

# 微波网络分析仪的校准技术与误差修正

沈菊霞

上海市计量测试技术研究院

**摘要:** 本文着重阐述了网络分析仪测量时的误差来源和各种校准技术, 如频率响应校准、单端口校准、全面的二端口校准、TRL 校准等, 并用具体实例和数据证实校准之前和之后的测量结果的不同, 网络分析仪的测量精度的提高, 正是通过测量校准技术和误差修正来实现的。

**关键词:** 微波 网络 校准 误差

## Calibration Technology and Error Correction about Microwave Network Analyzer

ShenJu xia

**Abstract:** This paper describes all kinds of error source and calibration technology about microwave network analyzer, such as frequency response calibration, one-port calibration, full two-port calibration and TRL calibration etc. Then we give examples and data to approve the difference before calibration and after it. Through calibrating technology and error correction, we improve the precision of microwave network analyzer.

**Keywords:** Microwave, network, calibration, error.

## 前 言

微波网络分析仪是微波测量中常用的、必备的仪器之一, 它可以进行微波网络特性的测量, 即反射系数、传输系数、驻波比、阻抗、相位、衰减、插入损耗、增益及 S 参数的测量等。一个理想的测量系统应该具有无限大的动态范围, 良好的隔离度, 方向性和频响特性, 并且在测量装置的任何部位都没有阻抗失配和信号泄漏。而实际测量时, 与信号泄漏有关的方向误差和串扰误差, 与反射有关的失配误差, 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, 从而影响了测量的精度。为了保证测量结果的准确性, 微波网络分析仪的校准技术是相当重要的。

## 误差分析和校准方法

所有的测量系统都可能包含三类测量误差:

- 系统误差
- 随机误差
- 漂移误差

系统误差是由测试装置的不完善所引起。若这些误差不随时间而变, 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。有以下六种类型的系统误差:

- 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

完整的二端口误差模型包括正方向上的所有上述 6 项误差以及反方向上的同样 6 项误差(数据不同), 总共 12 项误差。这就是二端口校准常常称之为 12 项误差修正的原因。网络分析仪有几种不同的校准方法, 能有效地消除测量数据中误差项的影响。

#### 1. 频率响应校准

频率响应校准为反射或传输测量提供了归一化的测试装置, 如果最终测量精度不作要求时, 它是最简单的误差修正方法, 适用于测量匹配好、低损耗的部件。

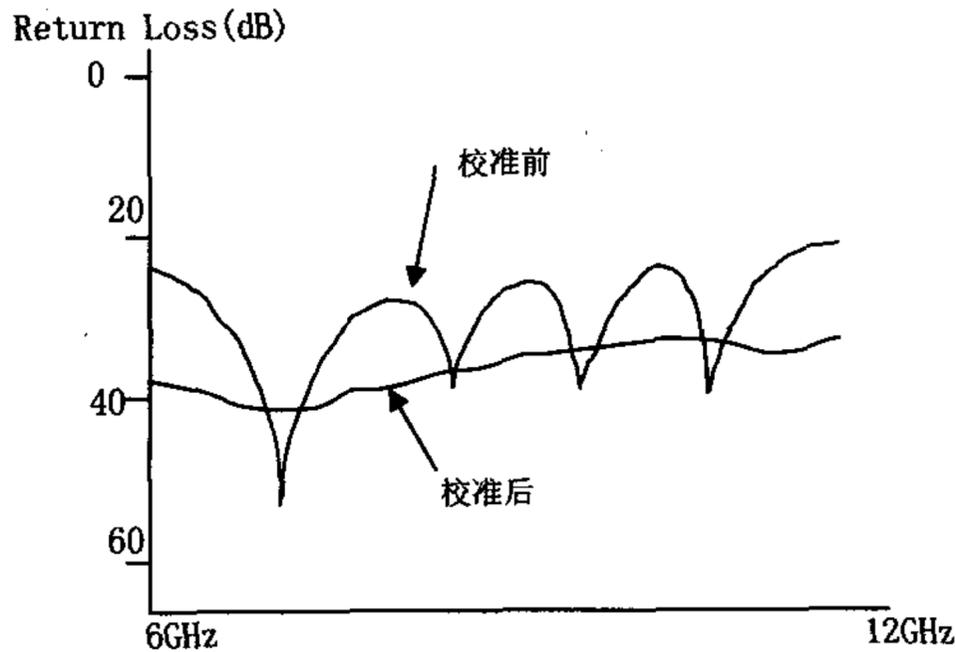
#### 2. 频率响应和隔离度校准

为传输测量中的响应、串扰或反射测量中频率响应、方向性误差的修正提供了归一化的响应, 应用于匹配好、高损耗部件的测量。

#### 3. $S_{11}$ 、 $S_{22}$ 单端口校准

$S_{11}$ 、 $S_{22}$  单端口校准为反射测量提供了方向性、源匹配和反射跟踪的矢量误差修正, 消除了反射测量中的三项系统误差。当然, 校准时所使用的校准件(开路器、短路器和匹配负载)必须是有溯源数据的。这样才能保证校准数据的精确可靠。这些过程实现了单端口和两端口部件具有适当端接条件下的高精度的测量。

图 1 单端口校准前和校准后的反射测量结果



#### 4. 两端口全校准

两端口全校准, 为两端口部件的传输和反射测量提供了正、反向信道中, 方向性、源匹配、负载匹配、隔离度和频率响应的矢量误差修正。该校准方法配以 S 参数测试装置, 为两端口部件的传输和反射测量提供了最佳的幅度、相位测量精度。

以 HP8753E 网络分析仪为例: 两端口全校准完成以后, 仪器应达到的技术指标如下:

	300kHz~1.3GHz	1.3GHz~3GHz
正向方向性系数	-35 dB	-30 dB
正向源匹配系数	-16 dB	-16 dB
正向传输轨迹系数	±1.5 dB	±1.5 dB
正向反射轨迹系数	±1.5 dB	±1.5 dB
反向负载匹配系数	-18 dB	-16 dB

反向传输轨迹系数	$\pm 1.5$ dB	$\pm 1.5$ dB
正向负载匹配系数	-18 dB	-16 dB
反向方向性系数	-35 dB	-30 dB
反向源匹配系数	-16 dB	-16 dB
反向反射轨迹系数	$\pm 1.5$ dB	$\pm 1.5$ dB

下面我们来看一下实际测试的情况：我们用一套精密校准件（数据溯源到 NIST）对 8753E 进行全面二端口校准，校准完成后测得数据如下：

	300kHz~1.3GHz	1.3GHz~3GHz
正向方向性系数	-40.00 dB	-35.16 dB
正向源匹配系数	-19.19 dB	-17.32 dB
正向传输轨迹系数	0.00 dB	0.21 dB
正向反射轨迹系数	0.08 dB	0.39 dB
反向负载匹配系数	-22.80 dB	-20.77 dB
反向传输轨迹系数	0.01 dB	0.14 dB
正向负载匹配系数	-21.30 dB	-19.22 dB
反向方向性系数	-37.74 dB	-32.99 dB
反向源匹配系数	-18.61 dB	-16.55 dB
反向反射轨迹系数	0.01 dB	0.33 dB

测试结果全部符合技术指标的要求。

而实际使用时，即使已作了二端口全面校准，仍有剩余误差存在。例如，由于被测件的不同，系统总是要增加一些适配器使得被测件与系统能很好的连接，所以，适配器的影响是不可忽略的。为了减小系统方向性的下降，高质量的适配器类型总是最佳选择（适配器必须低损耗、低 SWR）。

例如：8753E 校准后的方向性为 40dB，等效反射系数  $\Gamma = 0.01$ ，测试件是 SMA (m) 型接头，则需要用 APC-7/SMA (f) 的适配器来转接，选用 SWR 为 1.06 的适配器，则系统方向性为 28dB。如果选用二个 SWR 分别为 1.05 和 1.25 的适配器 APC-7/N (f) + N (m) / SMA (f) 来完成同样的工作，由于每个适配器的反射，则系统方向性降为 17dB。使用三个适配器，APC-7/N (m) + N (f) / SMA (m) + SMA (f) / (f)，SWR 分别为 1.05、1.25 和 1.15，则系统方向性只有 14dB。

## 结束语

由实验结果可知，网络分析仪测量精度的提高，是通过测量校准技术和误差修正来实现的，所以，为了提高网络分析仪的测量精度，必须完成测量前的校准步序，通过校准，可以用数学的方法来消除测量中的系统误差。并且在实际测量中应尽量减小修正以后仍存在的剩余误差。例如适配器的影响和接头的重复性、系统噪声及干扰等。

### 参考文献

1. “矢量网络分析仪的基本原理简介” HP 应用指南 1287-1
2. “结构体系的探讨” HP 应用指南 1287-2
3. “为 HP8510 网络分析仪规定的校准标准” HP 产品指南 8510-5A

### 作者简介

沈菊霞：1985 年毕业于上海科技大学

## 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>