

矢量网络分析仪中的电子校准技术

朱伟 韩晓东

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

摘要: 电子校准是一种新兴的矢量网络分析仪自动校准技术。本文介绍了电子校准件的定标原理以及误差系数求解方法,为了提高误差系数求解精度,根据电子校准件的特性,提出了加权最小二乘解的误差系数求解方法,将电子校准件中校准标准的定标不确定度作为加权因子乘到误差系数求解方程组中。论文最后使用实际电子校准件对不同误差系数求解算法进行了比较,证明了本文算法的有效性。

关键词: 矢量网络分析仪;电子校准;超定方程组;最小二乘法

中图分类号: TP216.1 **文献标识码:** A

The electronic calibration technologies for vector network analyzer

Zhu Wei Han Xiaodong

(The 41st Institute of CETC, National Key Lab of Electronic Measurement Technology, Qingdao 266555)

Abstract: Electric Calibration is a new calibration method for Vector Network Analyzer. This paper introduces the definition method of Electronic Calibration Standards and the resolution method of error terms. In order to increase the accuracy of the error terms, according to the characteristics of the Electronic Calibration Module, this paper presents a weighted least squared resolution by multiplying each equation with a weighting factor that represents the uncertainty of the standard accuracy. In the end, using an Electric Calibration Module, comparisons are made between the weighted least squared calibration method and traditional methods. The experiment result verifies the higher accuracy of the method which this paper presented.

Keywords: vector network analyzer; electronic calibration; overdetermined equations; weighted least square solution

0 引言

矢量网络分析仪是重要的微波毫米波测量仪器之一,其实现高精度测量的关键是校准和矢量误差修正技术^[1],它弥补了由于硬件系统的不完善所带来的系统误差,大大提高了系统的性能指标。目前矢量网络分析仪的校准方式有两种:机械校准和电子校准。机械校准速度慢,容易引入人为误差,对操作人员要求高。电子校准采用自动化操作,速度快,受操作者影响较小,因此电子校准的应用越来越广泛^[2]。本文将介绍矢量网络分析仪电子校准的两项内容:电子校准件的定标和误差系数求解。

1 电子校准件定标

对电子校准件中的电子标准定标有两种方式:一种是使用校准系数模型表示,使用传输线模型来建模双端口标

准件,使用终端传输线模型来建模单端口校准件。图1所示为一种单端口标准传输线模型。

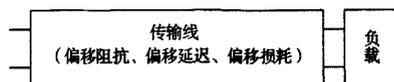


图1 单端口标准传输线模型

在矢量网络分析仪中使用图1中的偏移阻抗、偏移延迟、偏移损耗为校准标准建模传输线。通过这三个偏移项可以计算出传输线的特性阻抗和传播常数。使用校准系数模型定义校准标准是一种传统的定标方式,现在广泛应用于机械校准件的定标中^[3]。以同轴机械校准件开路器和短路器为例,可使用3次多项式模型来逼近其边缘电容和边缘电感,如式(1)、(2)所示。

$$C_0 = C_0 + C_1 f + C_2 f^2 + C_3 f^3 \quad (1)$$

$$L_0 = L_0 + L_1 f + L_2 f^2 + L_3 f^3 \quad (2)$$

作者简介:朱伟,助理工程师,主要研究方向为电子测量仪器软件开发与设计。

式中： f 为频率， C_s 为开路器边缘电容， L_s 为短路器边缘电感。

另一种标准件定标方式是基于数据模型，在数据文件中存储标准件的频率数据、S参数^[4]、不确定度等。这是一种新兴的校准标准件定标方式。下面介绍两种定义方法的差别，图2描述了数据模型和多项式模型的定标步骤^[5]。

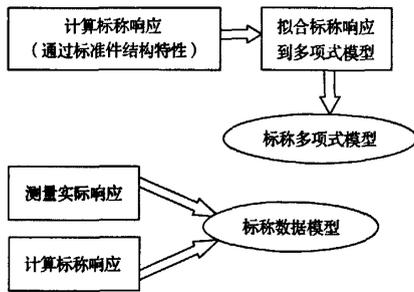


图2 数据模型、多项式模型定标步骤

从图2看出，基于多项式模型的标准件定标方式包含有拟合误差，并且在高频时段，需要建立多个频率波段模型来减小拟合误差。而基于数据模型的定标方式不包含拟合误差。

基于数据模型的标称响应有两种获得方式：

- 1) 通过结构特性计算标称响应；
- 2) 通过测量得到实际响应。

这两种标称响应获得方式都可以消除中间的拟合误差，但由于电子标准结构复杂，其阻抗状态并非严格意义上的开路器、短路器等状态，通过计算得到标称响应非常困难，所以采用通过精确测量得到数据文件的定标方式，并且这样的定标方式可用于用户自定义定标。

电子标准的定标过程为首先选用高精度的校准件对矢量网络分析仪进行校准，然后用校准过的矢量网络分析仪测量电子校准件的各个状态，保存S参数到校准件内部FLASH存储器中。由此可见电子标准的定标是一个标准的传递过程，即将上一级标准的精度传递给电子校准件。

2 误差系数求解

以单端口为例进行误差系数求解。单端口误差系数模型^[6]如图3所示， E_{DF} 、 E_{SF} 、 E_{RF} 代表方向性、源匹配、反射跟踪， Γ_m 表示电子标准的测量值， Γ 表示电子标准的定标值。

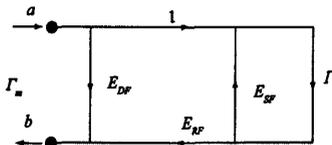


图3 单端口误差系数模型

误差系数模型建立了误差系数项、被测件真实值、被测件测量值之间的关系。从误差模型可以得到：

$$\Gamma_m = E_{DF} - (E_{DF}E_{SF} - E_{RF})\Gamma + E_{SF}\Gamma_m\Gamma \quad (3)$$

传统的误差系数求解使用代数法求解，由于误差模型中含有三个误差项，一般选用开路、短路、负载三个校准标准进行测量，得到3个方程，从而求得误差系数，这是机械校准中广泛应用的误差系数求解方法。而电子校准件不同于机械校准件，其内部能提供了多种电子标准状态，对单端口标准一般提供大于等于4个标准。假设电子校准件提供 $n(n \geq 4)$ 个单端口电子标准状态，通过式(3)可以得到得到 n 个方程，用矩阵形式表示如式(4)所示：

$$\begin{bmatrix} 1 & \Gamma_1\Gamma_{m1} & -\Gamma_1 \\ 1 & \Gamma_2\Gamma_{m2} & -\Gamma_2 \\ 1 & \Gamma_3\Gamma_{m3} & -\Gamma_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Gamma_n\Gamma_{mn} & -\Gamma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{DF} \\ E_{SF} \\ E_{DF}E_{SF} - E_{RF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{m1} \\ \Gamma_{m2} \\ \Gamma_{m3} \\ \vdots \\ \Gamma_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将其简化表示为：

$$A \times x = b \quad (5)$$

方程组(5)中由于方程组个数大于未知数个数，该方程组为超定方程组，一般无解，因此我们使用最小二乘法求解该方程组。设方程组最小二乘解为 x ， a_{ij} 为矩阵A的元素， b_i 为向量b的元素。则最小二乘解满足式(6)，使 $F(x)$ 值最小。

$$\min F(x) = (b - Ax)^H (b - Ax) = \sum_{i=1}^n (b_i - \sum_{j=1}^3 a_{ij}x_j)^2 \quad (6)$$

式(6)最小值解是多元函数 $F(x)$ 的驻点，驻点满足：

$$\frac{\partial F}{\partial x_k} = 0, \quad k = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = a_k \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x_k} (Ax) = A_k$$

式中： A_k 表示A的第k列，得到：

$$\frac{\partial F}{\partial x_k} = -A_k^H (b - Ax) - (b - Ax)^H A_k = -2A_k^H (b - Ax) = 0$$

式中： $k = 1, 2, 3$ ，最后可得到单端口误差系数的最小二乘解：

$$x = (A^H \times A)^{-1} A^H b \quad (7)$$

其中： A^H 是A的共轭转置矩阵。最小二乘解的优点是能找到一组符合所有 n 个标准的最佳误差系数解，它减小了个别校准标准定标不准确带来的求解误差。

通过超定方程组误差系数求解过程可以看出，只要电子校准件中 n 个标准的定标具有同样的准确度或者不确定度^[7]，方程组(4)就可以得到较高精度的误差系数。但在定标过程中，由于每个标准特性的差异，在不同的频率范围内每个标准的定标准确度会存在差异。为了获得更高的误差系数求解精度，我们把定标的不确定度用权重因子加权到超定方程组中，每个标准的定标权重因子用 ϵ 表

示。由此得到加权的超定方程组,如式(8)所示:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_1 \Gamma_1 \Gamma_{m1} & -\epsilon_1 \Gamma_1 \\ \epsilon_2 & \epsilon_2 \Gamma_2 \Gamma_{m2} & -\epsilon_2 \Gamma_2 \\ \epsilon_3 & \epsilon_3 \Gamma_3 \Gamma_{m3} & -\epsilon_3 \Gamma_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \epsilon_n & \epsilon_n \Gamma_n \Gamma_{mn} & -\epsilon_n \Gamma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{DF} \\ E_{SF} \\ E_{DF} E_{SF} - E_{RF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \Gamma_{m1} \\ \epsilon_2 \Gamma_{m2} \\ \epsilon_3 \Gamma_{m3} \\ \vdots \\ \epsilon_n \Gamma_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过加权的超定方程组最小二乘解,可以得到更高精度的误差系数项。

下面以 AV20402 电子校准件模块、AV3629 矢量网络分析仪为例进行电子校准误差系数求解实验。用 Agilent E8363C 矢网和 N4693 校准件作为 AV20402 的定标系统,对电子校准件内的电子标准进行定标。AV20402 电子校准件对单端口实现 7 种电子标准状态,其定标曲线如图 4 所示。选取其中 3 个标准状态采用传统的代数法进行误差系数求解、选取 7 个标准状态采用超定方程组进行误差系数求解、选取 7 个标准状态采用加权超定方程组进行误差系数求解。

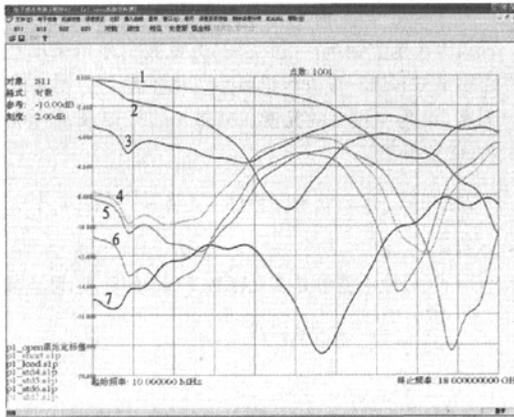


图 4 电子校准件定标曲线

误差系数求解后,以 Agilent N4693 校准过后的误差系数为标准进行剩余误差^[8]计算,得到 3 种误差系数求解算法的剩余误差项,结果如表 1 所示。

表 1 中数据频率范围为 10 MHz~18 GHz,方向性、源匹配剩余误差项为频率范围内剩余误差项的绝对值最小值,反射跟踪为频率范围内剩余误差项的绝对值最大值。通过比较可以看出,加权最小二乘解的剩余误差指标要好于代数法和最小二乘解法。

表 1 剩余误差比较

误差项	求解方法		
	代数法	最小二乘法	加权最小二乘法
方向性(dB)	40	40	47
源匹配(dB)	32	34	40
反射跟踪(±dB)	0.070	0.065	0.047

3 结束语

本文主要介绍了在矢量网络分析仪电子校准中使用超定方程组加权最小二乘法求解误差系数的方法,该算法的关键是在定标过程中确定每个电子标准的不确定度,在实际电子标准的定标过程中要通过高精度的定标系统对电子标准的多次定标确定。只要电子标准具有准确的定标数据及不确定度,电子校准就可以获得优于机械校准的误差系数求解精度。基于电子校准件的矢量网络分析仪校准方法将会获得越来越广泛的应用。

参考文献

- [1] 董树义. 近代微波测量技术[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
- [2] 方红. 机械和电子校准的比较[J]. 国外电子测量技术,2006,25(3): 56-59.
- [3] WONG K H. Characterization of Calibration Standards by Physical Measurement[J]. 39th ARFTG Conference Digest, Volume 21, June 1992: 53-62.
- [4] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [5] David Blackham, Ken Wong. Latest advances in VNA accuracy enhancements [J]. Microwave Journal, 2005,48(7):78-94.
- [6] 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.
- [7] Stumper U. Influence of TMSO calibration standards uncertainties on VNA S-parameters[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2003, 50(2):311-315.
- [8] 郝绍杰,韩晓东. 校准件不完善导致的矢量网络分析仪剩余误差分析[J]. 国外电子测量技术,2008,27(6): 54-56.

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>