

# 矢量网络分析仪的校准方法

## Calibration Methods of Vector Network Analyzers

刘宏(中国电子科技集团公司第四十一研究所,山东 青岛  
266555)

Liu Hong(The 41<sup>st</sup> Institute of CETC, Shandong Qingdao 266555)

**摘要:** 该文简单介绍矢量网络分析仪的工作原理,重点阐述误差修正原理以及与误差修正相关的校准件、校准方法和如何进行校准质量的评估。

**关键词:** 矢量网络分析仪;校准方法;误差修正

**中图分类号:** TM935

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1003-0107(2011)07-0071-03

**Abstract:** This paper simply introduces the working principle of vector network analyzer, mainly elaborates error-correction principle and calibration kits and calibration methods about error-correction, given some methods how to evaluate calibration quality.

**Key words:** Vector Network Analyzer; Calibration Methods; Error Correction

**CLC number:** TM935

**Document code:** B

**Article ID:** 1003-0107(2011)07-0071-03

## 1 引言

矢量网络分析仪(以下简称矢网)主要用于测量器件和网络的反射特性和传输特性,是一种高性能的智能化测量仪器,它集成了现代微波技术、电子技术和计算机技术,将激励信号源、S参数测试微波电路和幅相接收机有机地结合起来,使其测量速度、测量精度和智能化程度都达到了很高的水平。

矢网测量误差分为随机误差和系统误差两类。随机误差是不能修正的,它是由不可重复的误差项构成,影响量在时间和空间上都是随机的,其变化也是随机的;系统误差是可以进行定量表述,或估计修正值予以修正的,其影响量的变化一般都比较稳定。消除矢网的系统误差一般通过校准来实现,即通过测量已知的标准件,利用测量结果来表征系统,以消除分析仪的系统误差,达到提高测量精度的目的。因此,在实际测量的过程中,选择正确的校准方法,是保证矢网测量精度的前提。

## 2 矢网的工作原理

矢网由合成信号源、S参数测试装置、幅相接收机及显示等四部分组成,其工作原理为:合成信号源产生扫频信号,该信号与幅相接收机中心频率实现同步扫描;S参数测试装置用于分离被测件的入射信号R、反射信号A和传输信号B;幅相接收机将射频信号转换成频率固定的中频信号,为确保矢网在进行频率变换的过程中,被测信号幅度与相位信息不得丢失,采用系统锁相技术;显示部分将测量结果以各种形式显示出来。矢网原理框图如图1所示。

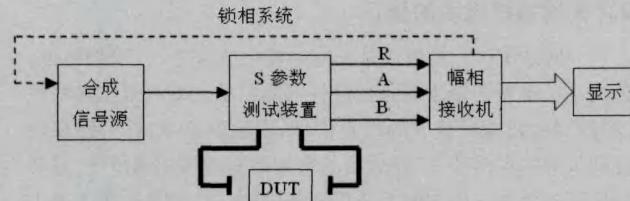


图 1 矢量网络分析仪原理框图

## 3 矢网的误差修正

### 3.1 系统误差模型的建立

矢网的系统误差是由仪器的硬件电路性能指标不理想所引起的,这些误差与矢网的信号泄漏、信号反射和频率响应有关,概括起来有六种类型,即与信号泄漏有关的方向误差和串扰误差、与反射有关的源失配和负载阻抗失配误差、由测试接收机内部的反射和传输跟踪引起的频率响应误差。

对于硬件指标不完善的矢网,可以等效为一个理想的矢网与测量参考面直接按插入一个两端口的误差适配器,这个误差适配器的参数即表征矢网所有的系统误差。二端口网络有两个参考面,因此包含了两个误差适配器,也就是对于被测网络的正向S参数和反向S参数测试,各需要一个误差适配器。目前,在矢网中应用最多的误差模型,包含12个系统误差项。图2所示为矢网全双端口12项误差模型,其中图2(a)所示是正向测量S11X、S21X的误差模型,图2(b)所示是反向测量S12X、S22X的误差模型。

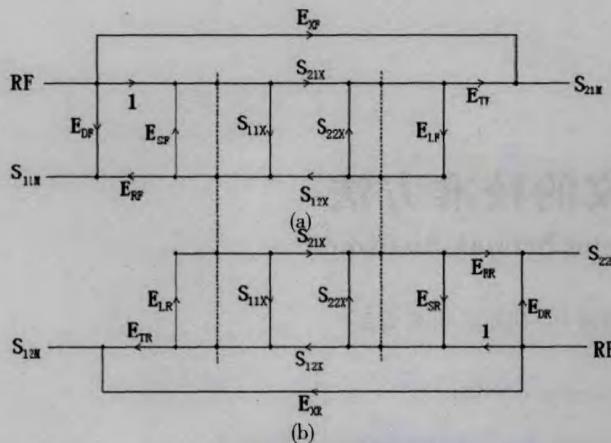


图 2 双端口 12 项误差模型

双端口网络有 4 个 S 参数,需要用反射和传输测量系统将它们同时测出,图 2 中虚线之间部分为待测的双端口网络,其 S 参数为  $S_{11X}$ 、 $S_{21X}$ 、 $S_{12X}$ 、 $S_{22X}$ ,脚标 "X" 表示 "真实值",即校正值;图 2 中的  $S_{11M}$ 、 $S_{21M}$ 、 $S_{12M}$ 、 $S_{22M}$  为被测网络的测量值;脚标 "F" 表示正向测量,"R" 表示反向测量。12 项误差为:有效方向性误差  $EDF$ 、 $EDR$ ,隔离度误差  $EXF$ 、 $EXR$ ,等效源失配误差  $ESF$ 、 $ESR$ ,等效匹配负载失配误差  $ELF$ 、 $ELR$ ,传输跟踪误差  $ETF$ 、 $ETR$ ,反射跟踪误差  $ERF$ 、 $ERR$ 。

### 3.2 矢网系统误差的修正

矢网系统误差的修正是矢网的核心技术之一。确切地说,矢网系统误差的修正就是通过矢网的校准,即测量已知特性的校准件,依据所建立的误差模型,提取误差项,并将结果储存在矢网的存储器里,在后续的未知被测网络的测量中,只要使用误差修正,则矢网系统误差的影响将从测量结果中被去除,即消除了矢网系统误差的影响。由此可见,矢网的校准其实是将校准件的测量精度转移到矢网,使矢网的测量精度取决于所使用的校准件的精度和所选用的校准方法,从而达到提高矢网测量精度的目的。

## 4 矢网系统误差的校准方法

### 4.1 校准件

#### 4.1.1 机械校准件

由图 2 所示矢网的误差模型可知,矢网正、反向共有 12 个误差项,要解出这些未知量,需要提供 12 个已知条件,而矢网的校准就是通过测量已知特性的校准件,求得这 12 项误差。

校准件即为标准件,其技术指标是可表征的且是已知的。常用的校准件有开路器、短路器、固定匹配负载、滑动匹配负载和精密空气线等,根据精密度的不同可将校准件分成经济型、标准级、精密级三个级别。经济型校准件主要有开路器、短路器和固定匹配负载;标准级校准件主要有开路器、短路器和滑动匹配负载;精密级校准件主要有开路器、短路器、低频固

定负载和精密空气线。每一个校准件都有严格的数学定义,该数学定义通常存放在磁盘中供矢量网络分析仪调用。校准时应根据实际使用校准件的类型在矢量网络分析仪设置中进行相应的选择。

### 4.1.2 电子校准件

由于机械校准件校准过程不仅费时费力,还要求操作者具有一定的技能,才能将人为的操作所引入的误差降到最低,电子校准件(Electronic Calibration,简称 Ecal)应运而生。

Ecal 又称为电子校准模块,其模块示意框图如图 3 所示,只需一次连接就可获得误差模型的所有误差项,这个过程约为一分钟,使得 VNA 校准实现自动化和实时化;它由具有已知值的若干个反射阻抗状态和至少一个传输阻抗状态组成,通过其电子开关将校准标准自动连接到 VNA 的测试端口,其中反射阻抗仍为开路器、短路器、负载等,传输阻抗仍为直通传输线;它由微带传输线来实现,通过同轴微带转换器输出,其内部包含控制电路、多状态阻抗网络以及含有表征电子校准模块特性的非易失存储器。

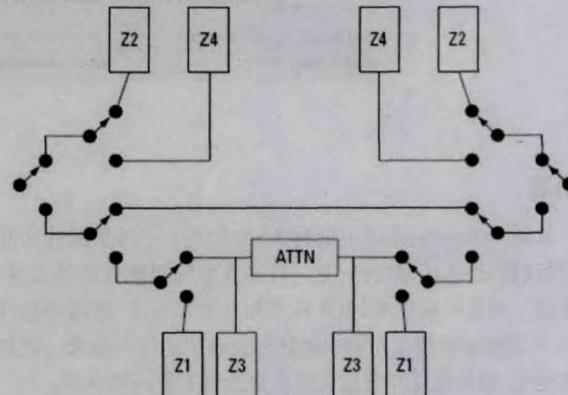


图 3 Ecal 模块示意框图

Ecal 阻抗状态往往多于十二项误差模型所要求的标准状态,因此可通过最小二乘法解超定方程组来获得系统误差项,使提取的系统误差项更准确。Ecal 模块是一种传递标准,依赖于机械校准件对其进行定标,当然对其定标时所使用的机械校准件的精度和定标方法越精密,其精度越高,校准后的系统精度也越高。

### 4.2 常用的校准方法

不同的校准方法校准的误差项是不相同的,选择合适于被测器件的校准方法很重要。矢网的校准方法很多,下面给出通常使用的几种:

(1)全双端口校准(SOLT 校准):修正正反两个方向的方向性、串扰、源匹配、负载匹配、反射跟踪和传输跟踪各六个误差项,总共 12 项误差;适应对双端口器件进行高精度的传输、反射测量中;使用短路器、开路器、负载和直通(隔离时采用两个负载)。

(2)TRL 校准:修正正反两个方向的方向性、串扰、反射跟踪和传输跟踪各 4 个误

下转 77 页

10%);

——短路电流 ( $P_{k1}$  值, 如图 1 所示): 输出阻抗  $12\Omega$  时  $333A \pm 10\%$ ; 输出阻抗  $30\Omega$  时  $133A \pm 10\%$ ;

——与电源频率的相位关系: 在  $0^\circ$  到  $360^\circ$  范围之间, 与被测设备交流的相位角相关, 误差  $\pm 10^\circ$  ;

——第一半周期的极性: 正和负。

当以线对线方式对 EUT 的控制及信号端口进行试验时, 试验信号发生器输出端必须浮地, 而以线对地方式对电源端口以及控制和信号端口进行试验时则不必浮地。试验信号发生器必须采取措施, 防止可能注入到电源网络并影响测试结果的强骚扰。

与旧版标准相比较, 新版标准所规定的试验信号发生器的特性主要在衰减、可切换输出阻抗, 短路电流(最小峰值)等几个方面发生了改变。

试验信号发生器的阻抗应尽量接近对应线路(电源线、信号和控制线、通信线)末端到骚扰源的阻抗值。旧版标准中试验信号发生器的输出阻抗可选为  $12\Omega$ 、 $30\Omega$ 、 $200\Omega$ , 对于输入输出端口试验, 选择  $200\Omega$  阻抗是一个折衷, 这是考虑到当频率范围高于  $100kHz$  且长度为百米量级时, 所使用电缆(双绞线)特征阻抗的范围为  $120\Omega$  到  $150\Omega$ , 而对于端口阻抗值数量级为几百或几千欧姆或更高的 EUT 施加试验电压, 试验信

号发生器阻抗选择  $200\Omega$  代替  $120\Omega$ 、 $150\Omega$  并无差别。由于现行试验多包含保护装置或滤波器, 故在新版标准中删除了  $200\Omega$  的可选输出阻抗。

由于试验信号发生器的输出阻抗发生了变化, 故短路电流发生变化, 故删除了: 输出阻抗  $200\Omega$  时  $20A \pm 10\%$ 。

### 3.5 试验步骤

本部分内容与旧版标准相比, 更加细化, 明确。表现为: 增加了在测试前应检查测试设备的性能的要求、删除了最长时间间隔的要求内容、增加了其他重复率和限值要求由产品标准或产品规范给出等内容。

## 4 结束语

新版标准系 EMC 系列标准的基础标准, 对增强产品的电磁兼容性能, 提高产品抗干扰能力起着重要的指导作用, 有利于促进经济发展和国际贸易。新版标准的颁布实施, 将会产生巨大的社会效益和经济效益。建议在国家标准委和国家产品强制认证机构的领导下, 依据有关法律法规, 将新版标准制定的方法, 组织检测机构进行交流比对, 以进一步提高检测工作的科学性和准确性。

上接 72 页

差项, 共计 8 项误差; 适用于非同轴环境下的器件的传输或反射测量; 使用直通、反射、空气线或者直通、反射、匹配负载等。

(3) 单端口校准: 修正方向性、源匹配和反射跟踪三个误差项; 适应任何单端口器件或匹配好的双端口器件; 使用短路器、开路器、负载。

(4) 响应校准: 仅修正传输跟踪或反射跟踪的一个误差项; 例如直通响应只修正传输跟踪, 仅使用直通件, 开路响应、短路响应只修正反射跟踪, 分别使用开路器、短路器。

(5) 响应与隔离校准: 修正传输跟踪和串扰两个误差项; 适用于任何方向上的传输测量, 以及需要通过隔离校准提高系统的动态范围的测量; 传输校准使用直通件、反射校准采用开路器(或短路器)、负载。

## 5 矢网校准质量的评估

评估矢网校准质量的重要方法是校验。所谓校验就是采用一些 S 参数已知的器件, 一般称为校验件, 作为标准, 通过分析矢量网络分析仪测量校验件的测量值和校验件标称值的偏离程度, 评估校准件和矢量网络分析仪的性能质量。通常所用的校验件有 50 欧姆空气线、25 欧姆空气线、20dB 固定衰减器、40dB 固定衰减器。在校验过程中, 考虑到影响矢量网络分析仪的因素有很多, 只要有一次通过, 则认定该套校准件通过

校验。

从原则上讲, 为保证矢网的测量精度, 每校准一次大约使用 40 分钟至 1 小时的时间。在没有校验件的情况下, 可以将首件测试的未知被测网络, 在 40 分钟后再测量一次, 比对两次的测量结果, 如果偏差不大即可认为矢网处于稳定状态, 先前测试的结果是有效的。否则, 应当及时查明原因, 以保证被测网络的测量结果的有效性。

## 6 结束语

综上所述, 依据未知被测网络的特性, 正确设置矢网的测量参数, 综合考虑矢网在校准过程中应注意的问题, 选择合适的校准方法和一定精度的校准件, 才能确保达到既能满足测量精度要求又能提高测量效率的目的。

## 参考文献:

- [1] Agilent Technologies Network Analyzers User's Guide[Z].
- [2] 申萍, 姚予疆. 数字通信测量仪器[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [3] 刘宏. 电子行业 ISO9000:2000 质量管理要诀[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

## 微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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量测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悉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悉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>