

文章编号: 1671-7449(2004)01-0069-05

标量网络分析仪误差校正分析及其应用

陈 伟, 王桂琼

(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 为了消除标量网络分析仪在测量过程中的系统误差, 提高测量精度, 采用误差分析及校正模型, 用数值分析的方法去除系统误差, 降低随机误差. 理论计算和实际测量结果都表明, 测量精度明显提高. 该误差分析理论及误差测量方法在标量网络分析仪中得到了较好的应用, 提高了仪器的性能.

关键词: 网络分析仪; 系统误差; 误差模型; S 参数

中图分类号: TM930.115; TN911.6 **文献标识码:** A

Scalar Network Analyzer's Error Calibration Analysis and Application

CHEN Wei, WANG Gui-qiong

(Information Engineering Institute, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to eliminate system error in the measuring process of scalar network analyzer and improve measuring precision, by using error analysis, correcting model and numerical analysis, the system error and the random error are eliminated. The results of theoretic calculation and measurement show that the measuring precision is obviously improved. The proposed theory of error analysis and the method of error measurement are well applied in scalar network analysis and the performance of apparatus is improved.

Key words: network analyzer; system calibration; calibration model; S -parameter measurement

0 引 言

随着科技的发展, 网络分析仪在射频开发方面的应用日益广泛, 网络分析仪测量 S 参数的精度是衡量其性能好坏的重要标准. 网络的 S 参数只有在完全匹配的系统中测量时, 测量结果才是精确的. 而在网络分析仪中, 既使用了无源器件, 又使用了有源器件, 同时其内部的微带线并不是完全和其它连接点匹配, 因此, 其性能并不是完全理想的, 这就要求我们必须对网络分析仪在测量过程中的误差进行分析, 通过数学分析的方法把误差从实际测量中去掉, 从而提高测量的精度.

* 收稿日期: 2003-09-16

作者简介: 陈 伟(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事信息与通信工程研究.

1 双口网络 S 参数测量中的误差分析模型及校正

1.1 双口网络的误差源

- 网络分析仪在测量过程中主要包括以下几项误差^[1]：
- 1) 失配误差：是指从被测件的两个测试端口分别看向系统时的失配误差；
 - 2) 方向性误差：主要由定向耦合器的方向性引起的测量误差；
 - 3) 频率响应误差：由两个通道的耦合度频率响应和压控振荡器幅相频率响应不同而引起的测量误差；
 - 4) 泄漏误差：微波信号未经过被测件直接进入接收机所引起的测量误差；
 - 5) 噪声引起的测量误差；
 - 6) 用来校准网络分析仪的标准件特性不理想所引起的测量误差，例如标准开路器、短路器、传输线的特性不理想；
 - 7) 仪器误差：包括微波信号的频率和功率不稳定引起的误差、微波开关的不重复性、放大器的增益非线性以及模数转换误差等；
 - 8) 同轴接头的不重复性误差。

在上述各项误差源中，前四项属于系统误差，第五项属于随机误差，而最后三项属于固有误差。固有误差一般不便于采用数学分析进行修正，而随机误差可以通过多次测量取平均值的方法来减小。因此，我们主要对前面四项系统误差进行校正，来提高测量精度。

1.2 系统误差模型

网络分析仪测量双口网络 S 参数的连接图如图 1^[2,3]。分析可知，测量中存在的系统误差有：① 由于定向耦合器不理想，使来自信号源的测量信号中一部分在经过被测件反射之前泄漏到了耦合口，从而引起测量误差，即方向性误差；② 由于 S 参数测量系统的不理想匹配，从被测件向信源方向看去的等效源反射系数不完全为零，有一部分信号在被测件和信源之间来回反射，引起测量误差，称之为源失配误差；③ 从被测网络向负载方向看去，因负载失配会引起负载失配误差；④ 由于功分器、定向耦合器、接头和测试电缆等器件的频率响应特性，会造成测试系统的频响误差，即存在传输测量频响误差和反射测量频响误差；⑤ 由于在测试装置的端口 1 和端口 2 之间存在信号泄漏，从而引起误差，即泄漏误差。对于正向测量和反向测量，分别存在上述 6 项误差，全部测量误差为 12 项。图 2 是其信号流图误差模型^[4]。

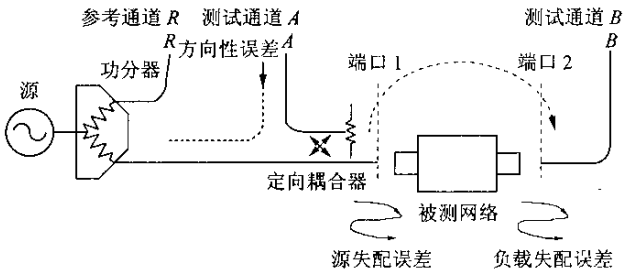


图 1 双口网络误差模型

Fig. 1 Dual-port network error model

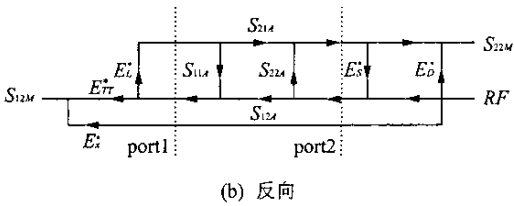
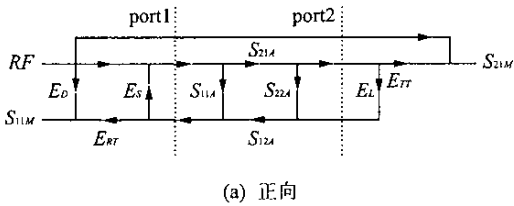


图 2 信号流图误差模型

Fig. 2 Signal flow error model

图 2 中, E_D 为正向方向性误差; E_L 为正向负载失配误差; E_S 为正向源失配误差; E_{TT} 为正向传输频率响应误差; E_{RT} 为正向反射频率响应误差; E_X 为正向泄漏误差. 带 * 号的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} 是经过误差修正后的 S 参数的实际值.

由信号流图的理论^[5], 我们可以得出如下公式:

$$S_{11M} = E_D + \frac{E_{RT}[S_{11A}(1 - S_{22A}E_L) + S_{21A}S_{12A}E_L]}{1 - (S_{11A}E_S + S_{22A}E_L + S_{21A}S_{12A}E_LE_S) + S_{11A}S_{22A}E_SE_L}, \quad (1)$$

$$S_{21M} = E_X + \frac{E_{TT}E_{21A}}{1 - (S_{11A}E_S + S_{22A}E_L + S_{21A}S_{12A}E_LE_S) + S_{11A}S_{22A}E_SE_L}, \quad (2)$$

$$S_{12M} = E_X^* + \frac{S_{12A}E_{TT}^*}{1 - (S_{22A}E_S^* + S_{11A}E_L^* + S_{21A}S_{12A}E_S^*E_L^*) + S_{11A}S_{22A}E_S^*E_L^*}, \quad (3)$$

$$S_{22M} = E_D^* + \frac{E_{RT}^*[S_{22A}(1 - S_{11A}E_L^*) + S_{12A}S_{21A}E_L^*]}{1 - (S_{22A}E_S^* + S_{11A}E_L^* + S_{21A}S_{12A}E_S^*E_L^*) + S_{11A}S_{22A}E_S^*E_L^*}. \quad (4)$$

1.3 系统误差的校正

系统误差的校正过程包括 12 个步骤, 通过 12 次校正测量, 便可确定 12 项误差系数^[1~4,6]. 具体的校正方法如下:

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

$$M_1 = E_D. \quad (5)$$

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

$$M_2 = E_D - \frac{E_{RT}}{1 + E_S}. \quad (6)$$

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

$$M_3 = E_D + \frac{E_{RT}}{1 + E_S}. \quad (7)$$

4) 在两个端口分别接上匹配负载, 此时, $S_{11A}=S_{12A}=S_{21A}=S_{22A}=0$, 代入式 (2), 可测得端口 2 的传输系数

$$M_4 = E_X. \quad (8)$$

5) 把两个端口连接成直通, 此时, $S_{11A}=S_{22A}=0$, $S_{12A}=S_{21A}=1$, 代入式 (1), 可测得端口 1 的输入反射系数

$$M_5 = E_D + \frac{E_{RT}E_L}{1 - E_SE_L}. \quad (9)$$

6) 在直通下, 测量端口 2 的传输系数, 代入式 (9) 可得端口 2 的传输系数

$$M_6 = E_X + \frac{E_{TT}}{1 - E_SE_L}. \quad (10)$$

联立式 (5)~式 (10), 可以得出 6 个正向误差系数为

$$E_D = M_1; \quad (11)$$

$$E_S = \frac{2M_1 - M_2 - M_3}{M_2 - M_3}; \quad (12)$$

$$E_{RT} = (M_3 - M_1)(1 - E_S); \quad (13)$$

$$E_X = M_4; \quad (14)$$

$$E_L = \frac{M_5 - M_1}{M_4 + M_5(M_5 - M_1)}; \quad (15)$$

$$E_{TT} = (M_6 - E_X)(1 - E_S E_L). \quad (16)$$

同理, 可以求出相应的 6 项反向误差项. 这样便可得出 12 项误差系数. 然后通过式 (1)~式 (4) 可推导出被测件实际的 S 参数值.

$$S_{11A} = \frac{\left(\frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}}\right) \left(1 + \frac{S_{22M} - E_D^*}{E_{RT}^*}\right) - E_L \left(\frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}}\right) \left(\frac{S_{12M} - E_X^*}{E_{TT}^*}\right)}{\Delta}; \quad (17)$$

$$S_{12A} = \frac{\left(\frac{S_{12M} - E_X^*}{E_{TT}^*}\right) \left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}}\right) (E_S^* - E_L^*)\right]}{\Delta}; \quad (18)$$

$$S_{21A} = \frac{\left(\frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}}\right) \left[1 + \left(\frac{S_{22M} - E_D^*}{E_{RT}^*}\right) (E_S^* - E_L^*)\right]}{\Delta}; \quad (19)$$

$$S_{22A} = \frac{\left(\frac{S_{22M} - E_D^*}{E_{RT}^*}\right) \left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT}}\right) E_S\right] - E_L^* \left(\frac{S_{21M} - E_X}{E_{TT}}\right) \left(\frac{S_{12M} - E_X^*}{E_{TT}^*}\right)}{\Delta}. \quad (20)$$

2 误差校正理论的具体应用

双口网络 S 参数误差校正理论在不同的系统中, 可以有不同的应用. 本节详细介绍笔者所参与设计的网络分析仪的误差校正方法.

本系统主要用来测量网络的传输和反射 S 参数, 其系统框图如图 3 所示. 信号源输入通过控制压控振荡器的电压来产生不同频率的信号, 信号经过定向耦合器耦合到输入端口 1, 通过开关来控制是测试传输量还是反射量. 系统的工作频率范围为 100 MHz~1 GHz.

本系统与误差模型的不同之处在于, 在通道 2 不存在信号源输入和定向耦合器, 因此, 反向方向性误差为零; 而且, 我们通过端口 2 增加一个功率衰减器, 使端口 2 接近于理想匹配, 负载失配误差也就可近似为零. 这样就得出 $E_D^* = 0$, $E_L = 0$, 从而简化误差校正的繁琐程度.

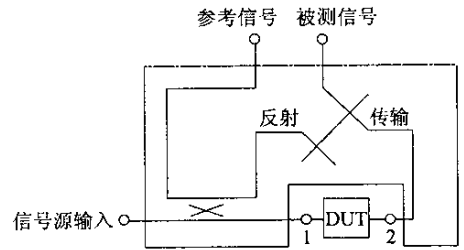


图 3 系统框图

Fig. 3 System block diagram

由于 $E_D^* = 0$, 在反向误差校正时, $M_2^* = E_D^* - \frac{E_{RT}^*}{1 + E_S^*}$, $M_3^* = E_D^* + \frac{E_{RT}^*}{1 + E_S^*}$, 从而得出 $E_S^* = \frac{2E_D^* - (M_2^* - M_3^*)}{M_2^* - M_3^*} = 0$. 在将这三项为 0 的误差项代入式 (17)~式 (20) 便得到简化的误差校正公式

$$S_{11A} = \frac{S_{11M} - E_D}{E_{RT} - (S_{11M} - E_D)E_S}, \quad (21)$$

$$S_{21A} = \frac{(S_{21M} - E_X)E_{RT}}{E_{TT}[E_{RT} + (S_{11M} - E_D)E_S]}. \quad (22)$$

由式 (21) 和式 (22) 可知, 式中只含有 5 个误差系数项, 与原来的 12 项误差相比, 待求误差项大大减少. 现在, 我们必须对这 5 项误差进行校正. 在式 (11)~式 (16) 6 个正向误差中, 由于

$$E_L = 0, \quad (23)$$

则式 (16) 为

$$E_{TT} = (M_6 - E_X). \quad (24)$$

通过式 (11)~式 (14) 及式 (23) 和式 (24) 便可求出这 6 项误差. 这 6 个方程中, 含有 M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_6 . 因此, 在系统误差的校正步骤中, 第 5 个步骤可以不做. 这样可以把 5 项误差分别求出.

在处理校正数据的过程中需要注意：

- 1) 由于测量的是标量的结果，只能测出其幅度，而无法测出其相位，因此，在校正步骤 2) 中，由于 S_{11A} 的理论值为 -1 ，因此，在测得相应的 M_2 后，必须人为地取负值，这样才能得出正确的结果。
- 2) 在观察各项正向误差参数的大小时，必须遵循的规律是： E_{RT} ， E_{TT} 应该接近于 1，其余几项误差应该接近于 0。
- 3) 以上所推导出的 S 参数是反射系数，其取值范围应小于 1，而在实际的电路中，可能测出的是其功率，因此必须转换成电压来计算。在最后的显示过程中，再对计算所得的 S 参数取对数便得到以分贝形式衡量的 S 参数的值。

3 测量实例

在对校正结果进行验证时，我们拿 10 dB 衰减器，低通滤波器，带通滤波器，高通滤波器等器件进行测量，并将测量结果与惠普的矢量网络分析仪进行对比，实验结果表明，此测量结果是可以接受的。以高通滤波器为例，我们测量其在 600 MHz~1 000 MHz 频段内的传输系数。图 4 和图 5 是校正前和校正后的扫频测量结果。

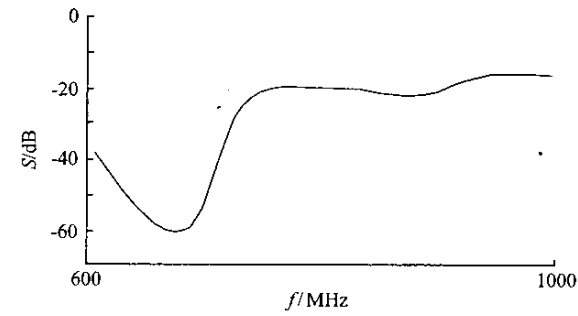


图 4 校正前扫频测量结果

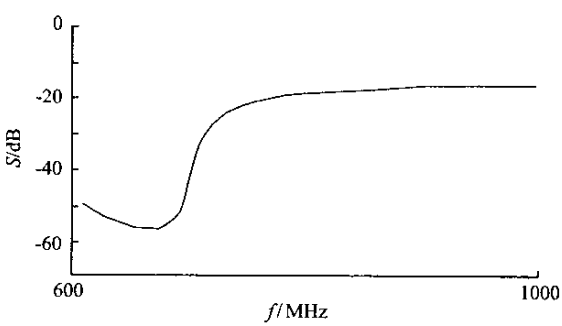


图 5 校正后扫频测量结果

Fig. 4 Frequency-sweep measure result before calibration Fig. 5 Frequency-sweep measure result after calibration

由图 4，图 5 可知，通过校正，基本消除了测量过程的系统误差的影响，扫频曲线明显比校正前要平缓光滑，较好地反映了器件的传输特性，测量精度明显提高。而且在进行误差参数测量计算过程中，采用了多次测量取平均值的方法，也降低了随机误差对测量结果的影响，力求使测量结果尽量准确。

参考文献：

- [1] 汤世贤. 微波测量[M]. 北京：国防工业出版社，1991. 347—362.
- [2] Agilent Corporation. Agilent AN 1287-3 Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements[EB/OL]. http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-770_9E.pdf. 2002-03-27/2003-10-08.
- [3] 梁军，刘旺，孙圣和. 网络分析仪误差模型及应用[J]. 计量技术，2002，(6)：3—6.
- [4] Agilent Corporation. Agilent Specifying Calibration Standards for the Agilent 8510 Network Analyzer[EB/OL]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5956-4352.pdf>. 2001-09-21/2003-10-08.
- [5] 郑君里，应启珩，杨为理. 信号与系统[M]. 北京：高等教育出版社，2000. 286—296.
- [6] 董树义. 微波测量技术[M]. 北京：北京理工大学出版社，1990. 180—203.

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(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>