

# 矢量网络分析仪时域功能在同轴电缆故障定位上的应用

## The Application of Vector Network Analyzer's Time-domain Function to Ascertain the Break in the Coaxial Cable

汤 辉 刘 丽

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 本文从矢网工作原理着手, 着重介绍了矢网时域测试功能, 并用电缆时域测试的实例很好地阐释了矢网时域功能在同轴电缆故障定位方面的应用。

**关键词:** 矢量网络分析仪; 时域; 同轴电缆

### 0 引言

在射频、微波领域, 同轴电缆无论在测试中还是产品级联中应用都相当普遍, 所以电缆组件的质量直接影响测试结果或是产品性能。衡量电缆组件质量的指标通常是其  $S$  参数, 包括电压驻波比、插入损耗、相位以及延时, 用矢量网络分析仪频域测试可以方便地实现这些参数的测试。但是, 电压驻波比、插入损耗等这些指标只是电缆整体性能的一个反映, 比如电压驻波比大说明电缆反射大、匹配差, 插入损耗大说明信号通过电缆后能量有较大的损失, 而造成电缆反射大的原因却不得而知。矢网的时域功能恰恰能帮我们完成这一分析定位工作, 通过时域分析可以确定出电缆故障点的位置。下面就从矢网工作原理及其时域功能展开, 并结合实例重点介绍一下矢网时域功能在电缆故障定位上的应用。

### 1 矢量网络分析仪的时域功能介绍

#### 1.1 矢网工作原理简介

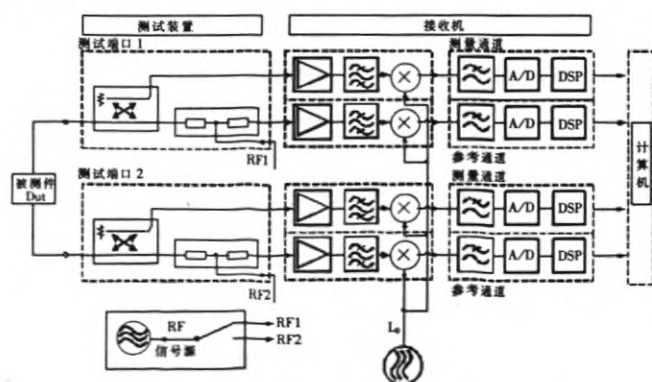


图1 外差型二端口矢量网络分析仪组成框图

目前广泛使用的矢网是基于外差型原理设计的, 主要包括四个部分: 信号源、测试装置、接收机和计算机(见组成框图1)。信号源提供射频(RF)信号, 该信号称为激励, 信号源切换器将激励信号传送到相应的有源测试端口; 测试装置在测试端口将入射波和反射波分离, 并馈入参考通道和测量通道; 接收机分为参考接收机和测量接收机, 每个测试装置都与对应的参考接收机和测量接收

机相连, 而接收机又由射频信号部分和数字信号处理(DSP)部分构成, 接收机的输出是由复数数值表示的原始测量数据; 计算机部分的功能是进行系统误差校正并将接收机输出的原始测量数据处理后显示出来, 同时它还提供了用户界面和远程控制界面。

信号源核心是一个可调范围较宽的电调振荡器, 产生正弦激励信号, 并通过锁相环等技术保证信号源必要的频率稳定性和频谱纯度。测试装置主要通过定向元件实现输入 DUT 的入射波和由 DUT 输出的反射波的分离, 定向元件常用的是电压驻波比电桥和定向耦合器, 它们具有互补的频率范围, 驻波比电桥通常适用于几 kHz 到 4GHz 的频率范围, 定向耦合器可以覆盖 1GHz 到 110GHz 以上的频率范围。实际中先由功分器将激励信号分成两个相同的信号, 一路送至参考通道(记为  $a_1$ ), 另一路通过定向元件送至 DUT(记为  $a'_1$ ), 而被测件反射的信号被定向元件耦合送至测量接收机(记为  $b_1$ ), 从而实现了被测件反射参数的测试。用公式表示为:

$$\Gamma_{DUT} = \frac{b_1}{a'_1} = \frac{b_1}{a_1} \quad (1)$$

式中:  $\Gamma_{DUT}$ —被测件的反射系数;  $a_1$ 、 $b_1$ —入射波和反射波波量。

接收机的射频部分实现了矢网的外差原理, 测试端口的射频信号(RF)和本振信号(LO)经过混频器混频后得到一个中频信号(IF), 这表示被测信号变换到某一中频, 同时保留了被测信号的幅度和相位信息。频率关系用公式表示为:

$$f_{IF} = |f_{RF} - f_{LO}| \quad (2)$$

将射频变换到较低中频的原因是因为 A/D 转换器的限制带宽决定了它不能工作在微波或毫米波范围, 所以高频信号不能通过 A/D 直接取样, 必须经过本振混频变为中频后经滤波、采样, 再经过数字信号处理输出原始测量数据。这些原始数据输入到计算机, 经过计算、系统误差校正及阻抗变换等处理过程生成各种测量曲线并最终显示出来。

## 1.2 矢网时域功能介绍

首先,网络特性可以在时域中进行描述和分析。时域分析中,被测量是时间的函数,对于均匀介质,时间轴等效于距离轴。对于线性时不变系统,激励  $a(t)$  和响应  $b(t)$  分别描述了入射波和反射波相对于时间的变化,并可定义反射量  $\Gamma_h(t)$  和  $\Gamma_\theta(t)$ 。当激励为脉冲信号  $\delta(t)$  时得到的脉冲响应为  $\Gamma_h(t)$ ,它表示阻抗特性沿时间或距离的变化;当激励为阶跃信号  $\sigma(t)$  时得到的阶跃响应为  $\Gamma_\theta(t)$ ,它相对于时间的符号和大小表明了被测件的阻抗特性是阻性、感性还是容性。

用高速示波器和阶跃信号发生器可以直接进行时域测量,通过电压和电流的测量可得到激励和响应。但是网络分析的测量主要集中于频域测量,而不直接进行时域测量,其原因是时域测量需要在整个频带内进行,而频域的测量可以通过窄带方式实现,相比时域内的直接测量,频域测量改善了测量值的信噪比,测试仪器能提供更大的动态范围,再者,由于技术原因,数模转换仅能工作在几个 GHz 频率以下,而基于外差原理的测试仪器中,A/D 转换器只需工作在中频,这样数模转换不再受频率限制,而测试也能覆盖更高的频率范围。

故而,矢网的时域功能并不是采用直接测试,而是先测试得到器件的频域响应——S 参数的幅度和相位;然后运用傅立叶逆变换这一数学运算将频域信息转化为时域。时域和频域的变换通过傅里叶变换和反傅里叶变化实现,图 2 总结了二者之间的关系,这是构成网络分析仪时域测量的理论基础。矢网时域分析的实现是从频域到时域的反傅里叶变换,是靠网络分析仪内部的计算机通过傅立叶变换技术来实现的,具体是采用一种称为 Chirp-z 反变换的算法,它包括两次快速反傅里叶运算和一次卷积。最终得到的结果是器件的时域响应,它显示了测得参数值随时间的变化,这些参数对应频域中的传输测量或反射测量。

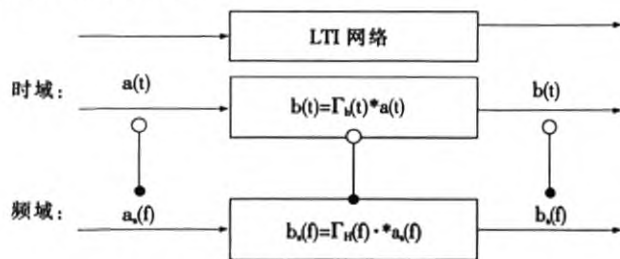


图2 时域和频域的对应关系图

## 1.3 矢网时域功能的应用

时域分析应用很广泛,例如,传输线的故障检查(故障定位)、用于无损评估的 RF 成像、材料样本中的湿度测量、毛细管截面断点的定位、声表面波滤波器上三次渡越信号的测量、多径传播中有用信号中的回波分离、未知的不规则区域中参考平面的移动、以及使用时域测量进行校准优化等等。本文将重点讨论时域分析在传输线故障定位上的应用。

## 2 用矢量网络分析仪的时域功能实现电缆故障定位

理解了矢网时域分析的原理,就能很好的指导实际应用。具体做法是:在矢网中设置测试频率,选择反射测量参数 S11,进行单端口校准,然后打开时域功能完成频域到时域的转换,矢网 Port1 测试端接上被测电缆,并开放被测电缆另一端,此时显示的结果就是被测件时域分析的结果。

下文介绍同轴传输线的时域分析情况。首先是 SMA 接头的测试用普通同轴电缆 I 号,该电缆某处存在一个可见故障点(如图 3 示),电缆机械长度约为 63cm,故障点在距离 1 端 5cm 处。将 1 端接至矢网 Port1 测试端,得到的结果如图 4 所示,图中出现三个峰值;为了进一步验证,再将 2 端接至矢网 Port1 测试端,得到的结果如图 5 所示,图中也出现三个峰值,直观上判断:图 4 中的 Marker4 所指示的位置以及图 5 中 Marker3 所指示的位置即是电缆反射的不规则处,也就是电缆的故障点位置。

对于均匀无耗传输线,时间轴等效为距离轴,该距离是电长度的概念,换算到机械距离通过如下公式:  $s = t \cdot v_p$ ,  $v_p = c / \sqrt{\epsilon_{eff}}$ ,其中  $\epsilon_{eff}$  是有效介电常数,此处取 1.52。根据图 4 中 Marker4 标明的时间值得出不规则处的距离应是 9.76cm,因为激励信号经电缆传输再反射回来,电波实际在电缆上走了两次(一个来回),所以读数要除以 2,即不规则点距离 1 端 4.88cm。电缆总长根据图 4 或图 5 中 Marker1 标明的时间值计算应为 63cm。

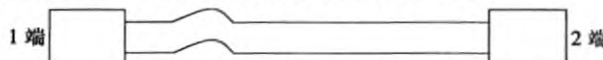


图3 有故障点电缆 I 号

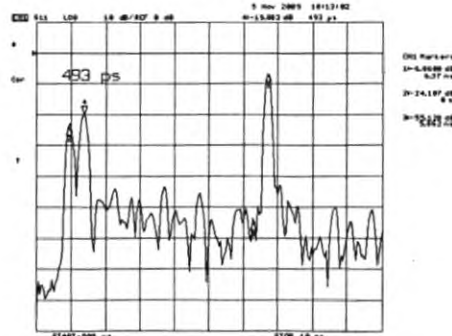


图4 有故障点电缆 I 号的测试结果(故障点靠近测试端)

本文又对与 I 号电缆同规格的正常电缆进行对比测试(结果如图 6 所示)以具体解释时域反射量测试结果。该图典型地反映了电缆的三段反射,测试曲线的第一个峰值是输入连接器(包括转接器)处的反射叫近端反射,中间一段由电缆本身制造公差引起的分布反射,第二个峰值位置是远端反射即电缆输出连接器的反射。所以图 6 中 Marker1 指示电缆被测端,Marker2 指示电缆开放端,至于 Marker3 则表示电缆中分布反射较大的点,该点回波损耗 -41.2dB,反射系数  $\Gamma_h(t) = 0.01$ ,达到使用要

(下转第 51 页)

必须更换新的吸收管。

#### 干燥管组的维修

此组件最容易漏气的部位是橡胶垫圈,如老化则要更换新的。

带气嘴的螺盖,有的是金属件组焊的,如由于碰撞而开焊,电烙铁焊封上。

当更换新干燥管时管端面不平 and 掉渣也会漏气,可以用砂纸在平台上研磨,清洗干净后装配。

#### 5 各镜片组的维修

平面镜组的修理。是产生的干涉的重要部件,光线经过此板后分裂为二。由于镜座的作用,该镜向后倾斜约  $55^\circ$ ,以得到所需的干涉条纹宽度(一条条纹到另一条条纹间的距离)。通过聚光镜的光线以  $45^\circ$  交角射向平面镜。

当需要更换新镜片时,平面镜与平面镜座之间接触应良好,两者之间最大间隙不得大于 0.05 毫米。当有缝隙时,则将压板螺钉松开,把平面镜翻过来试试。如仍然有缝隙可将镜座拆下,放在不台上用细砂纸研磨,进行角度调整,从而使镜片镜座贴紧。固定压板螺钉要松紧适度,过紧或两螺钉用力不均直接影响条纹清晰度。

折光棱镜组的修理。也是产生光的干涉的重要,将光线经两次  $90^\circ$  反射后折回到平面镜。经过一段时间使用,折光棱镜表面不仅会附着煤尘,还会附着油脂等灰尘混合的油污,从而使光的反射能变差,小心取下棱镜清洗干净。

在金属件组装前应将金属件清洗干净,两支柱要求等高,否则会使镜片受力不均产生应力,导致干涉条纹模糊不清。镜片装到座上后,压板的两个螺钉松紧要适度。

反射棱镜组:将光线作  $90^\circ$  转向,当棱镜变位时会使干涉条纹不明或消失。在使用过程中为了防止粗动螺杆的变位而引起条纹的移动,应将护盖盖上。

物镜组:用压紧圈将物镜固紧在物镜筒上,其上的光阑用以改善干涉条纹的清晰度。调节物镜筒前后距离可使干涉条纹在分划板上成象清晰

干涉条纹产生弯曲。可能是因为气室两端的平面玻璃与气室底座不垂直,调整方法是移动气室,也可以调整转向棱镜或物镜。玻璃上有划痕也可能产生条纹弯曲,此时应更换玻璃。

干涉条纹模糊不清,可能是仪器的光学零件附有灰尘或水蒸气。首先应检查光学零件是否清洁,如果光学零件擦洗后,条纹仍不清晰,可沿着光轴前后移动物镜,必要时须调整聚光镜和灯泡位置,找到最清晰的干涉条纹。

#### 6 电路的修理

开关启闭要灵活可靠,不允许有忽明忽暗的现象。

电线两端去皮不能过长,芯线的股线要集中焊,否则影响亮度。

电线的焊接点要用酒精将焊剂清洗干净,再涂防腐蚀黑漆,否则会腐蚀导线、使光源亮度减弱。

开关里的弹簧片有锈蚀时就用细砂纸磨光,以免影响导电性能,弹力不够要更换。固定弹片的铆接点不应活动,有活动的必须铆紧,否则也会影响导电性能。

作者简介:王园荣,女,助理工程师。工作单位:新疆昌吉州计量检定所。  
通讯地址:831100 新疆昌吉市北京北路 102 号。  
收稿时间:2011-01-18

(上接第 49 页)

求。图 4 和图 5 中出现的第三个峰值就标明电缆在此处出现故障:

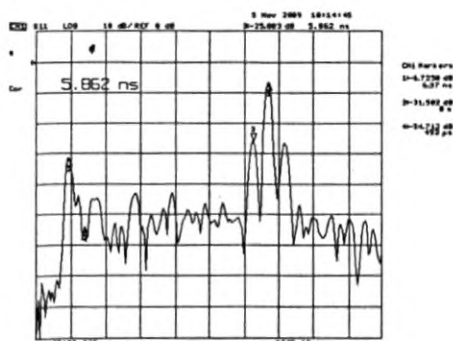


图 5 有故障点电缆 I 号的测试结果(故障点远离测试端)

#### 3 结束语

本文从矢量网络分析仪工作原理展开,阐述了矢网时域分析的实现过程,并对同轴电缆进行时域分析,从而检测出电缆故障点位置,更加直观地呈现了如何用矢量网络分析仪的时域功能实现电缆故障定位。

如本文所述,矢网时域分析应用很广泛,文中仅对电缆故障定位的应用做了阐述,希望对读者产生一定

的启发。

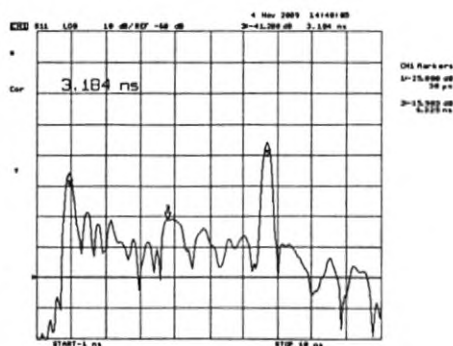


图 6 相同无故障点电缆的测试结果

#### 参考文献

- [1] Michael Hiebel. 矢量网络分析原理. R&S 公司. 2007, 5.
- [2] 胡树豪. 实用射频技术[M]. 北京: 电子工业出版社. 2004, 1.
- [3] 网络分析仪原理及其应用. Agilent Technologies. 2006, 12.

作者简介:汤辉,男,工程师。工作单位:中国空空导弹研究院。通讯地址:471009 河南洛阳市解放路 166 号 030 信箱 2 分箱。

刘丽,中国空空导弹研究院(洛阳 471009)。

收稿时间:2011-01-08



## 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>