

校准件不完善导致的矢量网络分析仪剩余误差分析

郝绍杰¹ 韩晓东²

(1. 中国电子科技集团公司第41研究所 青岛 266555; 2. 电子测试技术国家重点实验室 青岛 266555)

摘要: 本文简要介绍了矢量网络分析仪的单端口误差模型和校准方法, 重点分析了矢量网络分析仪单端口校准中, 由校准件不完善性带来的剩余误差。对校准件不完善性导致的校准后矢量网络分析仪存在的剩余方向性误差、剩余源匹配误差和剩余反射跟踪误差进行了理论推导, 最后给出了计算剩余误差项的实例。

关键词: 矢量网络分析仪; 误差模型; 负载; 开路器; 短路器; 剩余误差

中图分类号: TP216.1 **文献标识码:** A

Analysis of residual error due to calibration kits' s imperfection in vector network analyzer measurement

Hao Shaojie¹ Han Xiaodong²

(1. the 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555;

2. Electronic Test & Measurement Technology National Laboratory, Qingdao 266555)

Abstract: This paper briefly introduced the single port error model and calibration method of vector network analyzer, and also laid emphasis on the residual error caused by the imperfection of the calibration kits in the vector network analyzer's single port calibration. The residual error of directivity, source match and reflection tracking which existed in the vector network analyzer after calibration, and which were caused by the imperfection of the calibration kits, were deduced in theory. Finally, the instance of the calculation about residual error was given.

Keywords: vector network analyzer; error model; load; open; short; residual errors

0 引言

矢量网络分析仪是精度很高的网络S参数测量和分析仪器^[1]。矢量网络分析仪内部包含大量的宽带微波器件, 受材料、工艺等限制, 这些宽带器件在频率覆盖范围和性能指标上无法兼顾。因此, 矢量网络分析仪的初始特性都是有限的, 有较大的系统误差, 难以进行高精度的测量。现代矢量网络分析仪利用内部嵌入式计算机, 通过矢量误差修正来修正系统误差, 以基于软件的数学运算弥补硬件的不足, 从而实现高精度的S参数测量和分析。常见的矢量误差修正方法有OSL(开路器、短路器、负载)法, OSLT(开路器、短路器、负载、通过)法, TRL(通过、反射、线)法, TRM(通过、反射、匹配)法等方法^[2]。本文主要介绍OSL法, 并分析了用OSL法进行误差修正时由于校准件的不完善带来的影响。

1 单端口网络误差模型和校准方法

OSL法主要用于单端口网络测量。在进行单端口测量时^[3], 矢量网络分析仪主要包含3个系统误差项, 分别是方向性误差 E_{DF} 、源匹配误差 E_{SF} 和反射跟踪误差 E_{RF} 。它的误差模型如图1所示。

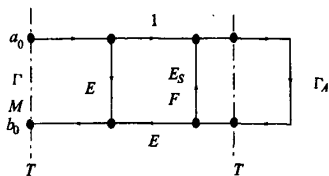


图1 单端口网络误差模型

根据单端口误差模型^[4], 如果被测件的真实反射系数为 Γ_A , 则该被测件的测量值 Γ_M 为:

作者简介: 郝绍杰(1977-), 男, 工程师, 主要研究方向是电子测量仪器。

$$\Gamma_M = \frac{b_0}{a_0} = E_{DF} + \frac{E_{RF} \times \Gamma_A}{1 - E_{SF} \times \Gamma_A} \quad (1)$$

这三项误差使测量值 Γ_M 偏离了真实值 Γ_A , 从而导致测试误差的产生。如果能够知道这三个误差项的确切值, 那么就能够得到被测件的真正参数 Γ_A 。矢量网络分析仪采用矢量误差修正技术获取三个系统误差项。矢量误差修正技术通过测量三个已知特性的器件(校准件)^[5], 根据式(1)建立三个方程式, 然后求解方程组得到三个系统误差项。为了简化方程, 同时便于制造, 在工程中一般选用开路器(反射系数为1)、短路器(反射系数为-1)和负载(反射系数为0)作为校准件。采用开路器、短路器、负载作为校准件的校准方法被称为 OSL 校准法。

在校准过程中, 分别测量这三个器件, 可得到三个测量值 Γ_{M1} 、 Γ_{M2} 、 Γ_{M3} 。

$$\Gamma_{M1} = E_{DF} + \frac{E_{RF}}{1 - E_{SF}} \quad (2)$$

$$\Gamma_{M2} = E_{DF} + \frac{-E_{RF}}{1 + E_{SF}} \quad (3)$$

$$\Gamma_{M3} = E_{DF} \quad (4)$$

式(2)、式(3)、式(4)可联立可得到误差系数:

$$E_{DF} = \Gamma_{M3} \quad (5)$$

$$E_{SF} = \frac{2\Gamma_{M3} - \Gamma_{M2} - \Gamma_{M1}}{\Gamma_{M2} - \Gamma_{M1}} \quad (6)$$

$$E_{RF} = \frac{2(\Gamma_{M3} - \Gamma_{M1})(\Gamma_{M3} - \Gamma_{M2})}{\Gamma_{M2} - \Gamma_{M1}} \quad (7)$$

通过式(1)还可得到误差修正公式:

$$\Gamma_A = \frac{\Gamma_M - E_{DF}}{E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF}} \quad (8)$$

将式(5)、式(6)、式(7)代入式(8), 可得:

$$\Gamma_A = \frac{(\Gamma_M - \Gamma_{M3})(\Gamma_{M2} - \Gamma_{M1})}{(\Gamma_{M3} - \Gamma_{M1})(\Gamma_M - \Gamma_{M2}) + (\Gamma_M - \Gamma_{M1})(\Gamma_{M3} - \Gamma_{M2})} \quad (9)$$

可见, 校准可以得到系统误差系数。在实际测量中, 将误差系数代入误差修正公式, 这一过程称之为误差修正, 可将带有误差的测量值 Γ_M 修正得到被测件的真正值 Γ_A , 从而实现精确的测量。

2 校准件不完善导致的剩余误差分析

2.1 剩余误差分析

由于制作工艺的限制, 校准件的特性不可能达到它的理想特性。校准件的实际特性和它的标称特性的差异, 导致校准后的测量数据仍存在误差, 称之为剩余误差^[6]。

理想的负载能吸收全部入射波, 反射系数为0, 实际上用作校准件的匹配负载只能吸收入射波能量的98%以上。在校准件中定义负载标准的数据非常简单, 即反射系数等于0, 由于其非理想性引起的误差并没有采取补偿措施, 这就会引起剩余误差。

理想的开路器阻抗为无限大, 对于入射波全反射, 其反射系数为1, 相位为0°, 理想的短路器阻抗为0, 与开路

器的特性相类似, 所不同的是其反射系数的相位为180°。实际上理想的开路器和短路器是不存在的, 开路器主要受边缘电容的影响, 其反射系数的相位会偏离理想值, 短路器主要受边缘电感的影响, 也会引起反射系数相位的变化。相位的变化也会引起剩余误差。下面就分析由于校准件的非理想性所引起的剩余误差。

先对变量作如下定义:

Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 分别表示理想的开路器、短路器和负载的发射系数; Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 分别表示 Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 的误差; Γ_{M1}' 、 Γ_{M2}' 、 Γ_{M3}' 分别表示连接上开路器、短路器和负载的测量值。

$$\Gamma_{M1}' = E_{DF} + \frac{E_{RF} \times (\Gamma_1 + \Delta_1)}{1 - E_{SF} \times (\Gamma_1 + \Delta_1)} \quad (10)$$

$$\Gamma_{M2}' = E_{DF} + \frac{E_{RF} \times (\Gamma_2 + \Delta_2)}{1 - E_{SF} \times (\Gamma_2 + \Delta_2)} \quad (11)$$

$$\Gamma_{M3}' = E_{DF} + \frac{E_{RF} \times (\Gamma_3 + \Delta_3)}{1 - E_{SF} \times (\Gamma_3 + \Delta_3)} \quad (12)$$

式中: 方向性误差 E_{DF} , 源匹配误差 E_{SF} 和反射跟踪误差 E_{RF} 分别由式(5)、式(6)、式(7)给出。由于在校准时认为校准件是理想的, 则由式(2)、式(3)、式(4)可得到:

$$\Gamma_{M1}' = E_{DF}' + \frac{E_{RF}'}{1 - E_{SF}'} = E_{DF} + \frac{E_{RF} \times (\Gamma_1 + \Delta_1)}{1 - E_{SF} \times (\Gamma_1 + \Delta_1)} \quad (13)$$

$$\Gamma_{M2}' = E_{DF}' + \frac{-E_{RF}'}{1 + E_{SF}'} = E_{DF} + \frac{E_{RF} \times (\Gamma_2 + \Delta_2)}{1 - E_{SF} \times (\Gamma_2 + \Delta_2)} \quad (14)$$

$$\Gamma_{M3}' = E_{DF}' = E_{DF} + \frac{E_{RF} \times (\Gamma_3 + \Delta_3)}{1 - E_{SF} \times (\Gamma_3 + \Delta_3)} \quad (15)$$

由式(13)、式(14)、式(15)解出的误差系数 E_{DF}' 、 E_{SF}' 和 E_{RF}' , 并将误差系数代入误差修正式(8)中, 得到新的误差修正公式:

$$\Gamma_A' = \frac{\Gamma_M - E_{DF}'}{E_{SF}'(\Gamma_M - E_{DF}') + E_{RF}'} \quad (16)$$

式中: Γ_A' 为计算出来的被测件的反射系数, 与被测件真实的反射系数 Γ_A 符合图2^[7]所示的误差模型。 δ 表示剩余方向性误差, τ 表示剩余反射跟踪误差, μ 表示剩余源匹配误差。根据图2所示的误差模型, Γ_A' 与 Γ_A 之间可用式(17)来表示。

$$\Gamma_A' = \delta + \frac{\tau \times \Gamma_A}{1 - \mu \times \Gamma_A} \quad (17)$$

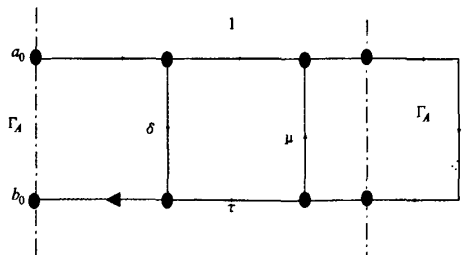


图2 单端口网络剩余误差模型

仍然假设校准件为理想开路器、短路器和负载,校准时得到的测量值通过式(13)、式(14)、式(15)、式(16)得到,并代入式(17)化简,可以得到剩余误差为:

$$\delta = -(D_1\Gamma_2\Gamma_3 + D_2\Gamma_1\Gamma_3 + D_3\Gamma_1\Gamma_2) \quad (18)$$

$$\tau = 1 + D_1(\Gamma_2 + \Gamma_3) + D_2(\Gamma_1 + \Gamma_3) + D_3(\Gamma_1 + \Gamma_2) \quad (19)$$

$$\mu = -(D_1 + D_2 + D_3)/\tau \quad (20)$$

式中:

$$D_1 = \Delta_1 / [(\Gamma_1 - \Gamma_2)(\Gamma_1 - \Gamma_3)];$$

$$D_2 = \Delta_2 / [(\Gamma_2 - \Gamma_1)(\Gamma_2 - \Gamma_3)];$$

$$D_3 = \Delta_3 / [(\Gamma_3 - \Gamma_1)(\Gamma_3 - \Gamma_2)]$$

根据上述剩余误差项,也可以求得单端口反射系数测量的不确定度,其表达式为:

$$\Delta \Gamma \cong \delta + (\tau - 1) \times \Gamma_A + \mu \times \Gamma_A^2 \quad (21)$$

2.2 例子

下面通过一个例子来说明校准件的非理想性所引起的剩余误差,在此不考虑矢量网络分析仪本身由于漂移等因素带来的误差。

对于一般的经济型校准件,其负载的反射系数为0.017 8(回波损耗大约35 dB),开路器的相位误差大约2°,假设短路器是理想的,那么可得到:

$$\Delta_1 = j\beta = j \frac{\pi}{90}, \Delta_2 = 0, \Delta_3 = 0.017 8;$$

由式(18)、式(19)、式(20)就可以得出:

$$\text{方向性剩余误差 } \delta = -35 \text{ dB} \quad (22)$$

$$\text{剩余反射跟踪误差 } \tau = 0.001 \text{ dB} \quad (23)$$

$$\text{剩余源匹配误差 } \mu = -28.12 \text{ dB} \quad (24)$$

3 结束语

本文分析了单端口校准时由于开路器、短路器和负载这3个校准件的不完善性对校准后矢量网络分析仪剩余误差的影响。从分析结果可以看出,负载的回波损耗决定了系统的方向性剩余误差和剩余源匹配误差,开路器的相

位误差主要影响反射跟踪的剩余误差,对剩余源匹配误差只是略有影响。

需要注意的是,本文的分析结果建立在仅考虑系统误差的基础,如果考虑分析仪的稳定性、噪声、连接重复性等因素,剩余误差还会受到矢量网络分析仪的初始特性的影响,其最终指标应还低于上述分析。

参考文献

- [1] 《数字通信测量仪器》编写组. 数字通信测量仪器[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [2] 董树义. 近代微波测量技术[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
- [3] RYTTING D. VNA error models and calibration methods[J]. Proc. ARFTG/NIST short course on RF measurements for a wireless world, CA, 2001, 27.
- [4] 胡小兰. S参数测量中的误差和修正[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(6): 7-10.
- [5] 罗伯特. A. 威特. 频谱和网络测量[M]. 北京:科学技术文献出版社,1997.
- [6] STUMPER U. Influence of TMSO calibration standards uncertainties on VNA S-parameter measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(2): 311-315.
- [7] RYTTING D. Effects of uncorrected RF performance in a vector network analyzer [J]. Microwave Journal, 1991.
- [8] 潘雄, 付宗堂, 范晓明. 一种处理系统误差的新方法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 630-633.
- [9] 薛茹, 王林斗. 无线资源管理中负载控制算法的研究[J]. 电子测量技术, 2006, 29(5): 49-50.
- [10] 常玉清, 王福利, 王小刚, 等. 基于支持向量机的软测量方法及其在生化过程中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(3): 241-244.

(上接第31页)

的简单明了。再通过 Rave 报表来打印和保存数据,更加强了数据分析的直观性。

参考文献

- [1] 谢忠麟. 汽车用胶带的材料进展[J]. 橡胶工业, 2007, 54(5): 310-313.
- [2] KOHEI M, SHIGEO M, YOJI T. Suppressing Vibration of Horizontal Robot Arm with Timing Belts [J]. IEEE, 1996, 2(18): 675-680.
- [3] 沈利霞. 同步带定位系统的动力学仿真与实验分析[J]. 机床与液压, 2007, 35(8): 62-68.
- [4] 金伟明. 汽车同步齿形带动态测试[J]. 轻型汽车技

术, 2001(4): 20-22.

- [5] 赵兰涛, 苏彦华. Delphi 串口通信技术于工程实践[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [6] 崔建华, 郭瑞军. Delphi 串口通信工程开发实例导航[M]. 北京:人民邮电出版社, 2002.
- [7] 求是科技. Delphi7 数据库开发技术与工程实践[M]. 北京:人民邮电出版社, 2004.
- [8] 储启明. Delphi7 典型实例开发案例[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [9] 唐先红, 梁维铭. Delphi 环境下虚拟仪器软件开发[J]. 国外电子测量技术, 2007, 26(3): 21-24.

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>