

矢量网络分析仪中非插入器件的校准方法

郭永瑞 李树彪

(中国电子科技集团第四十一研究所, 青岛 266555)

摘要: 校准是矢网测量中极其重要的一个环节。它能最大限度的减少信号反射和传输过程中的系统误差, 从而有效提高测量的精度。但是对非插入器件, 因为它与测试端口无法直接相连, 必须使用适配器, 所以校准时要去除适配器的影响。本文介绍了矢网中非插入器件常用的几种校准方法, 以及这些方法的优劣所在。并着重介绍了一种目前比较先进的校准方法—未知直通段校准法。文中对其原理和算法给予了详细的说明。

关键词: VNA、SOLR、适配器、非插入器件、校准

Techniques for VNA Calibrations of Non-insertable Devices

Guo Yongrui Li Shubiao

(the 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555)

Abstract: Calibration is an important section of VNA Measurements. It can greatly reduce systematic errors in transmission and reflection, and improve measurement accuracy efficiently. But, adapters must be used to calibrate non-insertable devices because they cannot be connected to test ports directly when making through connections. So the adapter's influence must be removed.

The paper explores several techniques for VNA calibrations of non-insertable devices, and discusses their advantages and disadvantages. Nowadays, the SOLR calibration technique is the most advanced and influencing; its theory and algorithm are discussed in details.

Keywords: VNA、SOLR、Adapter、Non-insertable Device、Calibrate

1 绪论

网络分析仪是完成以一种特定的激励信号作用于被测网络, 并接收和处理网络的响应信号, 从而计算或量化特定的网络模型及参数的一种仪器。网络分析仪从功能上包括标量网络分析仪和矢量网络分析仪(VNA)。标网测量的是信号的幅度, 而矢网测量的不仅有幅度, 还有相位。

对于任何一台高精度仪器, 误差始终是一个不可避免的问题。同样, 温度、环境、电气干扰等因素, 对矢网测量也造成了很大的影响。为了最大程度地减小在传输和反射测量中的系统误差, 进而提高测量精度, 误差修正就成为了矢网测量中必要的并且是极其重要的一个环节。

误差修正, 它主要包括两个方面的处理:

- 测量标准器件的幅度和相位响应, 依据测量系统模型, 提取误差参数(校准);
- 测量被测器件, 通过矢量运算, 删去误部分, 从而得到器件的S参数(测量)。

为了将所有误差因素都包含到误差模型内, 校准的参考面必须选在直接与被测器件输入口和输出口相连结的交界面上。为了与不同形状和尺寸的被测件连接, 在测试装置面上经常要连接一些电缆或转换器。因为这些器件有不可忽视的驻波比, 所以在校准时必须把它们排除在外。这个排除的过程就是转换器的校准。

校准包括多种校准类型, 即: 开路器校准、短路器校准、直通校准、频响和隔离校准、单端口校准、全双端口校准(SOLT)、TRL校准、电校准(ECal)等。而适配器校准一般采用的是全双端口校准。

适配器, 包括插入和非插入两种。适配器校准, 就是对非插入器件的校准。插入式器件是能直接连接在分析仪中的器件, 即测试电缆可直接连在一起的器件。非插入式器件是不能直接连接在分析仪中的器件, 即测试电缆不能直接连在一起的器件。非插入器件包括两种: 一种是端口类型一致, 极性一致; 另外一种是两端类型不同, 比如一端是 3.5mm, 一端是 N 型。

2 传统的适配器校准方法

传统的适配器校准方法主要包括下面几种:

- 特性未确定直通法;
- 特性确定直通法;
- 等适配器交换法;
- 适配器移除法;

下面将对这些方法一一进行简单说明:

2.1 特性未确定直通法

这种方法最简单但精度最低。即在直通校准时直接连接(除去)一个适配器, 测量时除去(连接)。不管这个适配器特性如何, 校准时都不考虑, 不必过多修正, 即可得到被测件性能, 这就是零长度直通适配器。尽管适配器被用于直通路径, 但损耗和延迟并未从继后的测量中除去, 因为它们是未知的。

这种方法会有较大误差。在 3GHz, 幅度大约几十分之一 dB 的抖动, 而 40GHz 时可大到 1dB, 这种方法也会造成反射的不确定。如果频率很低, 或对相位不太感兴趣, 这种方法也可接受。

2.2 特性确定直通法

有时候因为标准件不合适, 可能在校准过程中使用特性确定的适配器, 然后在测量被测件时移除。这就是所谓的非零长度直通法。

适配器特性, 一般由厂家来提供。如果厂家没有给出, 或由于使用中的磨损, 而希望得到更精确的适配器特性, 那么可以采用第二章介绍的有关方法给予测量。这种方式采用的是基本的全双端口误差模型, 只是在直通特性上给予变更。而且只在做直通测量时, 使用了适配器, 所以这种方法也比较简单。但是比特性未确定直通法很大程度地改善了由于相位失真导致的幅度抖动, 从而有一个较好的传输测量。

但是, 如果适配器有明显的失配或者损耗, 那么直通特性的估算将会受到限制。这样不管测量方

法多么灵敏, 由于这个适配器性能不好, 都将造成很多问题。并且这种方法通常不适用于混合连接器类型。

2.3 等适配器交换法

交换等同适配器校准方法对于具有同样连接类型和极性的器件而言是非常有用的。

这种方法需要两个仅极性不同, 其余都完全匹配的适配器。为了确定适配器完全相同, 许多厂家的校准件都包含多个具有以下同样特性的适配器: 特性阻抗、插入损耗、电延时、匹配等。这些器件被称为“相位等同插入件”。

校准的完成:

1. 进行全双端口校准, 在直通连接时, 使用一个适配器;
2. 测量时, 直接用一个适配器来代替上一步使用的适配器。

由于适配器都包含在参考平面中作为测量装置的一部分, 所以适配器特性不必考虑。然而校准时也存在误差, 这个误差是由两个适配器特性的差异造成的。一般频率在 40GHz 并且低损耗时, 这种方法造成的传输误差的不确定性在 0.1dB 和 1 度之内; 如果回波损耗很小, 不关心传输误差, 但是反射误差被要求, 在 40GHz 以下则损耗在 1/10dB。

由于每一步都需要使用适配器, 所以很容易造成它的磨损, 影响测量精度。并且厂家提供的性能相同的适配器, 毕竟是有限的, 而且性能由于工艺问题, 肯定会存在一定的差异, 所以现在的 PNA 中并不推荐使用这种方法。

这种方法不能使用于混合连接器情况。

2.4 适配器移除校准法

适配器去除是测量非插入式器件最精确的方法。但比较繁琐, 即:

- 在其中一个端口上连接适配器, 然后连接标准件, 进行全双端口校准;
- 之后在另外一个端口上连接适配器, 再进行一次全双端口校准。
- 得到电延时的估计值

两组全双端口校准完全消除了适配器引起的失配, 并且确定了适配器的精确特性。进行适配器移除校准要求: 适配器类型与被测件类型一致; 校准标准适用于两种连接器类型。

完成测量后, 矢网便对适配器的电长度做出估计。估计是根据校准过程中某一个频率点上适配器

的损耗和相位偏移值来计算获取的。例如，在3GHz的损耗是3dB，相位偏移是180度，那么将可以估算出电延时，即：

$$\tau = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\pi}{2\pi(3 \cdot 10^9)} \approx 167 \text{ ps}$$

这样一个直通段适配器电长度的近似值就得到了。如果在给定频宽内的频率点数太少，则这个

适配器移除法，虽然非常精确，而且适用范围广，但校准步骤琐碎。同时容易由于电缆的移动或连接器的磨损会造成一定误差。现在一种比较先进的校准方法，即未知直通段校准方法。目前很多厂家都还没有采用。

3 最新适配器校准方法---SOLR

目前，最新适配器校准法是未知直通段校准法，也叫“短路-开路-负载-互易直通”简称SOLR，是一个精巧的SOLT校准。它排除了匹配和特性直通适配器的要求，并且大量排除了移动和弯曲测试电缆的要求。所以，这种方法可以使用于诸如非插入设备，机械测量难等情况，或者是用于多端口设备中。

在校准和测量中，不可避免地要进行多次测试电缆的连接和断开。这些操作将引入很多误差，尤其随着频率增加，这些误差更加明显。在使用未知直通段校准时，可以选择和被测件几何形状一致的直通件来进行直通连接，这样，当插入被测件时，测试电缆移动将很少。如果被测件自身就互易并且

估计可能是错误的。对于点频扫或者是步进比较大的扫频，这个估计也可能存在问题。那么可以通过将适配器的物理长度除以传播速度来重新获取延时。即：

$$\text{延时} = \frac{\text{适配器物理长度}}{\text{传播速度} (\text{光速} \times \text{速率因子})}$$

损耗低于 40dB，那么被测件完全可直接用作直通件。这样，校准之后可直接进行被测件的测量，而不必进行测量电缆的断开与再连接，从而更有效地降低了由于测试电缆的移动而引入的误差。

未知直通段校准首先需要每个测试端口的反射误差项（方向性、源匹配、反射跟踪）。通过测量标准短路件、开路件、负载件或者使用电校准模块来获取。对“unknown”直通标准唯一的要求是互易，即 $S_{21}=S_{12}$ ；并且在测量的最高频率的 1/4 波长内，插入相位必须是已知的（也就是，直通的近似群延时必须知道）。对测试系统最后的要求是，必须能够测量出在每一个测试端口上源匹配和负载匹配的差异区别。这些端口匹配的差异是由分析仪的内部开关转换造成的，并且它们经常被用来校准开关误差项。当然开关误差项也可以使用分析仪直接测量。

3.1 建立误差模型，获取误差修正公式

未知直通段的校准方法虽然是 SOLT 方法的变化，但是它和 TRL 校准方法一样，采用的是 8 误差项模型。

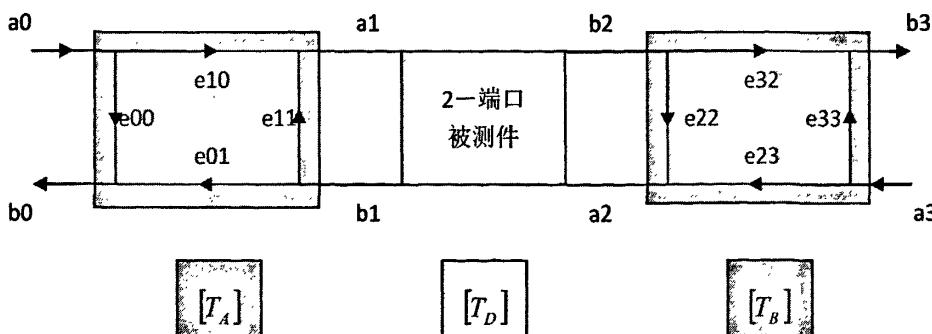


图 1

$e00$ ：方向性

$e10e01$ ：端口1反射跟踪

$e33$ ：方向性

$e23e32$ ：端口2反射跟踪

$e11$ ：端口1源匹配

$e10e32$ ：端口1传输跟踪

$e22$ ：端口2源匹配

$e01e23$ ：端口2传输跟踪

根据梅森公式可以得到如下所示的公式:

$$[T_M] = \begin{bmatrix} 1 & [e_{10}e_{31}-e_{11}e_{20}e_{32}] \\ e_{10}e_{32} & -e_{11} & 1 \end{bmatrix} [T_D] \begin{bmatrix} e_{22}e_{23}-e_{21}e_{33}e_{22} \\ -e_{33} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$T_M = \frac{1}{S_{21M}} \begin{bmatrix} -\Delta M & S_{11M} \\ -S_{22M} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$$\Delta M = S_{11M}S_{22M} - S_{12M}S_{21M} \quad (3-4)$$

$$T_D = \frac{1}{S_{21}} \begin{bmatrix} -\Delta S & S_{11} \\ -S_{22} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$\Delta S = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (3-5)$$

根据 2×2 矩阵, 可以得到四个方程, 经过整理得出 S 参数测量值、实际 S 参数和误差系数的关系式为:

$$S_{1M} = e_{00} + \frac{e_{10}e_{31}[S_{11}(1-S_{22}e_{22})+S_{21}S_{12}e_{22}]}{1-S_{11}e_{11}-S_{22}e_{22}-S_{12}S_{21}e_{11}e_{22}+S_{11}S_{22}e_{11}e_{22}} \quad (3-6)$$

$$S_{2M} = \frac{e_{10}e_{31}S_{21}}{1-S_{11}e_{11}-S_{22}e_{22}-S_{12}S_{21}e_{11}e_{22}+S_{11}S_{22}e_{11}e_{22}} \quad (3-7)$$

$$S_{3M} = e_{33} + \frac{e_{22}e_{32}[S_{22}(1-S_{11}e_{11})+S_{12}S_{11}e_{11}]}{1-S_{11}e_{11}-S_{22}e_{22}-S_{12}S_{21}e_{11}e_{22}+S_{11}S_{22}e_{11}e_{22}} \quad (3-8)$$

$$S_{4M} = \frac{e_{01}e_{21}S_{12}}{1-S_{11}e_{11}-S_{22}e_{22}-S_{12}S_{21}e_{11}e_{22}+S_{11}S_{22}e_{11}e_{22}} \quad (3-9)$$

测试系统的最后一个问题是, 获取源匹配和负载匹配来校准开关误差项或者是通过测量直接获取开关误差项。开关误差项即:

$$\begin{pmatrix} S_{11M} & S_{12M} \\ S_{21M} & S_{22M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11w} & S_{12w} \\ S_{21w} & S_{22w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & M_{\frac{R_2}{R_1}} \\ M_{\frac{R_2}{R_1}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (3-10)$$

3.2 误差系数的提取

双端口未知直通段校准的顺序是:

- 在端口 1 上测量开路件 M0、短路件 M1、负载件 M2, 得到 ($e_{00}, e_{11}, e_{01}e_{10}$);
- 在端口 1 上测量开路件 M3、短路件 M4、负载件 M5, 得到 ($e_{22}, e_{33}, e_{32}e_{23}$);
- 在端口 1,2 之间连接适配器测量 M6、M7, 得到 ($e_{10}e_{32}$), 同时端口 1 测 $M_{\frac{R_2}{R_1}}$, 端口 2 测 $M_{\frac{R_1}{R_2}}$
- 电延时获取等同适配器移除。

这样就完全满足了未知直通校准要求: 所有测

试端口系统误差包括方向性、源匹配、反射跟踪都能被完全确定; “未知直通段”校准标准, 即直通标准, 是直通互易的(也就是 $S_{21}=S_{12}$); 矢量网络分析仪的开关误差也被量化。

3.3 实验结果

本文的研究成果在矢网上进行了实验, 实际效果十分理想。实验时端口 1 和端口 2 都是 2.4mm, 但都是同样极性一阴, 无法直接相连。

仪器开机预热 30 分钟, 对系统如下设置:

- 扫描类型: 线性频率
- 频率范围: 45MHz—40GHz
- 扫描点数: 201
- 功率电平: 0dBm
- 中频带宽: 10Hz

设置完成后, 在系统上执行 SOLR 校准, 校准完成后对整机指标进行测量, 记录如下:

表 1 系统动态范围和传输跟踪

测试内容	频率范围	要求值(dB)	实测值(dB)
测试端口 1 动态范围	45MHz~2GHz	≥90	122
	2GHz~10GHz	≥110	131
	10GHz~20GHz	≥118	125
	20GHz~40GHz	≥103	114
测试端口 2 动态范围	45MHz~2GHz	≥90	129
	2GHz~10GHz	≥110	133
	10GHz~20GHz	≥118	131
	20GHz~40GHz	≥103	114
测试端口 1 传输跟踪	45MHz~2GHz	±0.105	-0.010
	2GHz~10GHz	±0.03	-0.006
	10GHz~20GHz	±0.10	0.005
	20GHz~40GHz	±0.105	-0.008
测试端口 2 传输跟踪	45MHz~2GHz	±0.105	-0.007
	2GHz~10GHz	±0.03	0.007
	10GHz~20GHz	±0.10	0.025
	20GHz~40GHz	±0.105	-0.016

表 2 有效负载匹配

测试内容	频率范围	要求值(dB)	实测值(dB)
------	------	---------	---------

测试端口 1 有效负 载匹配	45MHz~2GHz	≥ 42	69
	2GHz~10GHz	≥ 36	64
	10GHz~20GHz	≥ 36	62
	20GHz~40GHz	≥ 36	51
测试端口 2 有效负 载匹配	45MHz~2GHz	≥ 42	71
	2GHz~10GHz	≥ 36	62
	10GHz~20GHz	≥ 36	55
	20GHz~40GHz	≥ 36	52

由实验结果可以看出,未知直通段校准在性能指标上完全满足要求。

4 总结

校准是矢网的核心技术,直接决定了矢网测量

的精度。适配器校准是针对非插入式器件的一项专门技术。目前的适配器校准方式繁多,但每种方法都有它各自的特点。本文,笔者就各种适配器校准给予了简要说明,并着重介绍了最新适配器校准方法—未知直通段校准。

目前使用比较广泛,测量精度比较高的方法,即适配器移除和未知直通段,后者在精度和操作的简单性上更甚于前者。

参考文献

- [1] Network Analyzer Error Models and Calibration Methods
- [2] Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers

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>