

矢量网络分析仪十二项误差校正 模型理论推导

黄斌¹, 魏强², 杨克勇², 袁峻岭²

(1 海军驻成都信息产业部第十研究所军代室, 四川 成都 610054;

2 四川压电与声光技术研究所, 重庆 400060)

摘要: 首先从网络分析仪的测量体系结构入手, 分析测量过程中的误差来源与描述方法, 给出相应的误差校正方法的理论公式。并实测了宽带、低损耗器件在两种状态下的测试差异。最后, 给出误差校正方法的校正结果与分析讨论。

关键词: 矢量网络分析仪; 误差校正; 12 项误差模型

中图分类号: TP393.06

文献标识码: A

文章编号: 1004-4507(2009)09-0010-04

Theoretic Discussion on Tweleth Errors Module of Vector Network Analyzer

HUANG Bing, WEI Qiang, YANG Keyong, YI Junling

(China Navy Force Military Representative Office to chengdu District, Chengdu 610054, China

Sichuan Institute of Piezoelectric and Acousto-optic Technology, Chongqing 400060, China)

Abstract: Starting with the measurement structure of the VNA, this paper analyses source of errors and their descriptions, introduces the basic theories of error correction. Formulas of calibration methods are also proved. Then we build experimental on wide band low loss device under calibration and non-calibration conditions. At last, this dissertation presents calibration results and discussions.

Keywords: Vector Network Analyzer; Error Correction; 12-Errors Module

矢量网络分析可精确表征未知网络的幅度、相位信息。由于接入系统的反射、传输衰减及频率响应等因素会带来很大的误差, 特别对低损耗、大带宽、小反射、高隔离度器件的测试, 误差影响会更甚, 因此误差校正是提高网络分析仪测量精度和速度的关键。

收稿日期: 2009-08-25

1 矢量网络分析仪的基本架构

矢量网络分析仪的基本结构如图 1 所示, 主要由信号源、定向耦合器、微波转换开关组成。测量被测件正向反射 S_{11x} 和传输 S_{21x} 参数时, 转换开关置于 1, 激励信号经过转换开关, 通过被测件, 经另一

转换开关与匹配负载相连。定向耦合器 1 取得参考信号, 定向耦合器 2 取得被测件 1 端口的反射信号, 定向耦合器 3 取得被测件的传输信号。 S_{11x} 的值由存储器 A 中的数值与存储器 R 中的复数数值相比得到。 S_{21x} 的值由存储器 B 中的数值与存储器 R 中的复数数值相比得到。同样, 测量被测件反向反射 S_{22x} 和传输 S_{12x} 时, 转换开关置于位置 2, 采用上述同样的方法即可获得。

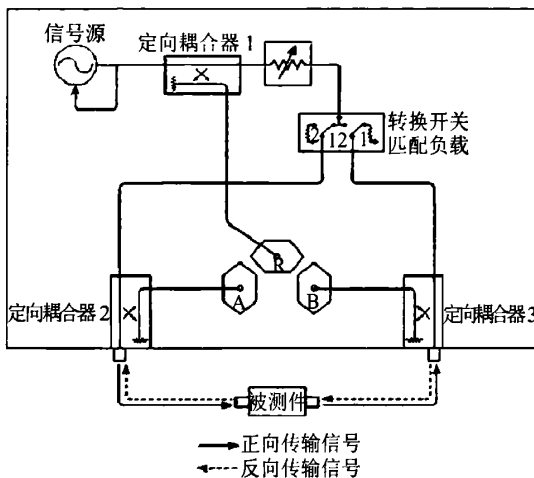


图1 矢量网络分析仪的基本结构

2 网络分析仪的误差模型

任一测量系统的误差可分为系统误差和随机误差。系统误差是最主要的测量不确定度的来源。

图2给出了误差信号影响定向耦合器隔离度的示例。理想的隔离度为 30 dB, 由于负载失配误差 (15 dB) 和 16 dB 的正向耦合度, 会使实际测量值在 24.5~48.9 dB 间变化。

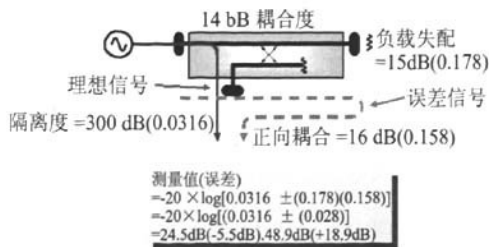


图2 误差信号影响定向耦合器隔离度的示例

网络分析仪测量二端口网络特性的主要系统误差如图3所示。

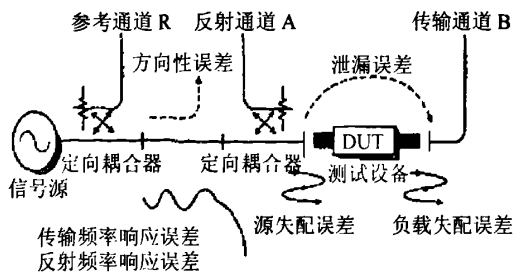


图3 网络分析仪系统误差构成

测量系统的正向误差构成：(1) 方向性误差。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；(2) 泄漏误差。信号源的信号未经测试设备直接进入接收机；(3) 失配误差。测试端口阻抗不匹配引起的源和负载失配；(4) 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频率响应误差。对于二端口网络特性的所有系统测量误差还包括与正向误差相对应的反向误差。

根据图3所示的误差模型和上述分析, 可给出信号流图的 Mason 公式如图4所示, 这即是 12 项误差校准的理论基础。

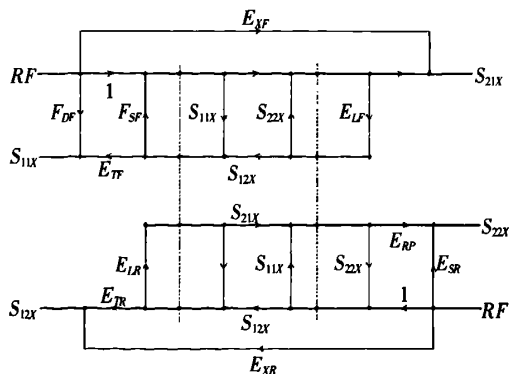


图4 误差信号流图

其中： E_{DF} 和 E_{DR} 为有效方向性误差， E_{XF} 和 E_{XR} 为隔离度误差， E_{SF} 和 E_{SR} 为源失配误差， E_{LF} 和 E_{LR} 为匹配负载失配误差， E_{TF} 和 E_{TR} 为传输跟踪误差，

·测试与测量·

E_{RF} 和 E_{RR} 为反射跟踪误差。图中各误差项的第一个下标表示误差项的性质,如“D”表示 direction 方向性误差;第二个下标表示方向,“F”表示正向激励测量(Forward),“R”表示反向激励测量(Reverse)。

根据 12 项误差模型,由 Mason 法则,可得出测量值 S_M 的解析表达式,其中包含了被测网络的 S 参数 S_X 和模型 12 个误差项:

其中 S_{11M} 、 S_{21M} 、 S_{12M} 和 S_{22M} 是网络分析仪的测量

$$\begin{aligned} S_{11M} &= E_{DF} + \frac{E_{RF} S_{11X} (1 - E_{LF} S_{22X}) + E_{LF} E_{RF} S_{21X} S_{12X}}{1 - E_{SF} S_{11X} - E_{LF} S_{22X} - E_{SF} E_{LF} S_{11X} S_{22X} + E_{SF} E_{LF} S_{21X} S_{12X}} \\ S_{21M} &= E_{XF} + \frac{E_{TF} S_{21X}}{1 - E_{SF} S_{11X} - E_{LF} S_{22X} - E_{SF} E_{LF} S_{11X} S_{22X} + E_{SF} E_{LF} S_{21X} S_{12X}} \\ S_{22M} &= E_{DR} + \frac{E_{RR} S_{22X} (1 - E_{LF} S_{11X}) + E_{LF} E_{RR} S_{21X} S_{12X}}{1 - E_{SF} S_{11X} - E_{LF} S_{22X} - E_{SF} E_{LF} S_{11X} S_{22X} + E_{SF} E_{LF} S_{21X} S_{12X}} \\ S_{12M} &= E_{XR} + \frac{E_{TR} S_{12X}}{1 - E_{SF} S_{11X} - E_{LF} S_{22X} - E_{SF} E_{LF} S_{11X} S_{22X} + E_{SF} E_{LF} S_{21X} S_{12X}} \end{aligned}$$

值, S_{11X} 、 S_{21X} 、 S_{12X} 和 S_{22X} 是被测网络“真实”的 S 参数,对上述方程稍加变换,即可得 S_{11X} 、 S_{21X} 、 S_{12X} 和 S_{22X} 的表达式:

由此,误差校准问题转化为找出 12 个误差项,

$$\begin{aligned} S_{11X} &= \frac{\left[\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \left(1 + \frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} E_{SR} \right) - \left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} \right]}{D} \\ S_{22X} &= \frac{\left[\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \left(1 + \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) E_{SR} - \left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LR} \right]}{E_{RF}} \\ S_{21X} &= \frac{\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left[1 + \frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} (E_{SR} - E_{LF}) \right]}{D} \\ S_{12X} &= \frac{\left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) \left[1 + \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} (E_{SF} - E_{LR}) \right]}{D} \\ D &= \left(1 + \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} E_{SF} \right) \left(1 + \frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} E_{SR} \right) - \left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} E_{LR} \end{aligned}$$

从而得到 12 个线性无关的方程组,通过解该方程组求出网络的真实 S 参数的数学问题。

3 12 项误差校正方法

目前最为通用校正方法是 SOLT 法,即短路器、开路器、匹配负载、直通法。在校正件特性理想的情况下,短路器反射为 -1,开路器反射为 1,匹

配负载反射为 0,直通时反射为 0,传输为 1。把这些元件接入到测量系统中得到 12 个方程。具体过程为:

① 测量 S_{11} 时,两端口接全匹配负载,即:

$$S_{11X} = S_{21X} = S_{12X} = S_{22X} = 0, M_1 = S_{11} = E_{DF}$$

② 测量 S_{11} 时,两端口接短路器,即:

$$S_{11X} = S_{22X} = -1, S_{21X} = S_{12X} = 0$$

$$M_2 = S_{11M}^S = E_{DF} + \frac{(-1)E_{RF}}{1 - (-1)E_{SF}}$$

③ 测量 S_{11} 时,两端口接开路器,即:

$$S_{11X} = S_{22X} = 1, S_{21X} = S_{12X} = 0$$

$$M_3 = S_{11M}^O = E_{DF} + \frac{(+1)E_{RF}}{1 - (+1)E_{SF}}$$

④ 测量 S_{21} 时,两端口接全匹配负载,即:

$$S_{11X} = S_{21X} = S_{12X} = S_{22X} = 0, M_4 = S_{21} = E_{XF}$$

⑤ 测量 S_{21} 时,两端口直通,即:

$$S_{11X} = S_{22X} = 0, S_{21X} = S_{12X} = 1$$

$$M_5 = S_{21M}^T = E_{XF} + \frac{E_{TF}}{1 - E_{SF} E_{LF}}$$

⑥ 测量 S_{11} 时,两端口直通,即:

$$S_{11X} = S_{22X} = 0, S_{21X} = S_{12X} = 1$$

$$M_6 = S_{11M}^T = E_{DF} + \frac{E_{LF} E_{RF}}{1 - E_{SF} E_{LF}}$$

⑦ 测量 S_{22} 时,两端口接全匹配负载,即: $S_{11X} = S_{21X} = S_{12X} = S_{22X} = 0$

$$M_7 = S_{22} = E_{DR}$$

⑧ 测量 S_{22} 时,两端口接短路器,即: $S_{22X} = S_{22X} = -1, S_{21X} = S_{12X} = 0$

$$M_8 = S_{22M}^S = E_{DR} + \frac{(-1)E_{RR}}{1 - (-1)E_{SR}}$$

⑨ 测量 S_{22} 时,两端口接开路器,即: $S_{11X} = S_{22X} = 1, S_{21X} = S_{12X} = 0$

$$M_9 = S_{22M}^O = E_{DR} + \frac{(+1)E_{RR}}{1 - (+1)E_{SR}}$$

⑩ 测量 S_{22} 时,两端口接全匹配负载,即:

$$S_{11X} = S_{21X} = S_{12X} = S_{22X} = 0$$

$$M_{10} = S_{22M}^T = E_{XR}$$

⑪ 测量 S_{12} 时,两端口直通,即:

$$S_{11X} = S_{22X} = 0, S_{21X} = S_{12X} = 1$$

$$M_{11} = S_{12M}^T = E_{XR} + \frac{E_{TR}}{1 - E_{SF} E_{LR}}$$

⑫ 测量 S_{22} 时,两端口直通,即:

$$S_{11X}=S_{22X}=0, S_{21X}=S_{12X}=1$$

$$M_{12}=S_{22M}^T E_{DR} + \frac{E_{TR} E_{RR}}{1-E_{SR} E_{LR}}$$

通过上面 12 个方程,可以解出 12 项误差。前向误差:

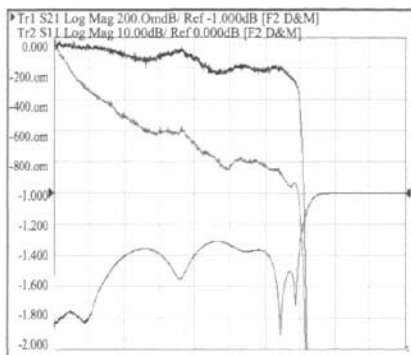
$$E_{DF}=M_1, E_{RF}=\frac{2(M_1-M_2)(M_3-M_1)}{M_3-M_2}, E_{SF}=\frac{M_3+M_2-2M_1}{M_3-M_2}$$

$$E_{XF}=M_4, E_{LF}=\frac{M_6-M_1}{E_{SF}(M_6-M_1)+E_{RF}}, E_{TF}=(M_5-M_4)(1-E_{SR}E_{LF})$$

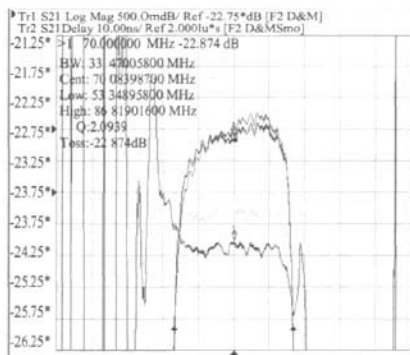
后向误差:

$$E_{DR}=M_7, E_{RR}=\frac{2(M_7-M_8)(M_9-M_7)}{M_9-M_8}, E_{SR}=\frac{M_9+M_8-2M_7}{M_9-M_8}$$

$$E_{XR}=M_{10}, E_{LR}=\frac{M_{12}-M_7}{E_{SR}(M_{12}-M_7)+E_{RF}}, E_{TR}=(M_{11}-M_{10})(1-E_{SR}E_{LR})$$



(a) 滤波器校准与未校准的差异



(b) 测试滤波器中高度和群时延在校准前后的差异

图 5 滤波器在校准前后的测试曲线

图 5(a)滤波器校准后实际损耗为 0.4 dB,未校准时为 1 dB,存在较大差异。图 5(b)给出了测试滤波器幅度和群时延在校准前后的差异,校准后和未校准时群时延误差为 10 ns。

5 小结

误差校正系统是网络分析仪研究的核心问题。新型的网络分析仪配合电子校准 ECal 等新技术极大提高了网络分析仪的灵活性和适应能力。本文仅对二端口误差模型作了推导,更多端口模型涉及到复杂的信号流图方程组,误差校正高次方程组的数学求解问题和一些针对实际工程测量中的特殊实验需要继续深入研究。

求出 12 项误差后,就可以把 12 项误差代回到校正值 S_{11X} 、 S_{21X} 、 S_{12X} 和 S_{22X} 的表达式中,利用测量值 S_{11M} 、 S_{21M} 、 S_{12M} 和 S_{22M} 来得出“真实值”,即校正值 S_{11X} 、 S_{21X} 、 S_{12X} 和 S_{22X} 。至此我们完成 12 项误差模型下的标准件误差校正公式推导。

4 测试实例

图 5 给出了测试低损耗、大带宽两个典型滤波器在校准前后的测试差别。采用 Agilent 公司的 E5071B 网络分析仪,测试点数 1601,中频带宽 15 kHz。

参考文献:

- [1] 李立功.现代电子测试技术(第二版)[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 库姆斯(美)著,张伦译,电子仪器手册(第三版)[M].北京:科学出版社,2006.
- [3] 黄东.矢量网络分析仪误差校正系统构建[D].电子科技大学,2005.
- [4] 祝宁华,王幼林,陈振宇.微波网络分析仪的校准[J].中国科学 E 辑技术科学[J],2004,34(3):329-336.
- [5] Silvonen K J. Calibration of test fixtures using at least two standards". IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1991,39(4):624-630.
- [6] Zhu N H, Qian C, Wang Y L, et al. Frequency limitation in the calibration of microwave test fixtures[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003,51(9):2000-2006.

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>