

# 应用矢量网络分析仪测定变频器的群时延特性

张慧君 陈淑芳

(中国科学院国家授时中心 陕西 临潼 710600)

**摘要** :群时延是系统和网络的一项重要传输特性,它表征系统和网络的线性失真。讨论了采用高性能 PNA 系列矢量网络分析仪测量变频器群时延的方法,并结合实例对实现测试的关键点和技巧进行了阐述,最后给出测试结果及不确定度的分析。

**关 键 词** :群时延,矢量网络分析仪,变频器,测量

中图分类号 :TM935.27

文献标识码 :A 文章编号 :1001-1544(2005)01-0054-07

## 1 前 言

群时延是指群信号通过线性系统或网络传播时,系统或网络对信号整体产生的时延。群时延一方面指传输信号必须是群信号,另一方面,群时延是波群整体的时延,而不是其中某频率分量的相时延。群时延定义为信号通过被测件的相位响应,可由下式来表达:

$$\tau(\omega) = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (1)$$

(1)式中,  $\omega$  为角频率,  $\phi(\omega)$  为相频特性,  $\tau(\omega)$  为群时延, 它是  $\omega$  的函数, 也就是绝对群时延。

在工程实践中, 常常需要测量一个带有变频器的信道或转发器的群时延。由于变频器是输入和输出频率不相同的多端口器件, 它在进行群时延测量时存在测量仪器与被测件之间的失配误差, 需要有一个能够精确地描述系统中不同频率处误差信号互作用的误差模型, 这正是群时延测量的一个难点。因此, 变频器件的群时延测量多年来一直在研究之中。目前有多种变频器件的群时延测量方法, 如调制法(即载波信号加调制(调频、调幅)的比相法<sup>[2]</sup>和扫频法等, 但这些方法一般需用一台以上的仪器, 测试结果不直观, 需要数据处理, 测试过程较麻烦。惠普公司的 HP8720C、HP8753B 矢量网络分析仪在测量变频器的群时延时需要一个群时延很小的标准混频器, 将其作为参考基准来进行零时延标校, 毫无疑问, 这样的测试结果是一个相对群时延值, 测量精度依赖于参考混频器的群时延。

采用 Agilent 公司新型的 E8362B 和 E8363B 高性能 PNA 系列矢量网络分析仪能够精确

地测量出变频系统或网络的绝对群时延。但是精确的群时延测量结果与外部辅件的配置(包括校准混频器、参考混频器、滤波器、本振信号源、外部参考信号、适配器和电缆等)各部件之间的良好匹配以及测量参数的恰当设置都密切相关,任何一个环节的疏忽都可能影响测量结果的准确度,甚至导致测量的彻底失败。

## 2 PNA 系列矢量网络分析仪进行群时延测量的基本原理

### 2.1 矢量混频器校准原理<sup>[3]</sup>

PNA 系列矢量网络分析仪采用矢量混频器校准方法,这种校准方法的主要优点是将矢量误差修正引入变频测量领域,在校准中采用频偏误差模型,根据频偏误差模型用数学方式将传输中的系统误差以及参考混频器的响应从测量中除去。校准时只需如下三个校准过程:

第一步 在被测系统的输入和输出频率范围内进行全双端口校准。

第二步 在输入频率上表征校准混频器和滤波器的组合,这是对校准混频器的一个量化过程。这一步骤包括一系列反射测量,根据这些测量结果,可计算复数输入匹配、输出匹配和变频损耗。这一步是为下一步做准备。

第三步 参见图 1。这一步使用 PNA 矢量网络分析仪的频率偏移模式,它消除包括电缆、适配器和参考混频器在内的测试系统参考路径的响应,并将校准混频器/滤波器组合用作已表征的变频直通校准标准。

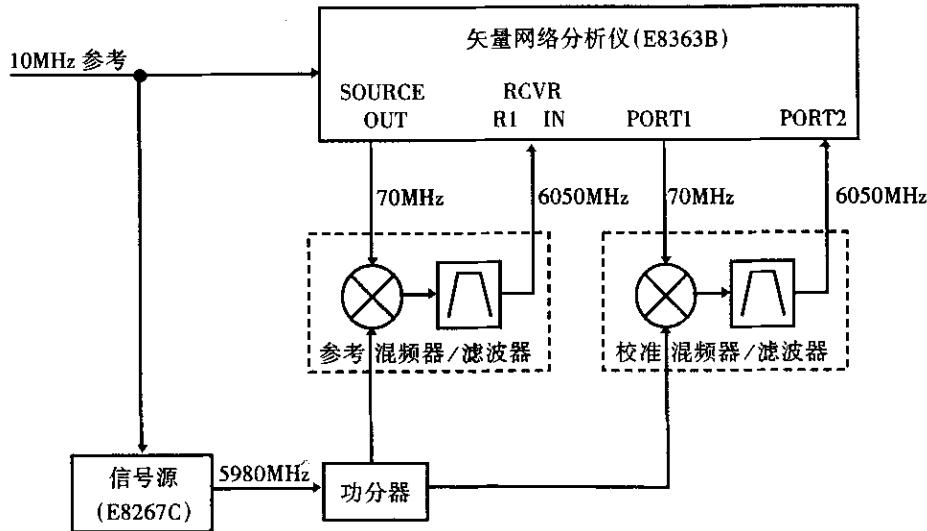


图 1 上变频器校准连接示意图

校准时需要设置的一个重要参数是矢网内部接收机的中频带宽,中频带宽较小时,会有效地滤除不需要的频率,消除接收机的干扰频率,这样可以提高测量质量,但是会降低校准的速度。中频带宽的设置一般为 $\leq 1\text{kHz}$ ,尤其是在网络分析仪内部源输出频率低于4GHz。

时,要将中频带宽设置得更低。

## 2.2 测量辅件的配置

校准混频器必须是互易的。互易性意味着上、下变频的幅度和相位变频响应要相等。表征校准混频器和滤波器的组合时要进行反射测量,并且校准混频器的测量总是上变频响应和下变频响应的组合,这些都要求校准混频器具有互易性。

参考混频器的选择要比校准混频器容易得多。从原理上讲,它不需要是互易的,性能上也不必与校准混频器或被测混频器相匹配,只需要覆盖与被测混频器相同的频率范围。但是,从实用的角度出发,选择宽带的、互易的混频器有利于与多种不同的装置配用。

混频器的混频产物非常多,其中包括本振频率及其各次谐波,以及频率为  $mLO \pm nRF$  ( $m, n \geq 1$ ,  $LO$  表示本振频率,  $RF$  表示输入射频频率) 的各阶混频产物,因此需要将不需要的频率滤除干净。以上变频为例,如果输入频率为 70MHz,本振频率为 5980MHz,则输出频率为 6050MHz,那么滤波器的选取需要考虑如下要求:

(1) 需要窄带的带通滤波器。矢量混频器校准需要滤除本振频率、差频和高阶混频产物,因此需要带通滤波器。同时,由于校准混频器及参考混频器的输出频率和本振频率以及差频频率非常接近,因此要求滤波器的带宽很窄。

(2) 校准滤波器具有互易性。这个特性要求和校准混频器的互易性要求具有相同的原因,它是从校准过程的反射测量来考虑的。

(3) 对本振频率的抑制要足够高。在此例中,上变频器的输出频率和本振频率最接近,因此考虑对本振的抑制就可以了。为了降低对网络分析仪中接收机接收频率的干扰,对本振频率的抑制要在 50dB 以上,这就要求滤波器的矩形系数相当好,且上边带和下边带对称。

(4) 带内波动、驻波比和插损小。对此要求不必很苛刻,因为在校准过程中,校准混频器和滤波器的组合误差将会被完全消除。

除上述要求外,滤波器阻抗的匹配以及接口适配器的恰当选择也是需要考虑的。

## 2.3 测量原理

在校准步骤完成以后,移去校准混频器和滤波器,换上被测系统或网络。测量的最佳条件是被测系统或网络与参考回路可以共本振,这样,参考回路可以提供精确的相位参考,群时延测量即可获得很高的测量精度。实际上,很多变频器的本振信号是不可能接入或引出的,因为这样会引入干扰。在这种情况下,用一个 10MHz 的信号作为被测系统和参考混频器的本振信号源的外部参考(见图 2)仍可进行测量。否则,由于参考回路和被测系统的本振不同源,在变频过程中会产生很大的相位误差,这样群时延测量将会彻底失败。两种测量相比较,后者的噪声较大,所以在测量中需要使用大幅度的平滑和平均,这样相位/群时延的测量仍然可以达到一个可接受的准确度。

群时延  $t_g$  是按下式计算得到的:

万方数据

$$t_g = -\frac{\Delta\varphi}{360\Delta f} \quad (2)$$

(2) 式中,  $\Delta\varphi$  为相位响应,  $f$  为频率,  $\Delta f$  项称之为延迟孔径, 群时延  $t_g$  值是相对于延迟孔径  $\Delta f$  而言的<sup>[4]</sup>。在矢量网络分析仪上通常以频率跨度的百分数来设置延迟孔径, 该百分数也叫做平滑百分数。孔径设置太小, 测量噪声会造成群时延测量读数不准确。加大孔径可以使噪声的影响变小, 但要牺牲频率分辨率。孔径的设置通常由测试人员视测量精度要求而定。在被测变频器为内置本振的情况下, 孔径大小的设置甚至会超过 10%。

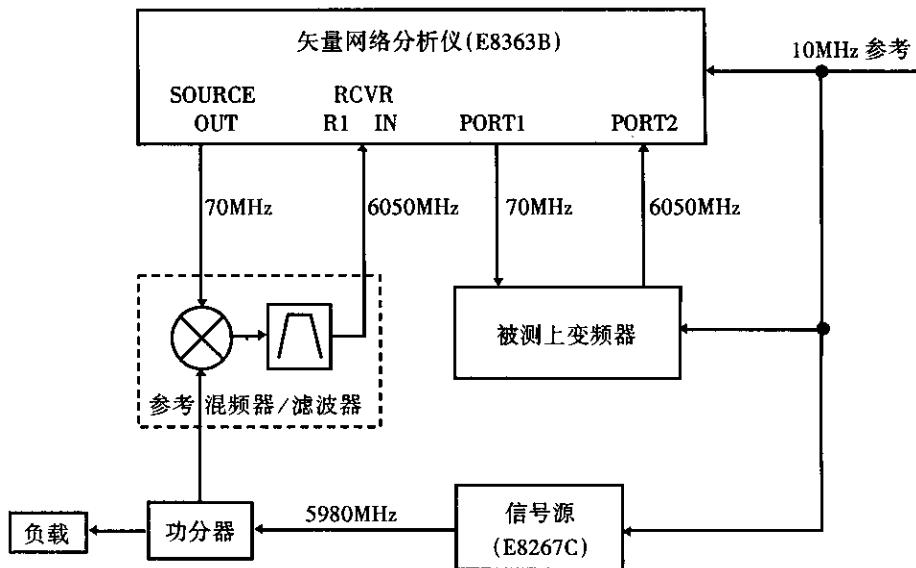


图 2 上变频器测量示意框图

### 3 测试结果不确定度分析

按照图 2 的安排作测试, 不加平滑的测试结果如图 3 所示。图 3 中, 上面的曲线为幅频特性曲线, 下面的曲线为群时延特性曲线。图中横坐标单位为 GHz, 对应这两曲线的纵坐标单位分别为 dB 和 ns, 图中显示的纵坐标的数据是对群时延特性曲线而言的。由图 3 可以看出群时延特性曲线受测量噪声影响较大, 此时在网络分析仪上显示的读数变化较大。图 4 为上述测试加 10% 平滑后的结果, 横坐标单位为 GHz, 该图显示的纵坐标的数据(单位为 dB)是对幅频特性曲线而言的。由图 4 可见, 平滑后群时延特性曲线较光滑, 读数也较稳定。

群时延测量不确定度可用下式计算<sup>[5]</sup>:

$$\text{相位精度} (\text{°}) \approx 360^\circ \times \text{孔径} (\text{Hz}) \quad (3)$$

从上式可以看出, 当孔径大小一定时, 群时延测量的不确定度由相位不确定度所确定, 事实上, 相位的不确定度又与传输系数有关。图 5 所示为 E8362B PNA 矢量网络分析仪采用全双端口校准的相位不确定度与传输系数之间的关系。

由图 4 可知, 上变频器测量的传输系数为 8.02dB。10% 的平滑所对应的孔径  $\Delta f = 4\text{MHz}$  (测量带宽 40MHz)。再由图 5 可知, 频率为 6GHz 左右时, 相位测量不确定度不超过 0.7°, 因此, 由(3)式计算出的群时延测量不确定度( $3\sigma$ )为 0.49ns, 置信因子  $k = 3$ 。

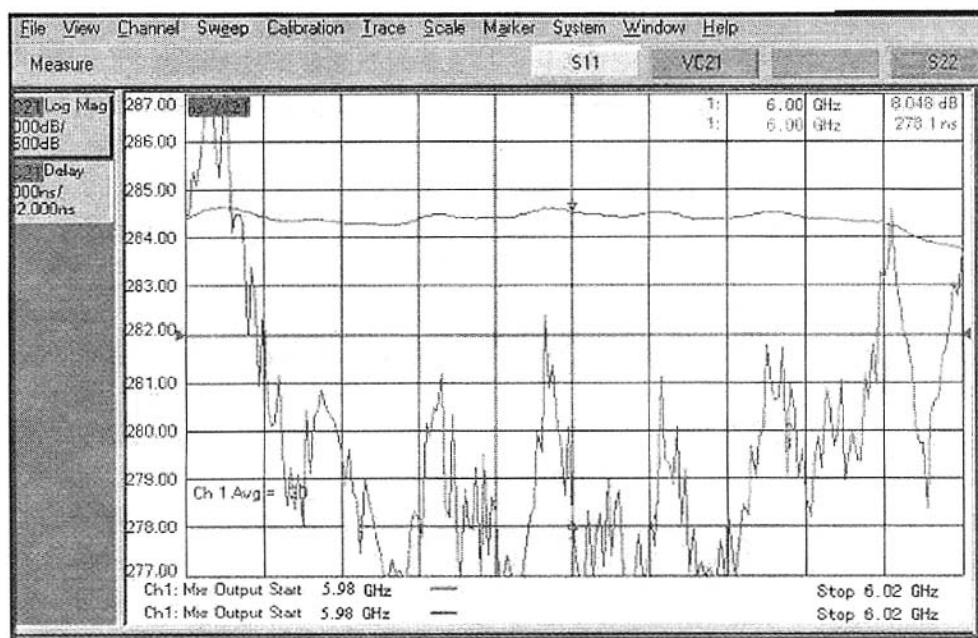


图 3 未加平滑的上变频器测试图表

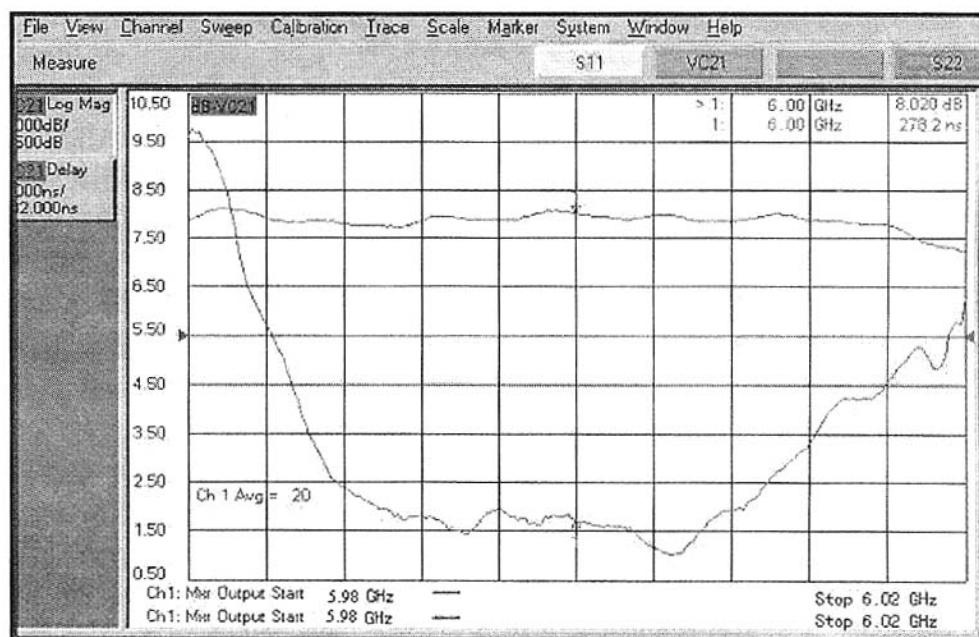


图 4 加平滑后的上变频器测试图表

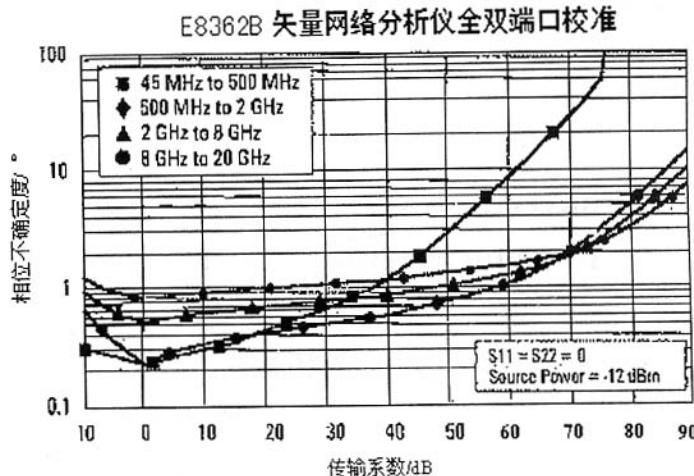


图 5 相位不确定度与传输系数关系图

#### 4 结束语

根据被测系统和网络的群时延特性曲线,一方面可以确定信号传输延迟时间的大小;另一方面可以根据群时延特性来了解系统或网络产生的信号线性失真,并且可以依据群时延失真情况采取群时延均衡技术,以使系统或网络的群时延失真减至最小,这也是提高通信系统信号传输质量的一种重要技术手段。因此,系统和网络的群时延特性的精密测量是非常重要的。

经过大量的试验,我们从失败与挫折中不断总结经验,逐渐掌握了变频器/混频器群时延测量的方法,包括测量前各种辅件的配置以及测量中的每一个操作步骤,并且体会到对测试中的每一个环节都要仔细考虑。只要做到这些,那么看似复杂的变频群时延测试也就可迎刃而解了。本文仅给出了上变频的群时延测量示例,下变频器的群时延测试方法和上变频器相似,只需要配置相应的混频器和滤波器以及本振信号源频率。

#### 参 考 文 献

- [1] 李德儒.群时延测量技术[M].电子工业出版社,1990.14-23.
- [2] 谢澍霖.信道群时延特性的工程测量[J].电讯技术,1991,31(3):8-14.
- [3] Agilent Technologies. 利用变频器应用程序进行混频器传输测量[Z]. Agilent 微波 PNA 系列网络分析仪应用指南, 2008-1. 2003.

- [ 4 ] 罗伯特. A. 威特(著)李景威 张伦(译). 频谱和网络测量[ M ]. 科学技术文献出版社, 1997. 214.
- [ 5 ] Agilent Technologies. Agilent PNA 系列微波网络分析仪技术资料[ Z ]. 2002.

## **Determining Converter 's Group Delay Characteristic by Vector Network Analyzer**

ZHANG Hui-Jun CHEN Shu-Fang

( National Time Service Center Chinese Academy of Sciences Lintong Shaanxi 710600 China )

### **Abstract**

The group delay, which characterizes the linear distortion of the system and network, is an important transmission characteristic. The method of measuring the converter 's group delay by the high-performance PNA vector network analyzer is discussed. The key points and skills to realize the measurement are expounded combining with specific examples. Finally, the measurement results and uncertainty are analyzed.

**Key words :** group delay ; vector network analyzer ; converter ; measurement

## 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>

