

# 矢量网络分析仪时域功能及应用

刘 丽, 张晓辉

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 矢量网络分析仪通常用来分析被测件的频域参量, 为介绍时域测试并推广其应用, 采用了具有时域功能的矢网来对电缆进行具体测试。结合实例介绍了时域功能在电长度测试、电缆性能判定及电缆故障定位等方面的应用, 并就时域测试时矢网的参数设置和误差来源进行说明和分析。实验结果表明: 用该方法分析电缆时域特性简单方便、结果直观、数据可靠。

**关键词:** 无线电技术; 电缆; 矢量网络分析仪; 时域功能; S 参数

**中图分类号:** TM931; TN711.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5124(2012)02-0049-03

## Introduction and application of VNA's time-domain function

LIU Li, ZHANG Xiao-hui

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** Vector network analyzer (VNA) is usually used to analyze the parameter of the device under test in the frequency-domain. In order to introduce the test and the application in the time-domain, this paper used a VNA with time-domain function to test the coaxial cable. For example, it can be used for the electrical length measurement, the performance estimate and the faults location of the cable. Finally, it introduced how to set the parameters on the VNA and how to analyze the origin of the measurement error. All of the experimental results indicate that the method is simple, convenient, intuitive and credible.

**Key words:** radio technology; coaxial cable; vector network analyzer; time domain function; S-parameter

## 0 引 言

通常使用矢量网络分析仪进行频域分析, 从而实现被测件 S 参数: 电压驻波比、插入损耗、相位以及延时等的测试。拿反射系数测试来说, 测试结果是被测件上多种反射因素在被测端口参考端面的迭加, 要想分析出这些因素产生的位置、造成的影响, 就要在时域中观察测试结果。时域分析最直接的方法是时域反射计, 也可利用矢网时域功能选件完成对被测件的时域分析, 而后者相比前者有更大的优势。

## 1 矢网时域功能介绍

网络特性可以通过时域反射计(TDR)的方法在

收稿日期: 2011-05-14; 收到修改稿日期: 2011-08-09

作者简介: 刘 丽 (1982-), 女, 山西长治市人, 工程师, 主要从事微波计量及测试。

时域中进行描述和分析。该方法通过一个高速阶跃脉冲发生器和一台取样示波器来实现, 脉冲发生器产生射频脉冲作为激励信号, 该信号入射至被测端面称为入射波, 并被示波器采样, 入射波在被测件上传输, 同时有反射波反射回来, 再经示波器采样。这样, 从示波器上分别测量入射波和反射波的电压值就能得出入射波与反射波的关系, 即激励与响应相对于时间的变化, 并可将反射波电压幅度与入射波电压幅度之比定义为电压反射系数, 它描述了被测件时域脉冲响应相对于时间的变化。在时域分析中, 被测量是时间的函数。对于均匀介质, 时间轴等效于距离轴, 这就使电长度测试和电缆故障定位成为可能。

矢量网络分析仪也具备时域分析功能, 不过与 TDR 不同的是: 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,即S参数的幅度和相位,然后运用傅里叶逆变换这一数学运算将频域信息转化到时域。众所周知,时域和频域的变换通过傅里叶变换和反傅里叶变化实现<sup>[1]</sup>,图1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里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2次快速反傅里叶运算和1次卷积。经变换后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。

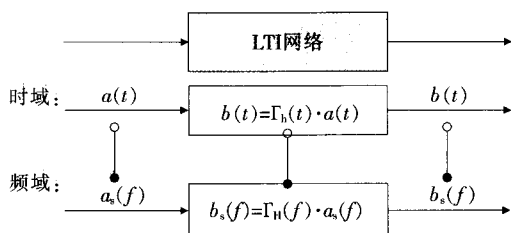


图1 时域和频域的对应关系图

相比较而言,矢网时域功能较之TDR有巨大的优势。首先,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;其次,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转换器只需工作中频,这样数模转换不再受频率限制,测试也能覆盖更高的频率范围。鉴于以上原因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。

## 2 矢网时域功能应用

### 2.1 矢网时域功能应用举例

矢网的时域功能通过仪器配置选件来保证,如Agilent的矢网在有选件010的情况下便具备了时域分析功能。在频域选择传输或反射参数测量,选择功能键打开时域功能,就实现了传输或反射参量在时域的表达。下面以同轴传输线反射参量测试为例,介绍其在电长度测试、电缆性能判定<sup>[2]</sup>、电缆故障定位上的应用。

电磁波在传输线上传输,对于真空介质来说,电磁波传播速度等于光速,对于空气介质传播速度也可近似为光速<sup>[3]</sup>,而对于其他填充介质根据介质材料不同,都会对电磁波传输形成不同程度的阻碍作用,相应的传输速度会慢于光速,因此电磁波实际的传输距离就不再是传输线的机械程度,而要用电长度

来表征。不同介质其固有的有效介电常数不同,有效介电常数用 $\epsilon_{\text{eff}}$ 表示,则电长度与物理长度、有效介电常数的关系可表示为

$$\text{电长度} = \text{物理长度} \times \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$$

假设被测传输线是均匀介质,那么时间量可相应的变换为距离量。时间 $t$ 到距离 $s$ 的变化关系是: $s = t \cdot v_p$ ,其中 $v_p$ 称为相速度,它与光速 $c$ 的关系是: $v_p = c / \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 。矢网时域功能打开时,横坐标可直接选择时间或距离为单位,这时测得的距离是传输线的电长度;如果再在矢网中输入传输线的有效介电常数,横坐标即可表示传输线的机械长度,这样就可以通过判断传输线上反射值情况来确定故障点在传输线上的位置,从而实现电缆故障定位。

具体测试方法是: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测试端接上被测传输线,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。

图2是矢网配置的同相稳幅电缆的时域测试结果,图中横轴表示传输时间,纵轴显示矢网测试端面1端口的反射参量并以回波损耗形式表示。测试曲线上从左至右第1个峰值处所指示位置是输入连接器(包括转接器)处的反射即近端反射,第2个峰值光标Marker1所指示位置是远端反射即电缆输出连接器的反射,两峰值之间的一段是由电缆本身制造公差引起的分布反射<sup>[4]</sup>。第1个峰值处 $t=0\text{ s}$ ,第2个峰值(Marker1)处 $t=5.435\text{ ns}$ ,换算到距离为 $c \cdot t = 1.63\text{ m}$ ,则该被测电缆电长度为 $c \cdot t/2 = 0.815\text{ m}$ 。

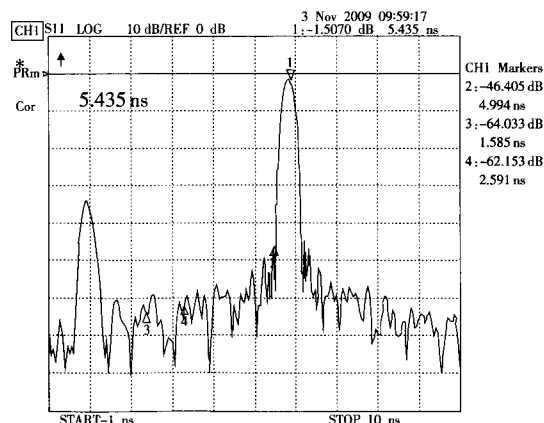


图2 同相稳幅电缆的测试结果

图3是某普通故障电缆时域测试结果,Marker2指示电缆被测端面,Marker1指示电缆开放端,中间分布反射段出现一个较大峰值Marker4,该位置处回

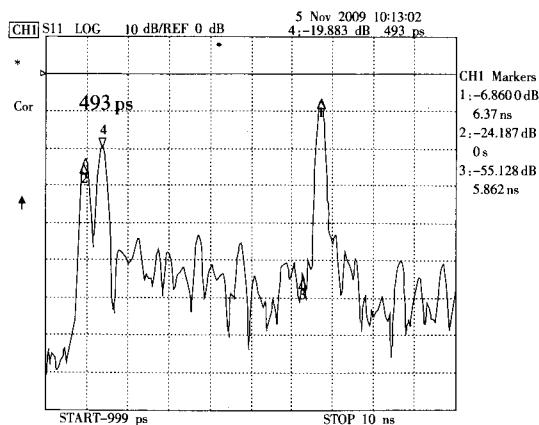


图3 故障电缆的测试结果

波损耗较大,表明电缆在此处存在故障点。该电缆有效介电常数 $\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 取 1.52,经计算,故障点位置在距离测试端面的机械距离 $s=t \cdot v_p = t \cdot c / \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = 4.88 \text{ cm}$ 。

再对图 2 和图 3 中分布反射的大小进行对比,图 2 中大部分分布反射值位于 $-60 \text{ dB}$ 以下,换算至反射系数, $\Gamma_h(t) \leq 0.001$ ;而图 3 中除故障点之外,大部分分布反射位于 $-40 \text{ dB}$ 以下,则 $\Gamma_h(t) \leq 0.01$ 。再者,图 2 测试端面处回波损耗大约 $-34 \text{ dB}$ ,图 3 测试端面处回波损耗 $-24 \text{ dB}$ ,说明同向稳幅电缆接头处匹配情况好于普通电缆。通过上述比较,可得图 2 电缆性能要明显优于图 3 电缆。

## 2.2 矢网时域功能测试注意事项

矢网的时域功能有两种测量模式,一种是低通模式,另一种是带通模式,两种模式的主要区别源于频域采样及变换参数的不同。所以矢网频域测量参数如起始终止频率、测量点数的选择与时域变换模式及时域测试范围等有直接的关系。

矢网根据型号不同测量范围也不同,每台设备都具有最小频率 $f_{\min}$ 和最大频率 $f_{\max}$ 。进行频域测试前需要对扫频范围和测试点数进行设置,扫频范围是从起始频率 $f_{\text{start}}$ 至终止频率 $f_{\text{stop}}$ ,测量点数为 $M$ ,设置这 3 个参数后就决定了矢网是以 $f_{\text{step}}$ 为步长进行频率扫描,且满足: $f_{\text{step}} = \frac{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}}{M - 1}$ 。对低通模式,第 1 个频率采样位于 $f_0 = 0$ ,第 2 个位于 $f_1 = f_{\text{step}}$ ,如果 $f_1 < f_{\min}$ ,则将在 $0 \sim f_{\min}$ 之间通过插值法增补 $K$ 个频率采样,然后再向频率轴负向进行镜像扩展,时域变换的分辨率由频谱周期决定: $\Delta t = \frac{1}{F} = \frac{1}{2f_{\text{stop}} + f_{\text{step}}} \approx \frac{1}{2f_{\text{stop}}}$ ,时域周期由频域采样步长决定: $T = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{f_{\text{step}}}$ 。对于带通模式,只需要有恒定步长的频率网格,第 1 个频率采样位于 $f_0 = f_{\text{start}}$ ,最后一个频率采样位于 $f_{\text{stop}}$ ,带通模式

的时域周期与低通模式一致,而时间分辨率为:

$$\Delta t = \frac{1}{F} = \frac{1}{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}} + f_{\text{step}}} \approx \frac{1}{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}}$$

。对比二者可见,相同条件下带通模式的时间分辨率比低通模式降低一倍。为了提高时间分辨率,通常使用低通模式,并且选择尽可能高的终止频率。带通模式主要针对窄带被测件,窄带器件在其中心频率周围有限范围内有响应,要想得到有用的时域结果必须将频率采样置于被测件的通带。

频域响应经傅里叶变换到时域,时间范围为 $(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2})$ ,距离范围为 $(-\frac{T}{2} \cdot v_p, \frac{T}{2} \cdot v_p)$ ,它们与频率范围和测量点数有关。以 Agilent 公司的 8722ES 为例,频率从 $10 \text{ MHz} \sim 40 \text{ GHz}$ ,测量点数取最高 1601 点,时间范围为 $(-20 \text{ ns}, 20 \text{ ns})$ <sup>[6]</sup>,传输线介质假设为空气,则距离范围为 $(-6 \text{ m}, 6 \text{ m})$ 。实际测试时,时域轴选择开始时间 $-1 \text{ ns}$ ,终止时间根据电缆机械长度大致估算,确保能覆盖到电缆全长。

## 3 矢网时域测试误差来源分析

从矢量网络分析仪时域测试实现过程可以大致分析传输线距离测试中的误差来源。第 1 是网络分析仪端口与被测件端口 $s$ 失配引入的误差;第 2 是接头连接重复性引入的误差;第 3 是电缆的材料决定了其有效介电常数,材料的一致性导致了介电常数的差异,所以有效介电常数的选取也会引入误差;第 4 是光标读数引入的误差<sup>[6-7]</sup>。

## 4 结束语

本文从矢量网络分析仪时域功能工作原理展开,阐述了矢网时域分析的实现过程,对同轴电缆进行时域分析,直观地呈现了它在电长度测试、电缆性能判定、电缆故障定位等方面的应用,并就时域分析中距离测试的误差来源进行了大致分析。

### 参考文献

- [1] 陈生潭. 信号与系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.
- [2] 孙新莉. PNA 网络分析仪在 RF/微波电缆组件测试中的应用[C]//2008 年计量与测试学术交流会论文集.北京:宇航计测技术, 2008.
- [3] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005.
- [4] 胡树豪. 实用射频技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [5] Agilent Technologies. 8722ES Network Analyzers User's Guide[Z]. Agilent, 2005.
- [6] 刘冬冬. 矢量网络分析仪校准项目探讨[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(3): 52-53.
- [7] 王志田. 无线电电子学计量[M]. 北京:原子能出版社, 2002.

## 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>