

文章编号:1000-8829(2004)01-0014-03

射频和微波元器件的测试

Measuring of RF and Microwave Devices

(中国航空工业总公司 无锡 607 所,江苏 无锡 214063) 蒋晓红

摘要:介绍了使用矢量网络分析仪测试射频和微波元器件的方法,包括滤波器、定向耦合器、放大器、混频器、开关、电缆等器件主要参数的测试方法。

关键词:矢量网络分析仪;滤波器;定向耦合器;放大器;混频器;开关;电缆

中图分类号: TN6

文献标识码: A

Abstract: The methods of measuring RF and microwave devices by using vector network analyzer are presented. The methods include measuring of the main parameters of filter, coupler, amplifier, mixer, switch and cable etc.

Key words: vector network analyzer; filter; coupler; amplifier; mixer; switch; cable

电子元器件是电子装备的基础。它们的性能、质量和可靠性直接影响电子装备的优劣。对电子元器件参数的测量是保证元器件质量的重要手段。射频和微波元器件的测试有相当的特殊性,必须了解其参数特性,使用正确的测试方法,才能获得满意的测试结果。笔者近年来主要使用矢量网络分析仪测试了大量的滤波器、定向耦合器、放大器、混频器、隔离器、开关、电缆等射频和微波元器件,积累了丰富的经验,现介绍如下。

1 滤波器

滤波器是通用的无源性二端口器件,对滤波器的全面表征通常用扫频测量来实现。滤波器的主要特性包括插入损耗、3dB 带宽、矩形系数、相位波动、带外抑制等参数。

3dB 带宽可以利用矢量网络分析仪标记读数功能直接方便地读出,同样可以直接读出 40dB 带宽,两者的比值即是矩形系数。图 1 是用 HP8753D 矢量网络分析仪测试某型声表面滤波器 3dB 带宽的曲线和标记读数。

带外抑制是表征滤波器抑制带外所有信号的性能。矢量网络分析仪测量带外抑制的能力直接取决于系统的动态范围指标。

相位波动参数的测试是利用矢量网络分析仪的电子延迟 (electrical delay) 功能来实现的。直接观察插入相移通常不是

很有用,这是因为器件的电长度相移相对于频率呈现负斜率(器件越长,斜率越大)。由于只有偏离线性相移才引起失真,因此希望移去相位响应的线性部分。利用矢量网络分析仪的电子延迟功能,能够抵消被测器件的电长度,结果得到与线性相移的偏差,即相位波动(失真)。图 2 是用 HP8753D 测试某型声表面滤波器相位波动的曲线,实测该型声表面滤波器 3dB 带宽内相位波动 $< \pm 4.5^\circ$ 。

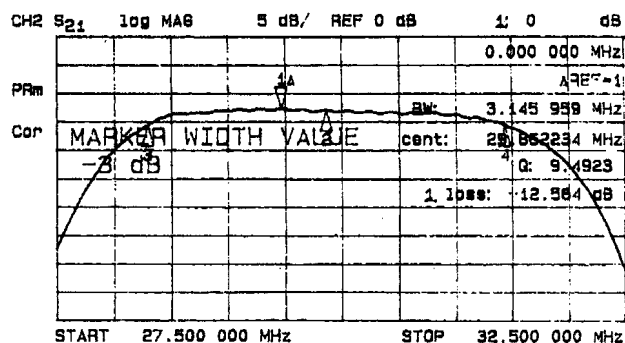


图 1 声表面滤波器 3dB 带宽

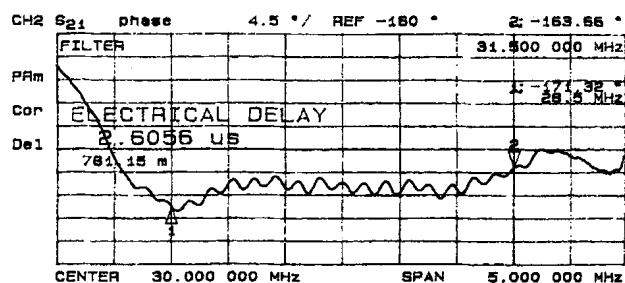


图 2 声表面滤波器 3dB 带宽内相位波动

2 定向耦合器

定向耦合器的特性包括耦合系数、插入损耗、隔离度、定向性和驻波。

耦合系数是把定向耦合器正向放置,主臂输出端接匹配负载,测试耦合臂的 S_{21} 参数;插入损耗是把定向耦合器正向放置,耦合臂输出端接匹配负载,测试主臂的 S_{21} 参数;隔离度是把定向耦合器反向放置,在输入端接匹配负载,并在反方向激励功率,测试耦合臂输出端与主臂输出端的 S_{21} 参数。

定向性是描述定向耦合器对反向流动信号隔离能力的量度,是隔离度与耦合系数之差。

在测试小耦合度的定向耦合器时,会发现实测插入损耗大

收稿日期:2003-04-26

作者简介:蒋晓红(1971—),女,高级工程师,主要从事无线电计量测试工作。

于厂家给出的指标。图 3 是用 Agilent 8510C 测试某型定向耦合器(耦合度 = 6 dB)的插入损耗曲线,插入损耗 < 1.65 dB,而厂家指标插入损耗是 0.40 dB。这是由于定向耦合器的实际插入损耗包括两部分:耦合损耗 L_{ic} 和由欧姆损耗等产生的插入损耗 L_{ir} , $L_{it} = L_{ic} + L_{ir}$ 。厂家指标指得是 L_{ir} ,实际插入损耗 L_{it} 必须扣除耦合损耗 L_{ic} 后得到 L_{ir} ,才能与厂家指标相比较。耦合损耗 L_{ic} 是可以计算的,其方法如下:

对于理想的定向耦合器, $L_{ir} = 0$ 且定向性无穷大,此时它的输入功率为 P_{in} 、主路输出功率为 P_{mout} 、支路输出的耦合功率为 P_{cout} 。

$$P_{in} = P_{mout} + P_{cout}$$

$$\text{定向耦合器耦合度 } L_c(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{cout}}$$

$$\text{定向耦合器的耦合损耗 } L_{ic}(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{mout}} = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{in} - P_{cout}}$$

$$= 10 \log(1 - 10^{-\frac{L_c(\text{dB})}{10}})$$

当 $L_c(\text{dB}) = 6 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 1.25 \text{ dB}$; 当 $L_c(\text{dB}) = 10 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 0.46 \text{ dB}$;

当 $L_c(\text{dB}) = 20 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 0.044 \text{ dB}$; 当 $L_c(\text{dB}) = 30 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 0.004 \text{ dB}$ 。

当非理想的定向耦合器的附加插损 $L_{ir} = 0.40 \text{ dB}$ 时,它的实际插入损耗是:

当 $L_c(\text{dB}) = 6 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 1.25 \text{ dB}$, $L_{it} = 1.25 + 0.4 = 1.65 \text{ dB}$;

当 $L_c(\text{dB}) = 10 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 0.46 \text{ dB}$, $L_{it} = 0.46 + 0.4 = 0.86 \text{ dB}$;

当 $L_c(\text{dB}) = 20 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 0.044 \text{ dB}$, $L_{it} = 0.044 + 0.4 = 0.444 \text{ dB}$;

当 $L_c(\text{dB}) = 30 \text{ dB}$, $L_{ic}(\text{dB}) = 0.004 \text{ dB}$, $L_{it} = 0.004 + 0.4 = 0.404 \text{ dB}$ 。

可见,图 3 的实测插入损耗值是符合厂家指标的。

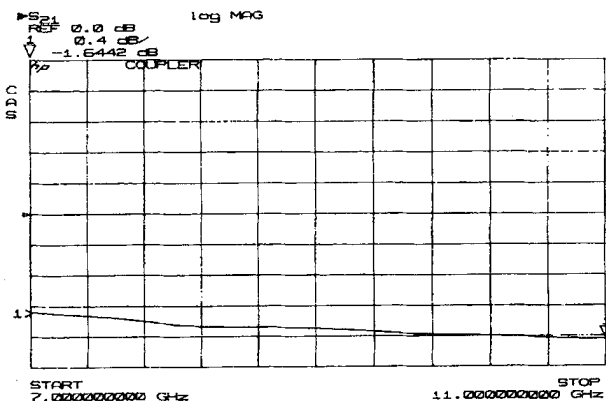


图 3 定向耦合器的实测插入损耗

3 放大器

放大器的特性包括增益、平坦度、驻波、1 dB 压缩点等参数。放大器有线性工作区,增益是常数且与输入功率无关。当输入功率增加到某一点时,放大器增益下降,即该放大器出现增益压缩。当输入功率进一步增加时,放大器变成饱和状态,输出

功率保持常数。1 dB 增益压缩点即是使放大器增益下降 1 dB 的输入功率(有时候把放大器产生 1 dB 增益下降时的输出功率定义为 1 dB 增益压缩点)。

利用矢量网络分析仪的功率扫描功能来测量放大器输出功率与输入功率的关系。测试时功率扫描的范围要足够大,以便保证能驱动被测放大器从线性区进入压缩区。需要注意,当被测放大器的输出功率超过矢量网络分析仪接收机的输入压缩电平时,对放大器的输出进行足够大的衰减也很重要。这不仅能防止损坏矢量网络分析仪的接收机,而且也能将功率电平维持到足以不使接收机出现增益压缩。为此,可以利用衰减器、耦合器或两者的组合来完成。衰减器和耦合器频率响应的影响可以利用适当的误差修正来消除或减小到最低限度。

图 4 是用 HP8753D 测试某型放大器 1 dB 增益压缩点(线性输出功率)的曲线。

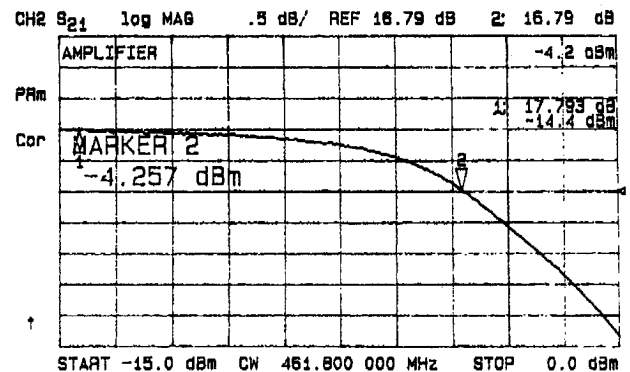


图 4 放大器 1 dB 增益压缩点

4 混频器

混频器的主要特性包括变频损耗、隔离度、驻波。

变频损耗量度混频器将能量从一个频率转换到另一个频率的有效程度。它定义为在给定本振功率下输出功率与输入功率的比值。所采用的本振功率电平应与混频器实际工作期间所用的电平相同。这非常重要。

具有频率偏置方式的矢量网络分析仪可以实现固定本振、扫中频的变频损耗测试。测试时,去掉矢网 R 通道的跨接线,将混频器中频输出端加滤波器后输入到矢网 Ref - IN(参考输入)端口。适当的滤波十分必要,能滤掉无用的混频产物,保证 R 通道正确锁相。

隔离是泄漏或从一个端口至另一端口的馈通的量度。

当对射频或中频端口进行隔离和驻波测试时,所采用的本振功率电平也必须与混频器实际工作期间所用的电平相同,不用的端口必须端接匹配负载。

5 开关

开关的特性包括插入损耗、隔离度和驻波参数。

在测量高隔离度的开关时,必须提高仪器动态范围,降低仪器噪声,才能获得满意的测量结果。通过降低接收机中频带宽,可以提高矢量网络分析仪的动态范围。一般而言,中频带宽减小 10 倍,背景噪声可降低 10 dB。

操作时注意,必须先设置中频带宽后再进行校准。

6 电缆

电缆的特性包括插入损耗、驻波参数。

测试电缆时,首先一定要连接可靠,必要时采用扭力扳手(特别在使用 3.5 mm 连接器时);其次,特别对于长电缆,必须正确设置扫描时间。图 5 迹线示出当用 Agilent 8722ES 矢量网络分析仪设置 100 ms 扫描时间测量 1.5 m 长 Agilent SMA 电缆 11500F 时所得到的结果。不仅数据存在误差,而且误差的大小在某些频率上出现明显的跳变。

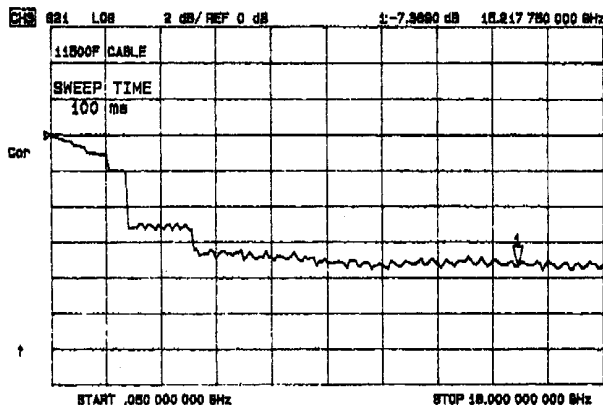


图 5 设置 100 ms 扫描时间测长电缆

这是由于测试时长电缆产生了时间延迟造成的。如果被测件是一根有时间延迟 T 的电缆,而矢量网络分析仪的扫描速率为 df/dt ,则在电缆终端(矢量网络分析仪接收机的输入端)上的信号源频移的大小为 $F = T \times df/dt$ 。若这个频移远大于矢量网络分析仪的中频检波带宽(典型情况下为数 kHz),那么将产生由于处在中频滤波器频率响应曲线的范围之外而引起的误差。

解决的办法是增加矢量网络分析仪的扫描时间,补偿电缆时间延迟。当用 Agilent 8722ES 设置 10 s 扫描时间测量 1.5 m 长 Agilent SMA 电缆 11500F 时,得到了正确的结果,如图 6 所示。

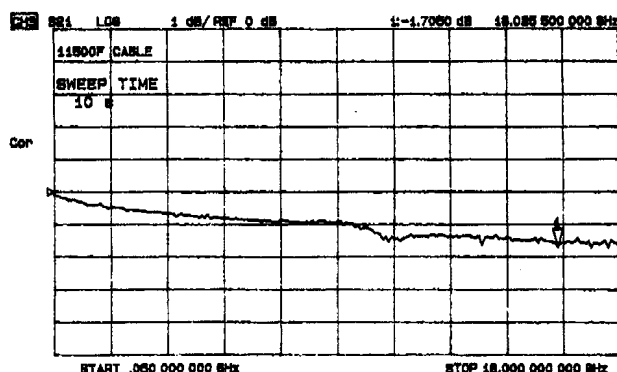


图 6 设置 10 s 扫描时间测长电缆

测试步骤为:矢量网络分析仪先设置一定的扫描时间,进行直通校准后,测试 S_{21} 参数;增加扫描时间,再进行直通校准后,测试 S_{21} 参数,两次测得的 S_{21} 参数迹线相比较,如果不同,则再增加扫描时间,重复上述步骤,直到两次测得的 S_{21} 参数迹线相同时为止。

如果有与被测电缆相同的第二根电缆,不用增加扫描时间,通过取消矢量网络分析仪上的 R 通道接线而连接上第二根电缆,结果便可得到修正。这使得参考路径与测试路径中的延迟相等,因此矢量网络分析仪按比值计算的传输测量便不会有频移误差。

参考文献:

- [1] 汤世贤. 微波测量[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
- [2] 惠普公司. 8753D Network Analyser User's Guide[Z], 1994 - 10.
- [3] 惠普公司. HP 网络分析仪的应用[Z]. 1998 - 06.

全球虚拟仪器盛会——NIDays 2003 中国站活动成功举行

[本刊讯]NIDays 2003 中国地区的活动于 11 月在上海、西安、北京、深圳和香港五地相继举行。这是 NI 公司连续第六年在中国举办大型的用户年会,同历年的 NIDays 一样,本次活动受到了来自各个行业的测试、研发工程师和广大相关专业的师生们的极大关注。在上海与北京两站均有近 500 名用户到会,而西安、深圳和香港也创下了参与人数的历史新高。同时,NI 还将会场选在各个城市中极具代表性的地点,例如上海国际会议中心、西安宾馆、北京国际会议中心等地,让参与活动的用户们在舒适、良好的环境,以及友好、合作的气氛下了解虚拟仪器技术的最新发展,并分享成功应用 NI 产品的经验心得。

NIDays 并非一般意义上的用户聚会,高技术含量是它的一大特点。展示区域常常是人头攒动,NI 和数家联盟商——北京中科泛华测控技术有限公司、陕西海泰电子责任有限公司、陕西四海测控技术有限公司和 VI Services(维艾仪器服务网络)等携手展出了最新最炫的虚拟仪器产品演示,包括倒立摆、3D 直升机、紧凑型视觉系统(Compact Vision System)、cFP + PDA、运用了 NI 运动控制和机器视觉功能的机器人等等。NIDays 为与会

者提供了一个平台,得以近距离地接触 NI 的产品演示,聆听 NI 资深工程师的详细说明,并有机会互动地参与演示操作。在短短的一天时间内,NI 安排了多场主题研讨会,其内容涵盖了 NI 的诸多软硬件产品,方便客户选择参加自己感兴趣的议程。

为了帮助未来的工程师们更好地了解虚拟仪器的概念,NI 今年还在上海和香港特设学生专场,吸引了逾百位高校学生。NI 总部研发部高级付总裁 Tim Dehne 和大中国区总经理陈大庞先生首先做了一个简短的演讲,之后会议进入了自由发言阶段,学生们踊跃提问,会场气氛非常活跃。

11 月 4 日上海 NIDays 的新闻发布会是 NIDays 今年的又一个亮点,NI 研发部高级付总裁 Tim Dehne 和市场销售部高级付总裁 Pete Zogas 在分别介绍了研发部门与最新产品的情况后,回答了记者们提出的诸如 LabVIEW 发展的未来趋势,以及 NI 对中国的投资计划等极具代表性的问题。

作为 NI 全球增长最快的地区之一,中国地区 NIDays 的成功举办以及现场来宾的热情参与将激励他们推出更多更好的产品,为用户提供更可靠更全面的支持。

射频和天线设计培训课程推荐

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;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),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,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,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>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>