。它们的性能通常并不理想,例如它们的端口阻抗有一定失配,对信号的传输有一定的衰减和相移,定向耦合器的隔离度也不是无限大等。使用数学方法分析网络分析仪及测试装置不理想引起的系统误差,通过实验方法确定其数值,并利用计算机自动修正,对精密测量网络参数和校准网络分析仪有重要科学意义和实用价值。

## 二、双口网络 $S$ 参数测量中的误差模型及误差的确定

### 1. 双口网络的误差模型

网络分析仪测量双口网络  $S$  参数的连接图见图 1。如图所示,测量中存在下列系统误差:(1)由于定向耦合器的不理想,使来自信源的测量信号的一部分在经 DUT 反射之前便泄漏到了耦合口,从而给测量引进了误差,称之为方向性误差。(2)由于  $S$  参数测量系统并不理想匹配,从 DUT 向信源方向看去的等效源反射系数不会完全为零,会有一部分信号在 DUT 和信源之间来回反射,引进测量误差,称之为源失配误差。(3)从被测网络向负载方向(即幅相接收机方向)看去,因负载失配会引进负载失配误差。(4)由于功分器、定向耦合器、接头和测试电缆

等网络分析仪器件的频响特性,会造成测试系统的频响误差,它们分别是反射测量频率响应误差和传输测量频率响应误差。(5)由于在测试装置的端口 1 和端口 2 之间存在泄漏信号,从而给测量引进了误差,称之为泄漏误差。对于正向、反向测量,各分别存在上述 6 项误差,故全部测量共 12 项系统误差。

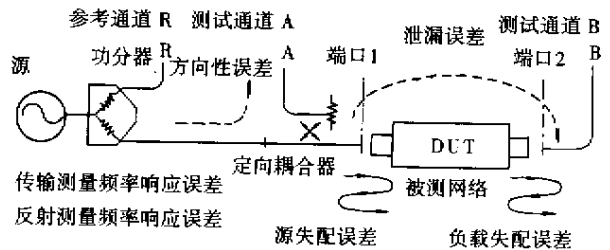


图 1

二端口误差校准是最精确的误差修正,因为它计算了网络分析仪的所有主要系统误差源。图 2 是基于信号流图表示的误差模型<sup>[2]</sup>。

其中,  $E_D$  = 正向方向性误差;  $E_L$  = 正向负载失配误差;  $E_S$  = 正向源失配误差;  $E_{TT}$  = 正向传输测量频率响应误差;  $E_{RT}$  = 正向反射测量频率响应误差;  $E_X$  = 正向泄漏误差,带 \* 号为反向测量时以上各项误差。 $S_{11M}$ 、 $S_{12M}$ 、 $S_{21M}$ 、 $S_{22M}$  分别是  $S$  参数的测量值;  $S_{11A}$ 、 $S_{12A}$ 、 $S_{21A}$ 、 $S_{22A}$  分别是  $S$  参数的实际值。

由信号流图理论可知,图 2 中共有 3 个环路,它们分别是:  $L_1 = (X_3 \rightarrow X_5 \rightarrow X_6 \rightarrow X_4 \rightarrow X_3)$ ;  $L_2 = (X_7 \rightarrow X_9 \rightarrow X_8 \rightarrow X_7)$ ;  $L_3 = (X_3 \rightarrow X_5 \rightarrow X_7 \rightarrow X_9 \rightarrow X_8 \rightarrow X_6 \rightarrow X_4 \rightarrow X_3)$ 。其中,环路  $L_1$  和环路  $L_2$  互相不接触。这 3 个环路对应的增益分别为

$$G_1 = S_{11A} \times E_S \quad (1)$$

$$G_2 = S_{22A} \times E_L \quad (2)$$

$$G_3 = S_{21A} \times S_{12A} \times E_S \times E_L \quad (3)$$

该信号流图的特征行列式为<sup>[3]</sup>

$$\Delta = 1 - G_1 - G_2 - G_3 + G_1 \times G_2 \quad (4)$$

从输入节点  $X_1$  到输出节点  $X_{10}$  前向通路共有 2 条, 分别为  $L_4 = (X_1 \rightarrow X_{10})$ ;  $L_5 = (X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_5 \rightarrow X_7 \rightarrow X_9 \rightarrow X_{10})$ 。这 2 条前向通路的增益分别为

$$G_4 = E_X \quad (5)$$

$$G_5 = 1 \times S_{24A} \times E_{TT} \quad (6)$$

这 2 条前向通路的特征行列式余因子分别为<sup>[3]</sup>

$$\Delta_4 = \Delta \quad (7)$$

$$\Delta_5 = 1 \quad (8)$$

由 Mason 公式可得

$$S_{21M} = 1/\Delta \times \sum_{i=1}^2 G_i \times \Delta_i = E_X + S_{21A} \times E_{TT} / \Delta \quad (9)$$

同理可得,

$$S_{11M} = E_D + \frac{E_{RT} \times [S_{11A} \times (1 - S_{22A} \times E_L) + S_{21A} \times S_{12A} \times E_L]}{\Delta} \quad (10)$$

$$S_{22M} = E_D^* + \frac{E_{RT}^* \times [S_{22A} \times (1 - S_{11A} \times E_L^*) + S_{12A} \times S_{21A} \times E_L^*]}{\Delta^*} \quad (11)$$

$$S_{12M} = E_X^* + \frac{S_{12A} \times E_{TT}^*}{\Delta^*} \quad (12)$$

其中  $\Delta^* = 1 - S_{22A} \times E_S^* - S_{11A} \times E_L^* - S_{12A} \times S_{21A} \times E_S^* \times E_L^* + S_{11A} \times S_{22A} \times E_S^* \times E_L^*$  为反向测量时信号流图的特征行列式。

## 2. 误差的确定

由于正反向各有 6 项误差, 总共有 12 项误差。因此, 需要用 12 个校准件。这样总共测量 12 次, 由式(9)式(10)式(11)和式(12)把 12 项误差确定下来。

先讨论正向校准过程。

(1) 在两个端口分别接上匹配负载, 此时  $S_{11A} = S_{22A} = S_{21A} = S_{12A} = 0$ , 代入式(10), 可测得端口 1 的输入反射系数  $M_1$  为

$$M_1 = E_D \quad (13)$$

(2) 在端口 1 接短路器, 此时  $S_{11A} = -1$ ,  $S_{22A} = S_{21A} = S_{12A} = 0$ , 代入式(10), 可测得端口 1 的输入反射系数  $M_2$  为

$$M_2 = E_D - \frac{E_{RT}}{1 + E_S} \quad (14)$$

(3) 在端口 1 接开路器, 此时  $S_{11A} = +1$ ,  $S_{22A} = S_{21A} = S_{12A} = 0$ , 代入式(10), 可测得端口 1 的输入反射系数  $M_3$  为

$$M_3 = E_D + \frac{E_{RT}}{1 + E_S} \quad (15)$$

(4) 把待测网络移开, 将两个端口断开并分别接上匹配负载, 此时  $S_{11A} = S_{22A} = 0$ ,  $S_{21A} = S_{12A} = 0$ , 代入式(9), 可测得的传输系数  $M_4$  为,

$$M_4 = E_X \quad (16)$$

(5) 把待测网络移开, 将两个端口直接连接形成直通, 设测出的输入反射系数为  $M_5$ , 这时有:  $S_{11A} = S_{22A} = 0$ ,  $S_{21A} = S_{12A} = 1$ , 代入式(2)测有

$$M_5 = E_D + \frac{E_{RT} \times E_L}{1 - E_S \times E_L} \quad (17)$$

(6) 在直通下测传输, 设测出的传输系数为  $M_6$ , 代入式(1)则有

$$M_6 = E_X + \frac{E_{TT}}{1 - E_S \times E_L} \quad (18)$$

联立求解式(13)至式(18), 就可得到正向的 6 项误差如下:

$$E_D = M_1 \quad (19)$$

$$E_S = \frac{2E_D - M_2 - M_3}{M_2 - M_3} \quad (20)$$

$$E_{RT} = (M_3 - E_D) \times (1 - E_S) \quad (21)$$

$$E_X = M_4 \quad (22)$$

$$E_L = \frac{M_5 - E_D}{E_{RT} + E_S \times (M_5 - E_D)} \quad (23)$$

$$E_{TT} = (M_6 - E_X) \times (1 - E_S \times E_L) \quad (24)$$

同理, 可校准并分别求出相应 6 项反向误差:  $E_D^*$ 、 $E_S^*$ 、 $E_{RT}^*$ 、 $E_X^*$ 、 $E_L^*$  和  $E_{TT}^*$ 。

## 3. 误差修正

一旦测量了系统误差项, 由式(9)式(10)式(11)和式(12)可推导出被测器件的实际  $S$  参数,

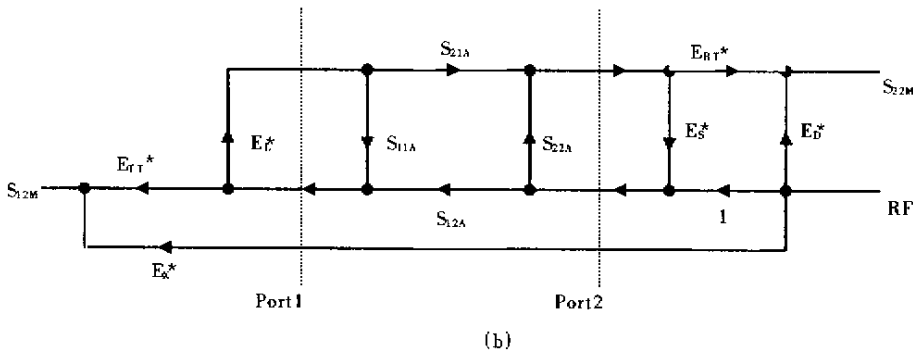
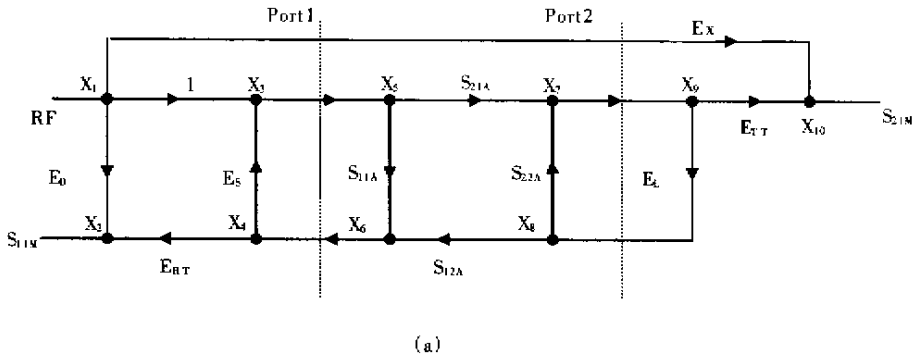


图 2

$$S_{11A} = \frac{\left( \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}} \right) \left( 1 + \frac{S_{22M} - E_{D^*}}{E_{RT^*}} E_S^* \right) - E_L \left( \frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}} \right) \left( \frac{S_{12M} - E_{X^*}}{E_{TT^*}} \right)}{\left( 1 + \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}} E_S \right) \left( 1 + \frac{S_{22M} - E_{D^*}}{E_{RT^*}} E_S^* \right) - E_L^* E_L \left( \frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}} \right) \left( \frac{S_{12M} - E_{X^*}}{E_{TT^*}} \right)} \quad (25)$$

$$S_{21A} = \frac{\left( \frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}} \right) \left( 1 + \frac{S_{22M} - E_{D^*}}{E_{RT^*}} (E_S^* - E_L) \right)}{\left( 1 + \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}} E_S \right) \left( 1 + \frac{S_{22M} - E_{D^*}}{E_{RT^*}} E_S^* \right) - E_L^* E_L \left( \frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}} \right) \left( \frac{S_{12M} - E_{X^*}}{E_{TT^*}} \right)} \quad (26)$$

$$S_{12A} = \frac{\left( \frac{S_{12M} - E_{X^*}}{E_{TT^*}} \right) \left( 1 + \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}} (E_S^* - E_L^*) \right)}{\left( 1 + \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}} E_S \right) \left( 1 + \frac{S_{22M} - E_{D^*}}{E_{RT^*}} E_S^* \right) - E_L^* E_L \left( \frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}} \right) \left( \frac{S_{12M} - E_{X^*}}{E_{TT^*}} \right)} \quad (27)$$

$$S_{22A} = \frac{\left( \frac{S_{22M} - E_{D^*}}{E_{RT^*}} \right) \left( 1 + \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}} E_S \right) - E_L^* \left( \frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}} \right) \left( \frac{S_{12M} - E_{X^*}}{E_{TT^*}} \right)}{\left( 1 + \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}} E_S \right) \left( 1 + \frac{S_{22M} - E_{D^*}}{E_{RT^*}} E_S^* \right) - E_L^* E_L \left( \frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}} \right) \left( \frac{S_{12M} - E_{X^*}}{E_{TT^*}} \right)} \quad (28)$$

### 三、测量实例

实验使用的网络分析仪型号为 HP8720ES, 使用的校准件型号为 HP85052D (3.5mm 50Ω), 电缆型号为 HP85132F。校准方式为双端口校准。测量衰减器在 6GHz ~ 12GHz 之间的输入反射系数。校准前

和校准后的测量结果如图 3 所示。

由图 3 可见, 对于没有误差修正的情况, 其测量结果为典型的波动型, 这是由于系统误差影响测量信号的结果。经误差修正后, 测量曲线很平滑, 且能较好地表示器件的反射特性, 测量的准确度有明显提高。

# 高温金属电导率的测量研究

张明

张玲

(济南奥太科技有限公司, 济南 250061) (山东大学, 济南 250061)

**摘要** 采用电涡流法测量金属电阻率,合理设计传感器结构和标定方法,硬软件结合,消除了温度影响,在熔铝及其合金的凝固过程研究中取得了实用效果。

**关键词** 电导率测量 电阻率标定 熔铝检测 电涡流传感器

## 一、引言

由于高温的影响,接触式测量高温物质的电导率时,各电极接触电阻变化不一致问题难以解决。本文采用电涡流法进行非接触式测量,设法消除温度的影响和进行合理标定,取得了令人满意的效果。

电涡流法检测电导率的原理为当一个扁平线圈置于与金属导体附近且通过正弦交变电流时,线圈周围就产生交变磁场  $H_1$ ,置于此磁场中的金属导体就产生电涡流,而此电涡流也将产生磁场  $H_2$ ,它们方向相反,由于磁场  $H_2$  的反作用使通电线圈的有效阻抗发生变化,这种线圈阻抗的变化完整地而且唯一的反映了待测物体的涡流效应。它与金属导体的电导率  $\delta$ 、磁导率  $\mu$ 、线圈的形状、几何参数  $x$ 、激励电流强度  $I$ 、激励电流频率  $f$  以及线圈与被测物

体的距离  $d$  等参数有关。假定金属导体是匀质的,其性能是线性和各向同性的,则线圈的阻抗可用如下函数表示:

$$Z = F(\mu, \delta, x, d, I, f)$$

对于非铁磁性金属的  $\mu$  恒定不变,若保持  $d$ ,  $I, f$  及  $x$  恒定不变时,阻抗  $Z$  就成为电导率  $\delta$  的单值函数。但对于高温物质的温度影响,一般的传感器结构在测量过程中线圈的几何参数  $x$ 、线圈与被测物体的距离  $d$  等参数都会随温度变化而改变。而这些参数改变引起的测量误差远大于物质固有电导率,必须消除误差方能达到测量要求。

## 二、传感器设计

图 1 为传感器正面图,图 2 为侧面图,进行测量时,将盛放熔铝的坩埚跨在两长条形的耐火砖上,耐

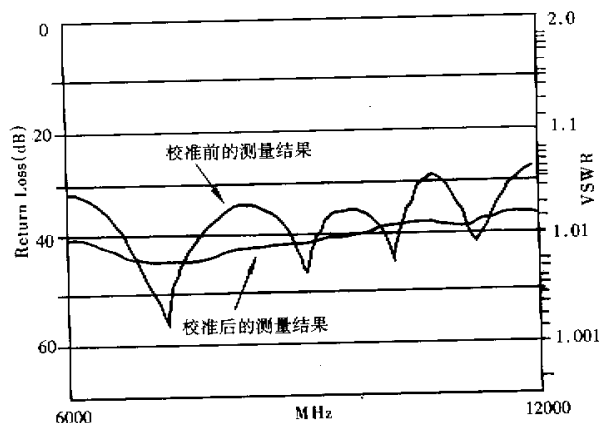


图 3

## 四、结束语

网络分析仪是由许多有源和无源元器件组成的,它们不可能是理想的。因此,任何实际的网络分析仪都存在多种系统误差源。本文给出通过数学方法和校准测量修正系统误差的方法,对网络参数精密测量和网络分析仪的应用具有重要意义。当网络分析仪的系统误差减小而随机误差占优势时,可利用统计方法减小随机误差。

## 参考文献

- [1] 董树义. 微波测量技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.5
- [2] 汤世贤. 微波测量. 北京: 国防工业出版社(修订版), 1991.
- [3] 郑君里等. 信号与系统. 北京: 高等教育出版社, 1991.8
- [4] HP8720ES Network Analyzers Reference Guide. 1999
- [5] HP8720ES Network Analyzers User's Guide. 1999

## 微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,推出多套微波射频以及天线设计培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 微波射频测量仪器操作培训课程合集

搞硬件、做射频,不会仪器操作怎么行!对于射频工程师和硬件工程师来说,日常电路设计调试工作中,经常需要使用各种测试仪器测量各种电信号来发现问题、解决问题。因此,熟悉各种测量仪器原理,正确地使用这些测试仪器,是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能,该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟练掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

### 矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器;该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装,包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材,能够帮助微波、射频工程师快速地熟练掌握矢量网络分析仪使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



### 示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器,因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解,也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解,能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>