

# 矢量网络分析仪的测量精度

唐宗魁 张佩叶

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 山东 青岛 266555)

**[摘要]**矢量网络分析仪具有强大的测试功能,其测量精度主要取决于校准标准件的性能、误差修正技术所决定,本文分别讨论了这两方面对矢量网络仪测量的影响。

**[关键词]**初始指标;校准标准件;误差修正技术

Test Stability and Precision of Vector Network Analyzers

Tang Zongkui

(The 41st Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Qingdao, 266555)

**[Abstract]**The Vector Network Analyzers have mighty test function, it's test precision and stability dependent upon raw performance of the microwave hardware, the performance of calibration standards and the quality of the error-correction technique. In this paper, these two facets about the vector network analyzer's test are discussed.

**[Key words]**raw performance; calibration standards; error-correction technique

## 1. 误差的来源

所有的测量(包括矢量网络分析仪测试系统)都包含三类测量误差:系统误差、随机误差、漂移误差。大多数误差来源于系统误差,系统误差是由测试设备和测试装置的不完善所引起的。若这些误差不随时间变化,则它们可以通过校准来表征,且可以在测量过程中用数学处理方式予以消除。网络测量中所涉及的系统误差与信号泄漏、信号反射和频率响应有关。即被测件的不匹配和泄漏、测试信号通道和参考信号通道的隔离、系统频率响应造成的重复性误差,这些误差是可以通过校准消除的,校准后的指标反映了矢量网络分析仪的测量精度。随机误差以随机方式随时间变化,由于其不可预测,所以不可通过校准来消除。对随机误差起主要影响的因素是仪器噪声(如取样器和中频本底噪声)、开关和连接器的重复性。漂移误差包括频漂、温漂和测试装置校准和测量中的其他物理变化,测量稳定性主要来源于漂移误差,由矢量网络分析仪的初始指标、校准标准件的性能和误差修正模式决定。本文将重点讨论矢量网络分析仪的测量精度。

## 2. 矢量网络分析仪的测量精度

理想的测试设备才无需校正。矢量网络分析仪具有强大的测试功能,但是矢量网络分析仪的硬件不可能是理想的,难以给出绝对理想的测量结果,因此在使用过程中往往通过误差修正技术以补偿硬件的不完美,提高矢量网络分析仪的测量精度。

### 2.1 矢量网络分析仪的系统误差

在大多数高频测量中,系统误差是测量不确定性的最重要来源,系统误差能够被量化出来,因而能够被修正从而消除对测试结果的影响。主要有6种类型的系统误差,与信号泄漏有关的方向性误差和串扰误差,与反射有关的源匹配误差和负载匹配误差,与频率响应有关的传输跟踪误差和反射跟踪误差。

#### 2.1.1 方向性

矢量网络分析仪中要用到一个定向器件(定向桥或定向耦合器)来分离正向的传输波和反向的反射波,它用来检测来自被测件的反射信号。理想的定向耦合器能够完全地从入射信号中分离反射信号,只有反射信号出现在耦合输出端,如图1(a);然而,实际的耦合器不可能是理想的,如图1(b)所示。

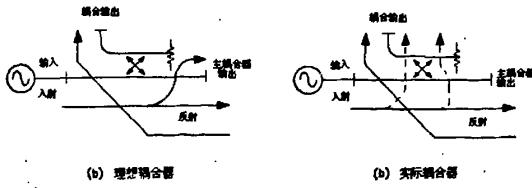


图1 方向性

由于泄漏,小部分的输入信号会传输到耦合输出端,另外,从耦合器的主路输出口也会有少量反射信号到耦合器的输出端,给测量结果

带来不确定因素。方向性是定向器件最重要的品质因数,它表明了一个定向器件能够分离正反向行波的良好程度。方向性愈大,其分离信号的能力愈好。系统方向性是出现在网络分析仪接收机输入端口的泄露信号的矢量和。它是反射测量中产生测量不确定度的主要因素,尤其对于反射较小的器件测量是主要的误差来源。

#### 2.1.2 源匹配

由于测试装置和信号源之间以及转接器和电缆之间负载不匹配,会出现在信号在信号源和被测件间多次反射。如图2所示,在反射测量中,源匹配误差信号是由DUT反射的部分信号经信号源反射回DUT再由DUT反射的信号。在传输测量中,源匹配误差信号是由测试装置反射到信号源再由信号源反射回来的信号。源匹配愈大,误差愈小。

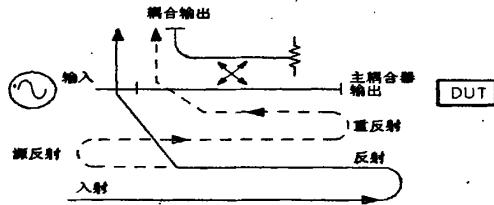


图2 源匹配

由源匹配引起的误差都取决于测试装置输入阻抗和信号源的匹配程度,是反射测量和传输测量不确定因素之一。

#### 2.1.3 负载匹配

负载匹配是由于测试端口的输出端不是理想匹配而造成的,即被测件的输出端口和测试系统的端口2的阻抗不匹配。如图3所示,一部分传输信号由端口2反射回被测件,反射信号一部分再次反射回到端口2,一部分通过被测件作为反向信号进入1口,如被测件插损小,则由端口2反射的信号和由源再次反射的信号会造成很大的误差,因为反射信号经过被测件时衰减很小。通常用回波损耗来表征负载匹配,回波损耗值愈大,误差愈小。

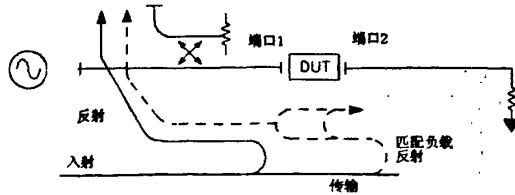


图3 负载匹配

负载匹配带来的误差既影响传输测量也影响反射测量,误差的大小取决于测试元件的输出端和2口的阻抗匹配。当测试元件的插损大于6dB时,源匹配和负载匹配通常可以忽略,因为误差信号每次通过

被测件时都衰减了很多。然而,在传输测量中,对于高反射输出端口和小插损的元件来说,负载匹配是主要的误差来源。

#### 2.1.4 隔离(串扰)

如同方向性在反射测量中带来的误差,网络分析仪信号传输通道的能量泄露给传输测量带来误差。隔离是由于参考和测试通道信号之间的干扰而出现在分析仪数字检波器处的信号的矢量和,包括测试装置内的信号泄漏和接收机的 RF 和 IF 部分的信号泄漏。

隔离带来的误差取决于被测件的特性。隔离会给高损传输测量带来误差,但对大多数测量来说,隔离影响是很小的,因而无须修正。对于测量大动态范围的器件,通过隔离校准可以提高测试精度。

#### 2.1.5 频率响应(跟踪)

频率响应是由于测试系统各装置的频率响应不恒定而引起信号幅度和相位随频率变化而变化的矢量和。这些变化包括信号分离器、测试电缆、转换器以及参考通道和测试通道之间的频率响应变化。跟踪误差是传输测量和反射测量中不确定因素之一,它与被测件的特性无关。

如上所述,矢量网络分析仪的系统误差主要为方向性、源匹配、负载匹配、隔离、传输跟踪和反射跟踪,每种误差又包括正向和反向两种,因此矢量网络分析仪共包括 12 种系统误差。

#### 2.2 误差修正技术分类

常用的误差修正包括两种基本类型,响应(归一化)校准和矢量校准。

响应校准的执行过程比较简单,但只能修正 12 种系统误差项的少数几种,能有效去除传输测量和反射测量中测试装置的频率响应误差。响应校准是一种归一化的测量,只能测量匹配良好的器件,对于精度要求不高的测量是最简单的一种校准方法。

矢量校准是通过对已知校准标准进行测量,将这些测量结果存储到仪器内部存储器上,利用这些数据来计算误差模型,然后利用误差模型从后续测量中去除系统误差的影响。这个校准过程考虑了所有的主要系统误差源,并能够进行极其精确的测量。但是,它较响应校准需要更多的测量标准和测量步骤。矢量误差修正的主要包括单端口校准和二端口校准。

单端口校准能测量并去除反射测量中的方向性、源匹配和反射跟踪三项系统误差。这三项误差可以由普遍方程导出,而普遍方程可借助于三个未知数的三个联立方程求解。为了建立这三个联立方程,必须测量三个已知的校准标准,如开路器、短路器和负载。对方程求解可给出系统误差额项,并由此导出被测器件的实际反射 S 参数。

测量二端口器件时,单端口校准假定在被测器件未使用端口处有良好的终端,如连接一个标准负载,则单端口校准十分精确。但是,如过被测件的 2 个端口都要连接到网络分析仪且其反向隔离度很小

(如,滤波器或低损耗电缆),则其就没有良好的终端负载。在这种情况下,二端口校准后的测量精度就会比单端口校准好得多。这是由于二端口校准考虑了所有主要的系统误差源而给出的最精确的结果,可以得到正、反方向上的 4 个 S 参数。

#### 2.3 校准标准件对测量精度的影响

校准标准件必须是已知的,如果校准标准件的数学模型与实际不符,将给校准和测量带来误差。

校准标准件一般至少包括开路器、短路器、匹配负载各一件,其中匹配负载理想情况下回波损耗为无穷大,现实情况下负载回波损耗越大校准后测量精度越高,系统越稳定;理想短路器终端反射系数幅度为 1,相位为 180°,但现实中 3.5mm 短路器和 N 型短路器由于校准面和终端反射面之间存在偏移长度,从而引起一定的电延迟,同时也存在一定的损耗;理想开路器终端反射系数幅度为 1,相位为 0°,但现实中 3.5mm 短路器和 N 型短路器由于校准面和终端反射面之间存在偏移长度,从而引起一定的电延迟,同时也存在一定的损耗,同时同轴开路器由于同轴线突然中断,存在边缘电容,一般采用频率的三次多项式拟合边缘电容曲线:

$$C = (C_0) + (C_1 \times F) + (C_2 \times F^2) + (C_3 \times F^3)$$

由偏移长度引起的电延迟、损耗以及边缘电容均会对反射系数的相位和幅度产生一定的影响,因此,校准标准件的各项参数越接近其真实值,测量越精确,系统越稳定。

#### 3. 总结

网络分析仪提供了去除某些或全部系统误差的各种校准方法。更高的校准精度,意味着测量更多的校准标准,修正误差多的校准方法所花费的时间更多,还可能延长测量时间。因此,用户需要在所要求的测量精度与测试过程速度之间作折衷考虑,选择即能满足测量精度的要求又能提高测量效率的最佳校准方法。

#### 【参考文献】

- [1] Agilent Technologies Inc.HP8753ES Network Analyzers User's Guide.
- [2]《现代通讯测试仪器》.军事科学出版社出版.
- [3]《数字通信测量仪器》.人民邮电出版社.
- [4]《计算开路器边缘电容的简单方法》.梅子扬,年夫顺.

**作者简介:**唐宗魁,1997 年毕业于西安电子科技大学,工程师,主要从事微波功率计和网络分析仪的科研与生产工作。

张佩叶,1998 年毕业于西北工业大学,工程师,主要从事网络分析仪的科研与生产工作。

**[责任编辑:田瑞鑫]**

(上接第 69 页)知书中去了。这种“巧用 excel 快速插入表头”的方法应用很广泛,比如说还可以用于职工的工资条的打印等等。

#### 【参考文献】

- [1] 路炜,河北师范大学附属民族学院,助教,工学学士学位,主要研究方向是计算机教育。

[2] 杜子卓,河北工业职业技术学院,助教,工学学士学位,主要研究方向是计算机教育。

[3] 刘笑,河北师范大学,在读硕士,主要研究方向是计算机图像处理。

**[责任编辑:韩铭]**

(上接第 74 页)信息系统提供了一种进行需求分析和设计的方法,为网络安全分析设计人员提供了网络攻击的结构化的、可重用的描述途径,使设计人员可以充分利用已有的数据来开发新的更加安全的系统。缓冲区溢出攻击的攻击树模型详细说明了缓冲区溢出攻击的原理。网络安全分析设计人员借此可以针对系统弱点建立更加安全的系统。

#### 【参考文献】

- [1] 蒋朝辉,Internet 安全技术.国防工业出版社,2005.
- [2] James C. Foster 缓冲区溢出攻击—检测、剖析和预防.清华大学出版社,2006.

[3] B Schneier. Attack tree: Modeling security threats[J]. Dr Dobb's Journal, 1999.

[4] 卢继军,黄刘生,吴树.基于攻击树的网络攻击建模方法[J].计算机工程与应用,2003.

[5] Andrew P M, Robert J E, Richard C L. Attack modeling for information security and survivability [R]. Pittsburgh: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2001.

[6] 李恒华,田捷,常玲,杨鑫.缓冲区溢出攻击和防御措施.计算机工程与应用,2003.

**[责任编辑:翟成梁]**

## 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>