

微波网络分析仪系统误差辨析及校准

刘 岚, 聂 丹

(武汉理工大学信息工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 在对网络分析仪的测量误差来源进行分析的基础上, 介绍了误差的主要校准方法, 同时给出了二端口校正的误差模型。通过对校准件测量的方法来确定系统误差, 并讨论了校准件存在微小误差情况下的系统误差确定方法。最后, 通过测量 50Ω 负载的阻抗特性, 验证了校正方法的有效性。

关键词: 网络分析仪; 系统测量误差; 二端口校正; 误差校准

中图分类号: TN 915.05

文献标识码: A

文章编号: 1671-4431(2004)02-0073-03

1 测量误差来源

网络分析仪的测量误差基本来自 3 个方面: 系统误差、随机误差和漂移误差。其中, 系统误差是由于仪器设计本身的不理想性引起的, 这种误差在测量过程中, 可以通过校正方法予以消除。随机误差主要来自仪器内部器件的噪声, 如: 信号源的相位噪声等, 它随着时间在不断变化, 是不可预知的, 因而不能通过校正方法来消除。漂移误差主要指由频率和温度变化而引起的误差, 它可以通过对仪器重新校正消除。用微波网络分析仪测量二端口网络特性的主要系统误差如图 1 所示^[1]。

其中, 由于定向耦合器阻隔特性不理想, 信号源输出的一部分信号直接由定向耦合器的阻隔端进入反射通道 A 所引起的误差称为方向性误差; 信号源的信号未经过测试设备直接进入接收机所引起的误差称为泄漏误差; 从测试设备的 2 个测试端口分别向系统的信号源和接收机方向看去的等效反射系数不为零, 即阻抗不匹配引起的误差称为源失配误差和负载失配误差; 反射通道和传输通道的耦合度频率响应和变频器幅相频率响应不同而引起的误差称为频率响应误差(其中包括反射频率响应误差和传输频率响应误差)。上面列举了系统测量的 6 种正向误差, 而对于二端口网络特性的所有系统测量误差还应包括与正向误差相对应的反向误差, 即总共 12 种误差。

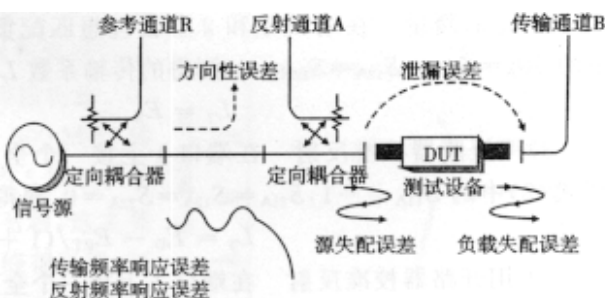


图 1 系统测量误差

2 系统误差模型

系统误差的校正方法主要有 2 种: 响应归一化校正和矢量误差校正。所谓响应归一化校正, 是把参考通道 R 的数据存储到存储器中, 再用测得的反射通道 A 和传输通道 B 的数据除以参考通道 R 的数据, 以消除频率响应误差。这种方法比较简单, 容易实现, 但它只能校正部分系统误差。矢量误差校正, 是通过测量已知的标准件(如: 开路器、短路器、匹配负载和传输线)来表征系统误差, 再进行运算消除测量数据中的这些误差。它可分为一端口校正和二端口校正。前者适用于反射测量, 能消除方向性误差、源失配误差和反射频率响应误差; 后者适用于反射和传输测量, 能消除所有系统误差。因此, 二端口校正是一种相对来说最准确的误

差校正。二端口校正误差模型如图2所示^[2]。其中, $S_{11M}, S_{21M}, S_{22M}$ 和 S_{12M} 表示散射参量 S 的测量值; $S_{11A}, S_{21A}, S_{22A}$ 和 S_{12A} 表示散射参量 S 的实际值。

由图2模型,根据信号流图的不接触环法则(梅森公式)^[3],不难解出测试设备散射参量 S 的测量值与实际值的关系为

$$S_{21M} = E_X + (S_{21A} \times E_{TT})/\Delta \quad (1)$$

$$S_{11M} = E_D + E_{RT} \times [S_{11A} \times (1 - E_L \times S_{22A}) + S_{21A} \times S_{12A} \times E_L]/\Delta \quad (2)$$

$$S_{12M} = E_{X'} + (S_{12A} \times E_{TT'})/\Delta' \quad (3)$$

$$S_{22M} = E_{D'} + E_{RT'} \times [S_{22A} \times (1 - E_{L'} \times S_{11A}) + S_{12A} \times S_{21A} \times E_{L'}]/\Delta' \quad (4)$$

其中, $\Delta = 1 - E_S \times S_{11A} - E_L \times S_{22A} - E_L \times E_S \times S_{12A} \times S_{21A} + E_S \times S_{11A} \times E_L \times S_{22A}$ 为正向测量信号流图行列式; $\Delta' = 1 - E_{L'} \times S_{11A} - E_{S'} \times S_{22A} - E_{L'} \times E_{S'} \times S_{21A} \times S_{12A} + E_{L'} \times S_{11A} \times E_{S'} \times S_{22A}$ 为反向测量信号流图行列式。

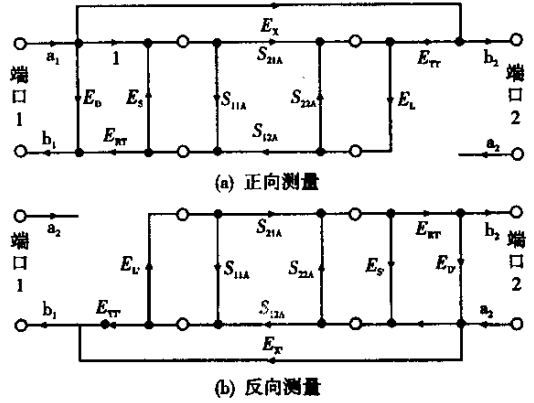


图2 二端口误差校正

E_D 表示正向方向性误差; E_S 表示正向源失配误差; E_{RT} 表示正向反射频率响应误差; E_X 表示正向泄漏误差; E_L 表示正向负载失配误差; E_{TT} 表示正向传输频率响应误差; $E_{D'}, E_{S'}, E_{RT'}, E_{X'}, E_{L'}$ 和 $E_{TT'}$ 分别表示与正向误差相对应的各反向误差。

3 系统误差的校准

3.1 理想的标准件校准

误差校准有6个测量步骤,通过6次校准测量,可确定图2中正向 $E_D, E_{RT}, E_S, E_L, E_{TT}, E_X$ 这6个误差量。

1) E_D 的测量 在端口1上接理想匹配负载,则式(2)中的 $S_{11A} = S_{21A} = S_{12A} = S_{22A} = 0$,测得反射系数 L_1 为

$$L_1 = E_D \quad (5)$$

2) E_X 的测量 在端口1和2上接理想匹配负载,则式(1)中的 $S_{11A} = S_{21A} = S_{12A} = S_{22A} = 0$,测得的传输系数 L_2 为

$$L_2 = E_X \quad (6)$$

3) 用短路器校准反射 在端口1上接一个全反射短路器,则式(2)中的 $S_{11A} = -1, S_{21A} = S_{12A} = S_{22A} = 0$,测得的反射系数 L_3 为

$$L_3 = E_D - E_{RT}/(1 + E_S) \quad (7)$$

4) 用开路器校准反射 在端口1上接一个全反射开路器,则式(2)中的 $S_{11A} = +1, S_{21A} = S_{12A} = S_{22A} = 0$,测得的反射系数 L_4 为

$$L_4 = E_D + E_{RT}/(1 - E_S) \quad (8)$$

5) 直接连接校准反射 在端口1和2上直接连接一条理想传输线,则式(2)中的 $S_{11A} = S_{22A} = 0, S_{21A} = S_{12A} = 1$,测得的反射系数 L_5 为

$$L_5 = E_D + (E_{RT} \times E_L)/(1 - E_S \times E_L) \quad (9)$$

6) 直接连接校准传输 在端口1和2上直接连接一条理想传输线,则式(1)中的 $S_{11A} = S_{22A} = 0, S_{21A} = S_{12A} = 1$,测得的传输系数 L_6 为

$$L_6 = E_X + E_{TT}/(1 - E_L \times E_S) \quad (10)$$

经过以上6次校准测量,求得 $L_1 \sim L_6$ 的6个测量结果。求解式(5)~式(10),即可确定6个正向系统测量误差

$$\left. \begin{aligned} E_D &= L_1 & E_X &= L_2 \\ E_S &= (2L_1 - L_3 - L_4)/(L_3 - L_4) & E_L &= (L_5 - E_D)/[E_{RT} + (L_5 - E_D) \times E_S] \\ E_{RT} &= [2(L_1 - L_3)(L_1 - L_4)]/(L_3 - L_4) & E_{TT} &= (L_6 - E_X) \times (1 - E_L \times E_S) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

同理,通过相同的测量方法,也可确定反向 $E_{D'}, E_{S'}, E_{RT'}, E_{X'}, E_{L'}$ 和 $E_{TT'}$ 6个误差量。将所有12个系统测量误差存储在存储器内,以便对测量结果进行修正。

3.2 存在微小误差的标准件校准

其校准方法与上述相同,也是包括6个步骤。只是区别在于:1)如果校准件匹配负载的反射 ρ_L 不为零,

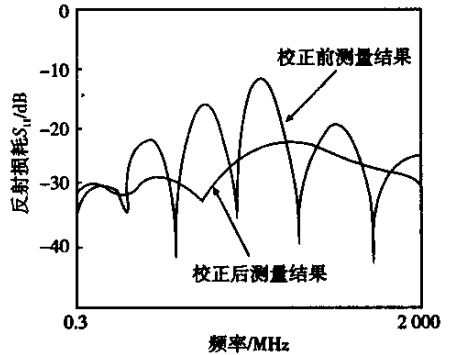


图3 10 dB功率衰减器的反射损耗测量

则针对上述步骤 1) 对方向性误差 E_D 的测量,通常是用一个小反射滑动负载来代替无反射负载连接到端口 1 上。此时式(2)中的 $S_{11A}=\rho_L, S_{12A}=S_{21A}=S_{22A}=0$ 。因为 $|\rho_L|=1$,并忽略 ρ_L 的来回反射项,所以,测得的反射系数 L_1 为: $L_1=E_D+\rho_L \times E_{RT}$ 。对于滑动负载的不同位置, L_1 的轨迹是一个圆,其圆心的坐标为 E_D ,所以只要滑动负载处在 3 个不同的位置,便能确定圆和圆心,因而就确定了 E_D 。这种方法并不要求已知滑动负载的反射系数的模和相角,而只要求在滑动过程中反射系数的模保持不变。2) 对于上述步骤 4) 用开路器校准反射,若校准件开路器不是 $\lambda_g/4$ (λ_g 为波导的长度),而是距波导口为任意长度 l ,则式(2)中的 $S_{11A}=e^{-i\beta l}=\rho_S$ ($\beta=2\pi/\lambda_g$ 为相位常数^[4], ρ_S 为开路器的反射系数), $S_{12A}=S_{21A}=S_{22A}=0$ 。此时,测得的反射系数 L_4 为: $L_4=E_D+E_{RT}\rho_S/(1-E_S\rho_S)$ 。经过以上修正,6 个正向系统测量误差可确定为

$$\left. \begin{aligned} E_D &= L_1 & E_X &= L_2 \\ E_S &= [\rho_S(L_1 - L_3) + (L_1 - L_4)] / [\rho_S(L_3 - L_4)] & E_L &= (L_5 - E_D) / [E_{RT} + (L_5 - E_D) \times E_S] \\ E_{RT} &= [(1 + \rho_S)(L_1 - L_3)(L_1 - L_4)] / [\rho_S(L_3 - L_4)] & E_{TT} &= (L_6 - E_X) \times (1 - E_L \times E_S) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

同理,通过相同的测量方法,也可确定反向 $E_{D'}$ 、 $E_{S'}$ 、 $E_{RT'}$ 、 $E_{X'}$ 、 $E_{L'}$ 和 $E_{TT'}$ 6 个误差量。将所有 12 个系统测量误差存储在存储器内,以便对测量结果进行修正。

4 验 证

1) 测量 10 dB 功率衰减器在 0.3~2 000 MHz 频率范围内的反射损耗。其校正前和校正后的测量结果如图 3 所示。对于没有误差修正的情况,其测量结果为典型波动曲线,这主要是受系统测量误差影响的结果。经过误差修正后,测量曲线很平滑,更能体现器件的反射特性。2) 测量带通滤波器 ($f_0=285$ MHz, $BW_{3dB}=40$ MHz, $f_{S1}=165$ MHz, $f_{S2}=405$ MHz) 在 50~500 MHz 频率范围内的插入损耗。其校正前和校正后的测量结果如图 4 所示。对于没有误差修正的情况,其测量的传输特性曲线有明显毛刺,这主要是受系统测量误差影响的结果。经过误差修正后,测量曲线很平滑,更能体现器件的传输特性。3) 测量高通滤波器 ($f_s=650$ MHz, $f_p=850$ MHz) 在 0.3~1 500 MHz 频率范围内的插入损耗。其校正前和校正后的测量结果如图 5 所示。对于没有误差修正的情况,其测量的传输特性曲线有明显毛刺,这主要是受系统测量误差影响的结果。经过误差修正后,测量曲线很平滑,更能体现器件的传输特性。

5 结 语

网络分析仪的测量精度一直是受到普遍关注的问题。目前,在其校准方法上已有了许多发展,不仅对校准方程提出了严格的数学分析,而且还发展了适用于各种应用场合的校准方法^[5]。文中研究了通过测量校准件来确定系统误差的方法,并讨论了在校准件不精确的情况下,如何对这种测量方法进行修正,以确定系统误差,进而在实际测量中消除系统误差。

参 考 文 献

- [1] Agilent Technologies. HP 8712ES and HP 8714ES RF Network Analyzers User's Guide[M]. California: Hewlett Packard Company, 1998.
- [2] David Ballo. Network Analyzer Basics[M]. California: Hewlett Packard Company, 1998.
- [3] 吴正娟. 微波原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1995.
- [4] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko. RF Circuit Design Theory and Applications[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 陈振国. 微波技术基础与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.

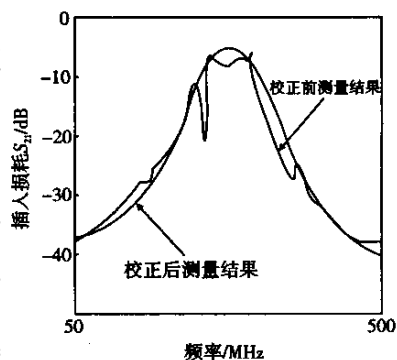


图 4 带通滤波器的插入损耗测量

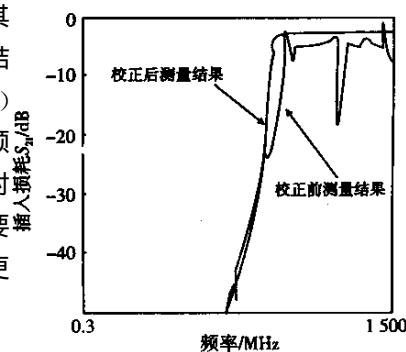


图 5 高通滤波器的插入损耗测量

参考文献

- [1] Stefan Katzenbeisser, Fabien A P. Information Hiding[M]. 吴秋新译. 北京:人民邮电出版社,2001.
- [2] Hatung F, Girod B. Watermarking of Uncompressed and Compressed Video[J]. Signal Proc, 1999, 66(3):1079~1107.
- [3] Shapiro J M. Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(3):3445~3462.
- [4] 黄继武,程卫东,岳 韬. 一种图像 2-D 水印算法[J]. 自动化学报,2002,28(2):102~106.
- [5] 刘 泉,林海燕. 数据融合技术在炉衬侵蚀检测中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2003,25(3):62~64.

An Adaptive Watermarking Algorithm for Color Images

GUO Zhi-qiang, TANG Bing

(School of Information Engineering, WUT, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on DCT, an adaptive watermarking algorithm for color images is proposed. The algorithm contains some adaptive variables, which can be adjusted according to the local characters of the original image. The algorithm can trade off the conflict of invisibility and robustness of the invisible watermarking. The explanation of color watermarking image is a breakthrough of digital watermarking algorithm, especially when both the original image and the watermarking image are color images. Experimental results show that the proposed algorithm is robust against some image processing operations.

Key words: digital watermarking; color image; DCT

(上接第 75 页)

Measurement Errors Analyses of Network Analyzer

LIU Lan, NIE Dan

(School of Information Engineering, WUT, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on analyzing the sources of measurement errors, the correction methods of the errors are introduced and error models of two-port calibration are provided. The systematic errors can be determined by measuring known calibration standards. Moreover, if there are some errors in known calibration standards, the methods how to compute systematic errors are studied. According to the measuring results of property of 50 Ω impedance, the availability of the methods is proved.

Key words: network analyzer; systematic measurement error; two-port calibration; error calibration

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>