

现代矢量网络分析仪的校准与测量

王琦

(北京邮电大学 电信工程学院, 北京 100876)

摘要: 关于矢量网络仪校准是多年来人们不断研究改进的课题。文章介绍了系统误差和校准的概念, 详细讨论了在实际应用中几种不同的校准方法, 根据被测件与网络仪端口连接方式不同分为3种情况: 被测件可以直接连接到网络仪的两个端口; 被测件经过电缆、转接头适配器与网络仪端口连接; 被测件放在测试夹具里, 如二极管、晶体管、微带电路等。

关键词: 矢量网络分析仪; 系统误差; 校准; 测量

中图分类号: TN06 文献标识码: B 文章编号: 1002-4956(2006)02-0031-04

Calibration and Measurement of Modern Vector Network Analyzer

WANG Qi

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: People have been studying the subject on VNA calibration for many years. The article introduces systematic errors and calibration, and then discusses a few different calibration methods in actual measurement in detail. There are three types according to different forms connected between DUT and VNA ports: DUT can be joined directly; DUT are joined with cables and adapters; DUT is placed in test fixture such as diode, transistors, microstrip circuit and so on.

Key words: Vector network analyzer; systematic errors; calibration; measurement

在现代厘米波毫米波测量中, 矢量网络分析仪是最重要的测量工具之一, 经常用它测试高频元器件或网络的传输特性、反射特性、隔离度和非线性, 如插入损耗或增益、回波损耗、反射系数等。然而用矢量网络分析仪进行测试时会产生测量误差, 误差包括系统误差、随机误差和漂移误差。随机误差主要由于仪表本身噪声(采样器噪声及IF噪声)、开关及连接器的重复性引起, 可以通过增加信号源功率、减小IF带宽等方法减小误差。系统误差由于实际测试设备的不理想引起, 这类误差通常认为不随时间变化, 具有可重复性、可预测性, 在测量过程中通过校准可以消除。漂移误差主要由于温度变化引起, 可通过增加校准来消除。在用矢量网络分析仪进行测量之前, 对仪表内部及其连接的测试系统进行校准, 使测量误差降低到最小程度。

1 系统误差和校准

在网络测量中出现的系统误差与信号泄露、信号反射和频率响应有关。图1是矢量网络分析仪产生前向系统误差图, 信号源输出分为2路, 一路用做测量传输和反射时的参考信号R, 另一路输入到被测件DUT。由于被测件输入端的不匹配, 一部分信号被反射通过定向耦合器送入反射通道A, 其余信号经过被测件DUT送入传输通道B。由于定向耦合器的方向性有限, 部分传输信号泄露到反射通道A(如图虚线所示的方向性), 另一部分信号不经过被测件DUT直接泄露到传输通道B(虚线串扰)。由于信号源和负载的不理想造成的信号源反射、负载反射; 由于仪器内部接收机的频率响应产生传输跟踪(传输信号与参考信号之比)B/R和反射跟踪(反射信号与参考信号之比)A/R。因此前向系统误差包括定向耦合器方向性、串扰、源失配、负载失配、传输跟踪和反射跟踪共6项误差, 同理反向系统误差也包括6项。

通过使用已知的标准校准件进行校准, 以减少

收稿日期: 2005-06-08 修改日期: 2005-09-01

作者简介: 王琦(1965—), 女, 内蒙古呼和浩特市人, 硕士,

高级工程师, 研究方向: 电磁场与微波实验教学。

万方数据

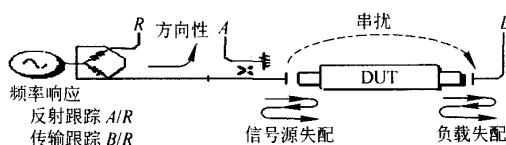


图 1 前向系统误差

和消除这些系统误差。标准校准件包括开路器、短路器、匹配负载和直通线，它们的电特性都保存在网络仪内部。网络仪对这些已知的标准校准件进行测量，将测量结果与标准校准件的已知数据比较，产生误差修正系数存储在网络仪内部，这一过程称作校准。随后测量被测件并且用误差修正系数修正，因此网络仪最终显示的测试结果就消除了系统误差的影响。用矢量网络分析仪做高频测量时有几种常用的校准类型，全二端口校准、归一化校准和单口校准。全二端口校准包括修正上述全部前向及反向 12 项系统误差，归一化校准只修正系统频响误差（传输跟踪 B/R 和反射跟踪 A/R ），单口校准用于反射测量，修正方向性、源失配和反射跟踪 3 项系统误差，因此全二端口校准是最精确的校准。

2 校准测量方法

系统误差不仅与网络仪内部定向耦合器的方向性、接收机频响、信号源和负载的失配有关，而且与测试系统使用的连接电缆、转接头适配器以及测试夹具有关。在实际应用中被测件的接口形式复杂多变，根据被测件与网络仪端口连接方式的不同分为以下 3 种情况。

2.1 被测件与网络仪端口直接连接

网络仪端口一般都是 N 型 50 欧姆或 75 欧姆端口，如果被测件端口也是 50 欧姆或 75 欧姆，并且阴阳极性匹配，这时只需校准网络仪内部的系统误差。以下分析都假设被测件是二端口器件，系统误差模型采用全二端口模型。前向信号流图如图 2 所示， Edf 、 Esf 、 Erf 分别表示定向耦合器方向性误差、信号源失配误差、反射跟踪误差， Exf 、 Elf 、 Etf 分别表示串扰、负载失配误差、传输跟踪误差。

将已知标准校准件开路器、短路器、匹配负载依次接入图 2 的实际参考面 $PA1$ ，最后连接直通线到实际参考面 $PA1$ 和 $PA2$ 。图 2 中， std 代表开路器、短路器、匹配负载。网络仪在测量参考面 $PM1$ 分别测出 4 种情况下的 S 参数 $S11_M$ 和 $S21_M$ （下标 M 代表测量值）。而开路器、短路器、匹配负载实际的 S 参数（下标 A 代表实际值）已知，

$S11_A$ 分别为 1、-1、0，开路器、短路器的 $S21_A$ 均为 0，直通线的 $S21_A = 1$ ，根据图 2 列出 6 个方程解出未知数 Edf 、 Esf 、 Erf 、 Exf 、 Elf 、 Etf ，并且存储到网络仪内存中。以上校准的是前向 6 项系统误差，同理将校准件连接到实际参考面 $PA2$ ，网络仪在测量参考面 $PM2$ 分别测出 4 种情况下的 S 参数 $S22_M$ 和 $S12_M$ ，校准反向 6 项系统误差，因此全二端口的 12 项系统误差都已校准。

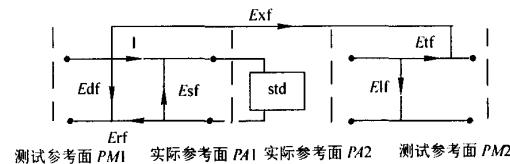


图 2 接校准件时前向信号流图

移去校准件，将被测件 DUT 在校准的实际参考面 $PA1$ 和 $PA2$ 之间插入。校准之后网络仪将从所测量的 S 参数值中扣除了仪器内部的系统误差，显示出被测件 DUT 实际的 S 参数值 $S11$ 、 $S21$ 、 $S12$ 、 $S22$ 。

2.2 被测件经过电缆、转接头适配器与网络仪端口连接

(1) 被测件端口与适配器端口匹配 如果被测件是其它类型端口，如 APC-7、SMA、波导口，或者虽然是 50 欧姆 N 型，但是其极性与网络仪端口不匹配，这时就要经过电缆、转接头适配器等与网络仪相连如图 3 所示。由于电缆、转接头适配器造成的损耗、反射、时延等，系统误差模型不仅包括网络仪内部的，而且包括电缆、转接头适配器引起的误差，因此校准应在经过网络仪端口和适配器之后的参考面进行，校准之后在该参考面上插入被测件，测量值扣除了仪器内部的系统误差和电缆适配器引起的误差，仪器显示被测件实际的 S 参数值。



图 3 具有转接头适配器校准

在实际测试时，如果被测件端口与适配器端口不匹配，通常有修改校准件定义和交换转接头适配器两种方法。

(2) 修改校准件定义 用户可以通过修改校准件定义，每一种校准件如开路器、短路器、匹配负载、直通线都用包括附加时延、损耗和特性阻抗在

内的精确模型来表示，只要知道每一种校准件的精确模型，校准之后将建立一精确的校准参考面。如果想把校准参考面向校准点后延伸 100 微微秒，可以修改每一种校准件定义，使它们包括这 100 微微秒的偏移。对于开路器、短路器、匹配负载，用它们原始的附加时延减去 100 微微秒；而对于直通线，用它们原始的附加时延减去 200 微微秒（因为直通线定义要求从端口 1 到端口 2 延伸）。在网络仪的校准件对话框里改变校准件的附加时延（在这个例子中损耗和特性阻抗不变，使用原始值），作为一个用户定义的校准件存储到网络仪的内存里，用户在执行校准程序时，调用该校准件进行校准，随后在延伸 100 微微秒的参考面上插入被测件，显示的测量值就是被测件实际的 S 参数值。

(3) 交换转接头适配器 交换 2 个电特性完全相同但端口阴阳极性不同的适配器，2 个适配器必须具有相同的特性阻抗、相同的插入损耗、相同的电时延。如果图 3 中的被测件左端口极性改变，这时被测件就不能直接插入到上图 3 所示的校准参考面上。用第一个适配器（图 3 所示适配器 1）将网络仪的两个端口连接起来，完成直通线校准，然后移走第一个适配器，将第二个适配器（一个端口与被测件端口相匹配，另一个端口与端口 1 相匹配）代替第一个适配器，第二个适配器就变成有效的测试端口，在该有效测试端口以及网络仪的端口 2 分别接入开路器、短路器、匹配负载进行校准，最后拿掉校准件，插入被测件进行测量。

2.3 被测件放在测试夹具里

在许多情况下，被测件是元器件，如二极管、晶体管、场效应管等，或是射频集成印刷板电路、微带电路等；而测试设备网络仪通常是同轴接口，因此要想测试这些元器件或射频电路，必须将其放入一个具有同轴接口的测试夹具或金属屏蔽盒里。网络仪一般在同轴接口处被校准，这时所测量的 S 参数包括被测件和测试夹具的效应，因此要想测量被测件的 S 参数，必须扣除从被测件到同轴接口的测试夹具效应。根据夹具模型的不同，校准测量的方法不同。

(1) 被测件左右两边夹具假定为已知电长度的理想无损耗传输线 这种情况假定两边夹具无损耗，而且夹具阻抗与系统特性阻抗匹配，这是最简单的一种模型，可以利用修改校准件定义的方法校准和测量。因为夹具是无损耗的理想匹配传输线模型，因此修改校准件定义时不考虑损耗和特性阻

抗，只关心附加时延。将已知夹具的电长度除以角频率得到附加时延，按照上面的方法修改。这种模型仅说明同轴接口和被测件之间相位的变化，在实际应用中，当夹具是低损耗的介质材料而且从同轴到非同轴的转换匹配良好时，这种模型的测量精度在工程上可以接受的。

(2) 被测件左右两边夹具假定为有损耗传输线

通过测量夹具的物理特性，利用已知介质的介电常数，损耗角正切计算夹具的特性阻抗和损耗。由于夹具有损耗而且阻抗不连续，因此在修改校准件定义时应包括特性阻抗和损耗，修改附加时延与测量方法都与上面方法相同。这种模型的测量精度受介质介电常数容差范围的影响。

(3) 夹具模型包括损耗、阻抗不连续以及同轴到非同轴转换等综合效应 这种模型虽然最精确，但是最难模拟，因为包含夹具色散、辐射、耦合所有的非线性效应。为了方便起见，采用信号流图分析，夹具和被测件用 3 个独立的二端口网络表示，被测件左右两边分别用夹具 A 和夹具 B 表示。

确定这种模型的一种方法是测量放在夹具里的已知器件（如开路传输线、短路传输线等），移去被测件，在被测件左右平面分别连接开路传输线、短路传输线等，对被测件平面进行校准，产生误差修正系数不仅包括网络仪内部的系统误差，而且包括左右两边夹具 A、B 的效应，因此被测件平面就成为校准平面，移去校准件在该平面上插入被测件，测量结果就是被测件实际的 S 参数值。

另一种方法是利用计算机仿真来确定夹具模型，比如假定夹具模型为串联电感并联电容，将一段已知长度和特性阻抗的理想传输线放在夹具里，计算机计算包括夹具在内整个网络（夹具 A、传输线、夹具 B 三个网络级连）的 S 参数，将计算结果与网络仪测量结果（通过网络仪 GPIB 接口或 LAN 接口连接到计算机）比较，修改夹具模型参数值使两者误差最小。这种方法的测量精度取决于模拟夹具模型与实际夹具的差别，当夹具是同轴到微带线转换时，可以用这种方法。

3 结论

矢量网络分析仪的校准测量是射频测量的一个难题，以上所讨论的这些校准测量方法侧重于概念理解和实际应用，没有繁琐的数学公式。

(1) 对于具有 N 型、APC-7、SMA、3.5 毫米等接口的被测件，校准的方法大致如下：

- ① 在网络仪的端口直接用同轴校准件校准；
- ② 经过转接头适配器校准；
- ③ 修改校准件定义；
- ④ 交换适配器校准。

(2) 对于放在夹具里的元器件或印刷板电路，有3种校准方法：

- ① 当假设夹具为理想或低损耗传输线模型时，通过修改校准件定义校准；
- ② 在夹具里放置开路传输线、短路传输线及直通线直接对被测件平面校准；
- ③ 利用计算机仿真确定夹具模型。

参考文献 (References) :

- [1] 董树义.近代微波测量技术 [M].北京:电子工业出版社, 1995.
- [2] 汤世贤.微波测量 [M].北京:国防工业出版社, 1991.
- [3] Silvonen, K. J. A General Approach to Network Analyzer Calibration [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and technique MMT-40, 1992, 754-759.
- [4] 郭大元.微波自动测量线的建立 [J].实验技术与管理, 2005, 22 (6): 43-47.
- [5] 刘玳珩.微波自动测量综合实验系统研究 [J].实验技术与管理, 2001, 18 (4): 19-21.

(上接第 23 页)

制，在提高控制精度的同时使得各个参数的选择更

加容易，简化了设计难度。具有很强的实际应用价值。

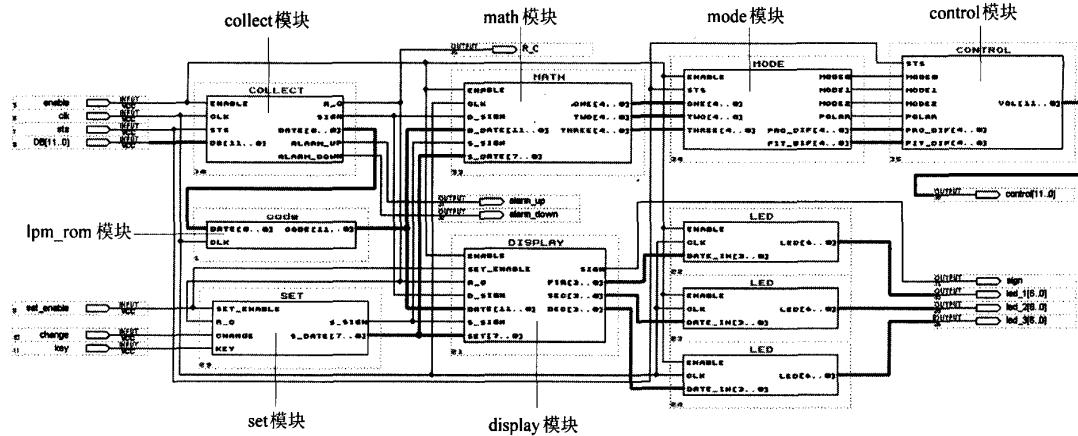


图 4 FPGA 内部逻辑结构

参考文献 (References) :

- [1] 吴为民, 仁丽. 温度控制系统的发展概况 [J]. 工业锅炉, 2002 (2).
- [2] Charles D. H. Williams. Feedback and Temperature Control EB/OL. <http://newton.ex.ac.uk/teaching/CDHW/Feedback/>.
- [3] 叶丹, 齐国生, 洪强宁, 等. 基于单片机的自适应温度控制系
- 统 [J]. 传感器技术, 2002 (2).
- [4] 凌玉华, 廖力清. 参数自整定模糊控制算法及其在智能温度测控仪中的应用 [J]. 计算技术与自动化, 1994 (12).
- [5] 黄曜军, 周云, 严国萍. VHDL 及其在温控系统中的应用 [J]. 电子与自动化, 1999 (3).
- [6] 胡琳静, 赵世敏, 孙政顺. 基于模糊控制的板球控制系统实验装置 [J]. 实验技术与管理, 2005, 22 (4): 16-20.

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>

