

# 矢量网络分析仪的测量精度和测量稳定性

孙声雯

中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术国家重点实验室(266555)

**摘要:** 矢量网络分析仪具有强大的测试功能,其测量精度和测量稳定性主要取决于校准标准件的性能、采用的误差修正技术和微波件的初始指标所决定,本文分别讨论了这三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

**Abstract:** The Vector Network Analyzers have mighty test function, its test precision and stability depend upon raw performance of the microwave hardware, the performance of calibration standards and the quality of the error-correction technique. In this paper, these three respects about the vector network analyzer test are discussed.

**Keywords:** Raw performance, calibration standards, error-correction technique.

### 测量误差的来源

矢量网络分析仪测试系统包括三类测量误差:系统误差、随机误差、漂移误差。大多数误差来源于系统误差,即由于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,主要由校准标准件的性能和所采用的误差修正模式。系统不能测量和校准非重复性的随机误差和漂移误差。这些误差对反射和传输测量都有影响。随机误差是由于噪声和连接器的重复性而产生的,是变化的。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和稳定性。

### 矢量网络分析仪的测量精度

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完美无缺的,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。

#### 1. 矢量网络分析仪的系统误差分类

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。为准确修正矢量网络分析仪的系统误差,把系统误差具体归为以下几类:方向性、源匹配、负载匹配、隔离(串扰)和频率响应(跟踪)。每一个系统误差描述如下:

##### (1) 方向性

通常有一些器件(定向桥或定向耦合器)能够从正向传输波中分离出反向波,它用来检测来自被测件的反射信号。理想情况下,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。

小部分的输入信号会泄露到耦合输出端,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。判断耦合器分离正反向信号的好坏用方向性表示。方向性愈大,分离信号愈好。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。由方向性引起的误差与测试装置的特性无关,对于反射较小的器件测量是主要的误差来源。

##### (2) 源匹配

源匹配是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而出现在接收机输入端口的信号的矢量和。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

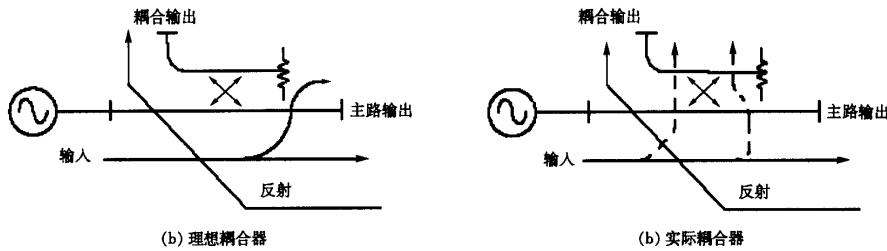


图 1 理想耦合器和实际耦合器

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。源匹配愈好，误差愈小。

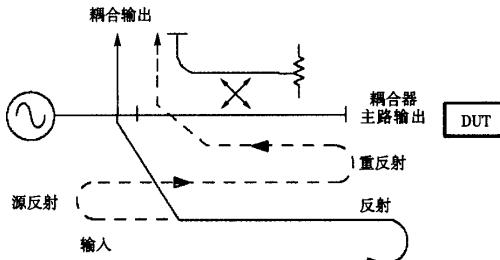


图 2 源匹配

无论是反射测量还是传输测量，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。测试端面的阻抗不匹配愈大，带来的误差愈大。

### (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 2 口，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 2 口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。

负载匹配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的元件来说，负载匹配是主要的误差来源。

### (4) 隔离(串扰)

如同方向性在反射测量中带来的误差，网络分

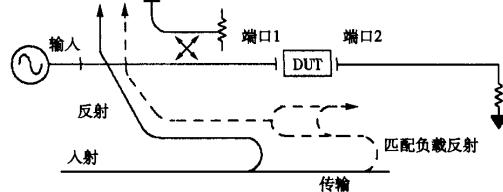


图 3 负载匹配

析仪信号传输通道间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，使测试仅仅受噪声基底的限制。

### (5) 频率响应(跟踪)

频率响应是所有测试装置的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件、测试电缆、转接器以及参考通道和测试通道之间的变化。频率响应包括传输响应和反射响应，既影响传输测量也影响反射测量。

如上所述，矢量网络分析仪的系统误差包括方向性、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. 误差修正技术分类

常用的误差修正包括响应校准、响应与隔离校准、单端口校准、TRL 校准和全二端口校准，其校准精度由低到高分别为：

**响应校准：**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。对于低损耗匹配良好的器

件,这一校准已经足够。响应校准是最简单的一项校准,适用于对精度要求不是很高的测量。

**响应和隔离校准:**在传输测量中,有效去除频响和串扰误差;在反射测量中,能有效去除频率响应和方向性误差。适用于高损耗、匹配良好的器件的测量。

**S11 和 S22 单端口校准:**去除反射测量中的方向性、源匹配和频响误差。测单端口器件或接适当终端的双端口器件的反射参数时精度很高。

**TRL 校准:**修正双端口器件四个 S 参数。因为分析仪的硬件无法完全修正源匹配和负载匹配误差,因而精度较全二端口校准低。

**全二端口校准:**对双端口器件的传输和反射测量,能够修正正反两向的方向性、源匹配、负载匹配、隔离和频响误差。给出最高的幅值和相位精度。

通常情况下校准精度越高,校准后系统越稳定。

### 3. 校准标准件对测量精度的影响

误差修正技术就是对已知校准标准件进行测量,并将这些测量结果储存到矢量网络分析仪的存储器内,利用这些数据和校准标准件的数学模型来计算误差模型,然后利用误差模型从后继测量中去除系统误差的影响,这个过程考虑了所有的主要系统误差源,并能进行极其精确的测量。这里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:

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

这里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必须真实的反映其真实值,否则将引起测量误差。

以 HP85033E 3.5mm 校准标准件为例,其中开

路器各项参数分别为:

阻抗	Z0	50.0 Ohms
电延迟	DELAY	29.243E-12 Sec
损耗	LOSS	2.2E+9 Ohms/Sec
边缘电容系数	C0	49.433E-15 Farads
	C1	-310.131E-27 Farads/Hz
	C2	23.168E-36 Farads/Hz
	C3	-0.16E-45 Farads/Hz

短路器的各项参数分别为:

阻抗	Z0	50.0 Ohms
电延迟	DELAY	31.798E-12 Sec
损耗	LOSS	2.199E+9 Ohms/Sec
匹配负载的各项参数分别为:		
阻抗	Z0	50.0 Ohms
电延迟	DELAY	0.0 Sec
损耗	LOSS	0.0 Ohms/Sec

用 HP8753ES 矢量网络分析仪将 HP85033E 校准标准件中开路器的边缘电容中 C0 改为 0,进行 S11 单端口校准后,测试 24 英寸测试电缆的幅度、相位曲线与用正常参数校准后测试曲线比较如图 4 所示,为了使两者的差异看的更清楚,图中将两个幅度曲线同时显示,相位采用比值形式显示:

从图中可以看出,校准标准件的各项参数对幅度和相位都产生明显的影响,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。

### 矢量网络分析仪的测量稳定性

矢量网络分析仪的测量稳定性主要取决于微波件的指标,即矢量网络分析仪的初始指标,下面以单端口为例讨论初始指标对测量稳定性的影响。

单端口测量稳定性取决于该端口的初始方向性、源匹配、反射跟踪,以及被测件的回波损耗:

$$\Delta \Gamma_c = \frac{\Delta D}{1 + \Gamma} + \frac{\Gamma * \Delta T}{1 + \Gamma} + \Gamma^2 * \Delta M \quad (1)$$

公式中:

$\Delta \Gamma_c$ : 测量的回波损耗改变量;

T: 端口初始反射跟踪;

D: 端口初始方向性;

M: 端口初始源匹配;

$\Gamma$ : 被测件真实的回波损耗;

以上均为线性值。

#### 1. 初始方向性对测量稳定性的影响

矢量网络分析仪的初始方向性主要由信号分离器件(如定向耦合器)所决定,图 5 所示为初始方向

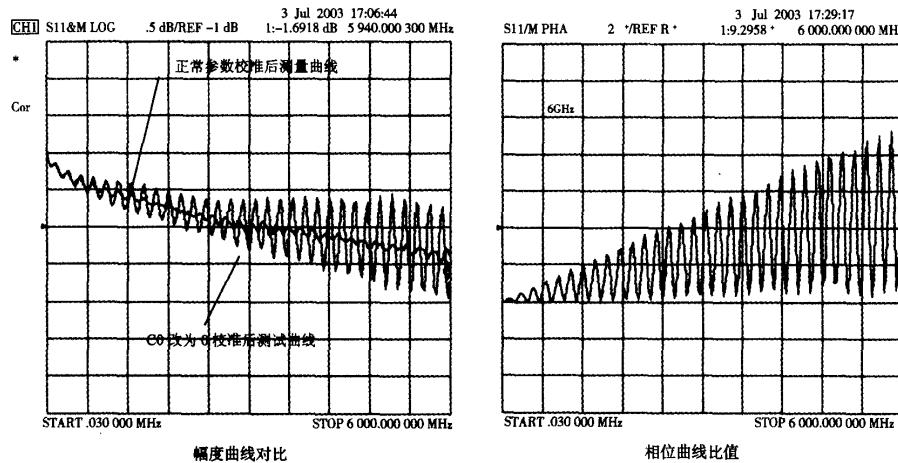


图 4 校准标准件参数对测量的影响

性对测量的影响,其中 D 为初始方向性,  $\Gamma_a$  为被测件真实的回波损耗,  $\Gamma_m$  为测量的回波损耗:

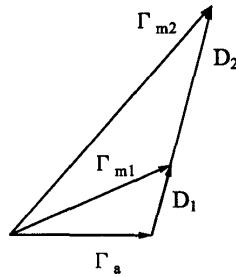


图 8 好的初始方向性将降低测量值与真实值之间的差别

由公式 1 可知,如果在信号分离器件(如定向耦合器)后面有插损(例如由测试电缆、转接器、夹具等带来的插损),则测量回波损耗的变化量与插损的成反比,而且,频率越高,插损越大,初始方向性的稳定性尤为重要。

好的初始方向性意味着由系统漂移引起的测量不确定度小,即系统稳定性好,稳定的测试系统不需进行多次校准,图 6 为不同初始方向性测量稳定性的比较,有图 6 中可以看出,初始方向性越差,系统稳定性越差,系统的漂移越大,为了避免由大的漂移带来的测量误差,必须重新校准。系统初始方向性越大,校准间隔越小。

## 2. 初始端口匹配对测量稳定性的影响

系统源匹配取决于矢量网络分析仪测试装置中微波件(如定向耦合器、偏置 T、程控步进衰减器、功分器、开关)的匹配,初始端口匹配对匹配灵敏器件的测量准确度影响很大。

初始端口匹配的绝对值对校准后的传输跟踪也有影响:

$$T_c = T * (1 - M_s * \mu_L - M_L * \mu_s) \quad (2)$$

公式中:

$T_c$ :校准后传输跟踪

$T$ :实际传输跟踪

$M_s$ :初始源匹配

$M_L$ :初始负载匹配

$\mu_s$ :剩余源匹配

$\mu_L$ :剩余负载匹配

公式 2 表明传输跟踪的误差项为:

$1 - M_s * \mu_L - M_L * \mu_s$ 。减小该误差有两个途径:

- ① 通过提高校准件的指标来改善剩余端口匹配(负载匹配和源匹配);
- ② 提高初始端口匹配(负载匹配和源匹配)。

## 3. 频率响应对测量稳定性的影响

频率响应是影响测量稳定性的另一重要的初始指标,理想情况下,测试装置在各频率下的响应应该一致,然而实际上,由于在矢量网络分析仪的频率范围内测试装置在不同频率点的插损不同而在高低频率上有一个偏移,频率响应影响测试端口的功率平坦度,同时还影响系统动态范围,应该设计高质量、低损耗的微波件以保证矢量网络分析仪相对平坦的频率响应。

提高矢量网络分析仪硬件的指标是提高测量稳定性的途径之一,矢量网络分析仪测试装置中的微波件,如定向耦合器、偏置 T、程控步进衰减器必须性能稳定且指标优良,因为这些微波件的自身性能将影响整个矢量网络分析仪的测量稳定性。然而由于矢量网络分析仪的频率范围越来越宽,设计具有

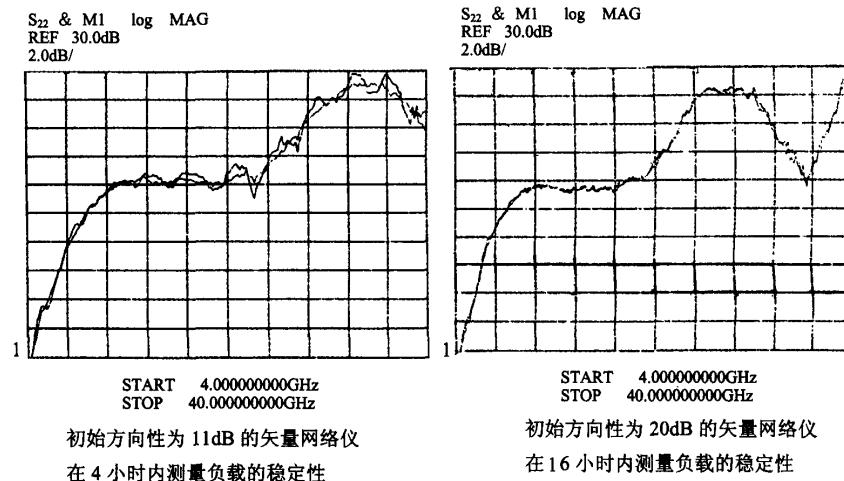


图 6 不同初始方向性的矢量网络仪测量稳定性比较

高性能的微波件已经非常困难,因此人们开始通过提高误差修正技术来提高系统的稳定性,通常情况下,采用的误差修正技术校准精度越高,校准后系统越稳定;采用的校准标准件性能越高,校准后系统越稳定。

### 结束语

目前,矢量网络分析仪在军事、民用领域发挥着越来越强大作用,在使用矢量网络分析仪的过程中,

为了提高测量精度和测量稳定性,应选用校准精度高的误差修正技术、性能高的校准标准件、初始指标高的矢量网络分析仪。

### 参考文献

- [1] Agilent Technologies Ins. HP8753ES Network Analyzers User's Guide.
- [2] 梅子扬 年夫顺. 计算开路器边缘电容的简单方法. 微波学报. 2003.3, 第 19 卷第 1 期

## 凌华与 Kontron 共同推动 ETXexpress 标准 制定下一代嵌入式模块化计算机平台新标准

为了让未来计算机平台的性能大幅提升及网络存取更加快速,全球高阶工业计算机 CompactPCI/PXI 技术领导厂商—凌华科技与全球嵌入式模块领导者—德国 Kontron 在欧洲举行会议讨论下一代嵌入式模块化计算机平台之新标准—ETXexpress,以创始会员身分共同协助业界伙伴导入 ETXexpress 规格产品,并计划于全球同步展开一系列市场行销活动。

此次参与新标准制定的还有研华公司。德国 Kontron 的 ETXexpress 产品经理 Matthias Huber 表示:业界知名厂商凌华科技与研华共同参与 ETXexpress 协会之创立,将能确保符合 ETXexpress 标准的产品成为嵌入式市场的主要品牌。Kontron 相信,ETXexpress 将会如同 ETX 标准一样逐渐普及化。

凌华科技技术长 Jeff Munch 指出,凌华科技与

Kontron一同致力于推动 ETXexpress 规格,这项合作将带动业界开发下一代嵌入式模块化计算机产品的趋势,尤其 ETXexpress 支持 PCI Express 规格,在性能与频宽更具优势。

### ETXexpress 规格简介

ETXexpress 支持最多可达八个 PCI Express x1 Lanes 与 PCI Express Graphics,同时支持 32 位 PCI 或 ISA bus(via a LPC)的硬件解决方案。一个 10/100/1000 Mega Bit Ethernet 埠提供快速连结至 LAN/WAN,多达 8x USB 2.0 为外接周边—flash、键盘、麦克风等,提供高速有效率的接口。ETXexpress 模块亦在板卡上同样的位置提供 serial ATA, parallel ATA, LVDS 多媒体外接端口、ACPI (Advanced Configuration and Power Interface) for optimized power management,确保模块之间的扩充性。

(凌华公司 供稿)

## 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>