

# 浅析矢量网络分析仪测量误差和误差修正

王宏珍 卜云平 马迎春  
(河南洛阳 061 信箱 518 分箱, 471003)

**摘要** 讨论了反射和传输测量的系统误差对射频微波的测量不确定度的影响, 实现了频响校准、端口校准和全部二口校准, 同时通过对系统误差的修正来改善测量不确定度。

**关键词** 测量误差 误差修正 系统误差 测量不确定度

## 1 引言

电子系统和电子装备正朝着系统化、综合化方向发展, 矢量网络分析仪测量频带宽, 测量精度高和测量速度快, 为电子装备的发展提供了更多的便捷的测试手段, 如天线和微波器件的测量, 微波脉冲特性测量, 光电特性测量等。广泛地应用于雷达、电子对抗、隐身和反隐身技术、微波通信和卫星通信等。

测量误差和误差修正在矢量网络分析仪的测试过程中起着重要作用, 它能最大程度地减小在传输和反射测量中的系统误差, 从而提高测量精度。

## 2 矢量网络分析仪测量误差

网络分析仪的测量误差分为两大类: 随机误差和系统误差。随机误差是由于噪声、温度和测试设备中的其它物理变化所引起的不可重复的测量变化, 连接器的重复性和电缆的稳定性是两个最常见的物理变化, 影响连接器重复性的主要原因有两个: 连接器的清洁程度和接头的旋扭矩。系统误差是测试设备中可重复测量的变化量, 包括测试装置中的失配和泄漏信号, 参考和测试信号通道之间的隔离特性以及系统的频率响应。在多数微波测量中, 系统误差是最主要的测量不确定度的来源。

矢量网络分析仪反射测量中的主要误差影响: 一是测量系统的频响将加到所有的不确定度之中。系统的频响是测试装置所有变量在幅度和相位频响上的矢量和, 包括信号分离器件, 测试电缆, 适配器以及参考和测试通道之间频响的差异。由频响引起的误差与测试器件的输入反射系数有关。二是反射测量中系统误差的源失配是测试器件与向源方向的阻抗不匹配, 以及适配器和电缆的失配和损耗。源失配对于不确定度的影响取决于测试器件的特性, 并以矢量方式与测量值相加。测试器件具有高的反射系数, 则源失配对不确定度的影响就很大。通常, 在理想情况下耦合器将入射和反射信号完全分开, 在耦合器的输出仅出现反射信号。但是, 实际的耦合器不是完美的。由于泄漏以及从耦合臂的终端反射, 在耦合器输出将出现一部分入射信号, 另外, 从耦合器输出接头反射的信号也出现在耦合器的输出端, 这些都加到从器件反射的信号上, 增大了不确定度。三是总的方向性是出现在系统测试输入端的所有泄漏信号的矢量和。由于信号分离器不能绝对地将入射和反射波分离, 以及信号分离件和被测件之间的测试电缆和适配器的寄生反射, 由方向性引起的不确定度与测试器件无关, 而引起的作用与相位有关, 测量小反射时影响很大, 与测试器件反射信号一样。

总之, 在反射测量中, 这些主要的误差源对不确定度的影响是各个误差的矢量和。确定总的不确定度有一个数字方法, 各个误差的矢量和以最坏的情况相加给出最高的置信度, 这种方法的分析是在假定单口器件或输入和输出之

间为隔离很大的两端口器件情况下进行的。矢量网络分析仪在传输测量中,系统测试通道和参考通道之间的能量泄漏,所产生的误差与反射测量中的方向性误差非常相似,所以这里不再叙述。

### 3 矢量网络分析仪误差修正

前面讨论了误差对射频或微波测量不确定度的影响。后面将讨论通过对系统误差的修正来改善测量不确定度。

矢量网络分析仪具有主要四种类型的校准过程:频响校准,频响和隔离校准,单口校准和二口校准。频响校准较为容易,它只需一个标准件。仅对频响误差进行修正。

频响和隔离校准扣除了频响误差和隔离或方向性误差,其决定进行的是传输测量还是反射测量。这种校准需要两个标准件,频响模型是较简单的校准形式,它用单个校准标准件确定反射信号通路或传输信号通路的系统频率响应。若提高精度,可将模型提供系统频响相对单个已知标准件的矢量归一化,此误差模型至少需要一个在当前的频率范围内的频率响应为已知的标准件。

单口校准是用于任何单端口器件或具有好的终端负载的两端口器件的反射测量。单端口校准能测量并消除反射测量中的三项误差(方向性、源匹配和反射跟踪)。这三项误差可由普遍方程导出,而普遍方程则可借助有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,如一个开路器、一个短路器和一个负载(负载值通常与测

试系统的特性阻抗相同,一般为  $50\Omega$  或  $75\Omega$ )。对方程求解可给出系统误差项,并有可能导出被测器件的实际反射 S 参数。考虑测量一个未知的单端口器件的复反射系数。复反射系数  $S_{11M}$  定义为从测试器件反射的能量与入射能量之比:  $S_{11M} = b_1/a_1$ 。测量器件时无论如何仔细,测量值  $S_{11M}$  总是不如实际值  $S_{11A}$ ,就是由于存在系统误差,反射测量中存在的系统误差能用信流图来建立误差模型。在例中就是测试装置的端口 1(从下面图中的前半部分看出)。通过信流图的信号分析表明了测量中每个误差的影响。方向性对测量的影响与测试器件无关。源失配引起从测试器件反射能量的再反射,从而导致入射到器件上的信号电平的变化。

测量一个短路器,在理想的情况下在所有频率点上,它的反射系数为 1,相位 180。用  $S_{11A} = -1$  代入方程中。

图 2 端口 1  $S_{11M}$  复反射系数为:

$$S_{11M} = E_{DF} + \frac{(-1)(E_{RF})}{1 - E_{SF}(-1)} \tag{1}$$

测量一个开路器,由定义可知,一个开路器在所有频率上具有幅值为 1,相位为 0 的反射系数。将上面的式(1)中的  $(-1)$  改为 1 即可。

当对两端器件做高精度的传输或反射测量时,可采用二端口校准。全部二端口校准需要 S-参数测试装置。单通路二口校准是用于反射/传输测试装置。用三个标准和一个直通连接来完成所有系统误差的校准。两端口器件具有四个 S 参数。通过激励输入  $a_1$  并测量反射  $b_1$  和传输  $b_2$  信号,可测量两个参数。通过激励输出端  $a_2$  可测量两个反向参数。

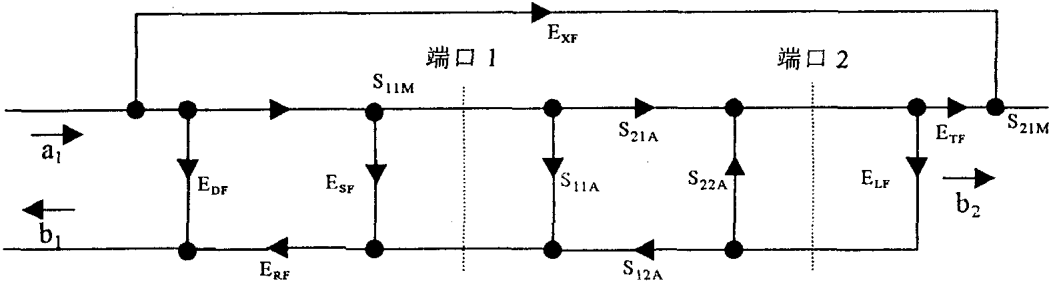


图 1 两端口器件前向 S 参数误差模型的信流图

(下转第 22 页)

较测量不产生误差,对于 10 毫米以下小量块由于是在球面工作台上,标准与被测量块的自重不同将导致变形量的不同。我们将 11 块陶瓷量块分别在不同测力下进行了实验(取其 6 块)见表 2。

表 2

读 数 名 义 尺 寸 测力	50g	100g	150g	200g	250g
100mm	-0.15	-0.07	+0.03	+0.05	+0.07
75mm	+0.20	+0.22	+0.24	+0.26	+0.28
20mm	+0.09	+0.10	+0.10	+0.15	0.16
10mm	+0.08	+0.10	+0.08	+0.09	+0.10
5mm	-0.05	-0.05	-0.06	-0.05	-0.05
1mm	+0.06	+0.06	+0.07	+0.06	+0.06

由于陶瓷量块的硬度为 13500N/mm<sup>2</sup> 钢制量块的硬度为 8000N/mm<sup>2</sup>, 因此陶瓷量块在有重力作用下的变形量小于钢制量块, 由于它们的弹性模数相同, 因此其上测量面的变形量  $\lambda_u$  相同, 而对于下测量面的变形量  $\lambda_d$  即

$$\lambda_d = 0.775 \sqrt{(P + W)^2 \frac{1}{R_3} (\frac{1}{E_3} + \frac{1}{E_2})^2} \quad (7)$$

我们将 10 毫米的陶瓷量块和钢制量块的重量及相关数据分别代入以上公式得出:

(上接第 20 页) 图 1 中表示测量两端口器件前向 S 参数误差模型的信流图。F 表示前向误差, 以识别前六个系数, 测量  $S_{11}$  的方向性称为 EDF。R 表示反向误差, 反向信号通路的方向性称为 EDR。因此, 对于全部二端口精度提高, 总计有 12 项误差系数。(测量 4 个参数, 必须知道 12 项误差系数和全部 4 个 S 参数)。

图 2 中  $S_{21M}$  为测量传输系数:

$$S_{21M} = E_{XF} + \frac{S_{21A}(1 + E_{TF})}{1 - E_{SF}S_{11A} - E_{LF}S_{22A} - E_{SF}E_{LF}S_{21A}S_{21A}} \quad (2)$$

所有的误差是矢量, 并能由系统本身来测量(而且随频率而变化)。用已知的标准件在测量面上测量系统的响应, 能定量地得到误差值。反射误差模型用来表示单端口模型的特性。测量直通连接可得到前向和反向传输跟踪以及负载失配的数值。在测试端口上连接终端负载比较好。全部的标准件测量之后, 按 DONE; - PORTCAL, 计算误差系数。

为了确定测量精度, 应使用矢量网络分析

陶瓷量块  $\lambda_d = 0.111 (\mu m)$

钢制量块  $\lambda_d = 0.115 (\mu m)$

它们之间的差值为 0.004 $\mu m$ , 因此, 测量力对陶瓷量块受力部位产生的弹性变形量对测量结果带来的误差是可以忽略不计的。

### 4 结束语

从陶瓷量块的物理性能及它具有的钢制量块所没有的优点来看。应该说在实际工作中陶瓷量块更优于钢制量块。由于对陶瓷量块的测试时间不长, 对于它的实验分析也较肤浅。以上仅为在工作中的一些体会。不足之处, 请提出指正。

### 参 考 文 献

- 唐渝萍. 陶瓷量块组合测量及不确定度分析. 实用测试技术, 1999, 6
- 唐渝萍. 精密陶瓷量块的特性和测量不确定度探讨. 实用测试技术, 1998, 5
- JJG849—93 硬质合金量块检定规程. 国家技术监督局 1994, 4
- JJG146—94 量块检定规程. 国家技术监督局, 1995, 2
- 王承刚. 量块检定参考资料. 计量出版社, 1982

仪配套产品检验盒中的标准件。对于系统中高分辨率的测量, 应使用平均有效的工具, 在校准期间清晰地识别在噪声情况下的隔离误差, 但应与校准过程的速度相权衡。平均是一种响应功能, 有助于数据的解释, 并不影响校准系数, 可典型地应用于高损耗的高分辨率测量中, 来减小噪声的影响或调整群延迟测量的孔径, 在使用平均之前, 应减小中频带宽。注意, 中频带宽的选择, 应在校准之前。

### 4 结束语

矢量网络分析仪由于采用了完善的误差技术, 使得测量频带宽、精度高、速度快, 是现代电子装备生产、试验和维修中不可缺少的测量仪器。进行矢量网络分析仪测量误差和误差修正的探讨, 对于提高其测量精度, 保证测试结果的可靠性具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 陈光祚. 现代电子测试技术. 北京: 国防工业出版社 2000, 1
- HP8722D 矢量网络分析仪使用指南. 北京: HP 公司出版 1998

## 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>