

网络分析仪的工作原理及在测量领域的应用

谷歆海

(南京电子技术研究所,江苏省南京市210013)

摘要:介绍了矢量网络分析仪的基本原理、应用范围,通过对矢量网络分析仪原理的介绍和误差修正,帮助理解和改进使用矢量网络分析仪进行测量的各种方法。同时详细介绍了矢量网络分析仪在部分测量领域的使用。包括:如何解决高功率放大器在测量中大功率电平的问题;如何解决电缆测量中延迟时间的问题;如何改进反射测量;如何利用频偏方式来测量混频器、变频器和调谐器等频率转换器件;如何提高非插入式器件测量的精度。

关键词:矢量网络分析仪;微波测量;误差分析

中图分类号:TM932

0 引言

网络分析是指设计制造人员或制造厂家对较复杂系统中所用元器件和电路(以下统称元件)电气性能进行测量的过程。当这些系统传送具有信息内容的信号时,最关心的是如何以最高效率和最小失真使信号从一处传到另一处。矢量网络分析是通过测量元件对频率扫描和功率扫描测试信号幅度与相位的影响,来精确表征元件特性的一种方法。矢量网络分析仪能对有源器件和无源器件如放大器、混频器、双工器、滤波器、耦合器和衰减器的特性进行表征,对每个端口的输入特性到其他端口的转移特性进行测量的能力,可以为设计人员在对大型系统配置元件时提供充分的依据。因此,矢量网络分析仪是微波网络设计和测量最重要的测量仪器之一,已成为微波测量中必不可少的测量仪器,得到了非常广泛的应用。

1 基本原理

1.1 原理框图

矢量网络分析仪是由激励信号源、 S 参数测量装置(信号分离电路)、幅相接收机的有机结合。图1是微波一体化矢量网络分析仪整体系统框图。

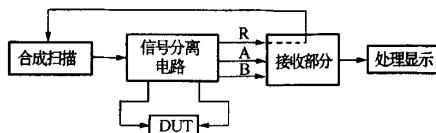


图1 矢量网络分析仪整体系统框图

微波合成扫频信号源产生可以到毫米波段的激励

信号,经信号分离电路分离出 DUT(被测件)的入射信号 R、反射信号 A 和传输信号 B,采用采样变频技术将上述微波信号转换成固定的中频信号,进行幅度和相位关系的测量。在频率变换过程中,采用系统锁相技术,以保证被测网络的幅度信息和相位信息不被丢失,包含被测网络幅度信息和相位信息的第一中频信号经中频处理电路变成为第二中频信号,由 A/D 转换器转换为数字信号,内部计算机和 DSP(数字信号处理器)从数字信号中提取 DUT 的幅度信息和相位信息,通过比值运算求出 DUT 的 S 参数。

1.2 误差分析

所有的测量系统(包括矢量网络分析仪系统)都可能包含 3 类测量误差:系统误差、随机误差和漂移误差。矢量网络分析仪的测量误差,基本上可以分为随机误差和系统误差两大类。随机误差是不可重复的误差项,如电路特性随环境温度的漂移、外部电气干扰、测量系统的噪声、测试信号源的相位噪声、测量过程中或校准过程中连接端口的测量重复性和开关重复性等都属于随机误差,在测试仪器中减小随机误差的最有效方法是对测试数据进行平均或平滑处理。

由于微波、毫米波部件的不完善性所引入的误差称为系统误差,如定向耦合器的方向性误差、信号源失配误差、负载的失配误差、测试通道之间的频率跟踪误差以及通道之间的串扰等都是系统误差。它们是仪器测试不确定的主要来源,而在一个稳定的测量环境中,这些影响是稳定、可重复的,因而也是可表征的。减小系统误差的方法主要靠不断改进有关微波部件的设计和制造技术,力求提高其性能指标(例如提高定向耦合器的方向性、耦合的平坦度、减小各种接头的驻波比等),或者在点频下利用复杂的阻抗调配技术来改善微波部件的性能,即用物理的方法来减小或消除系统

误差。实际上,宽带微波部件的调配方法只能用于点频测量,且极为繁琐复杂,致使宽带扫频测量达不到高精度测量的要求。引入计算机技术,通过数学运算来消除扫频测量中的系统误差,从而提高了测量精度,通过测量校准和误差修正技术的应用大大地补偿了硬件的不足。网络分析仪的误差分析及误差修正功能使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。通过测量校准和误差修正的校准件的精度转移到矢量网络分析仪中,矢量网络分析仪的测试精度将取决于所使用的校准件和校准方法。

误差修正主要有4个关键步骤:误差模型的建立、用已知特性的校准件进行测量校准、误差模型中误差参数的提取、从被测网络的实测S参数中提取真实的S参数。

2 网络分析仪在部分测量领域的使用

矢量网络分析仪在5 Hz~110 GHz频率范围内进行测量。设计人员在制造过程中的最终测试常使用网络分析仪,它是全面测量网络参数的一种高精度智能化仪器,能测量和显示电气网络的整体幅度和相位特性,这些特性包括S参数、幅度和相位、SWR(驻波比)、插入损耗和增益、衰减、群延迟、回波损耗、反射系数和增益压缩。

2.1 高功率放大器测量

对高功率放大器进行测量需要解决一些经常碰到的问题。首先,因为测量所需要的信号电平可能会超出网络分析仪的激励范围,高功率放大器常常需要高的输入电平对其在类似于实际应用条件下的特性进行表征。其次,放大器的输出功率也可能超出网络分析仪接收机的压缩电平或烧毁电平。当需要的输入电平高于网络分析仪可能提供的电平时,需要利用网络分析仪开放的连接接口,将前置预放大器安装在仪表源输出端和定向耦合器的输出端,这样,该放大器引起的系统误差也可通过端口校准消除。另外,参考通道信号应在预放处理后提取,在前置放大器的输出端利用耦合器,可以将被提升的输入信号的一部分用于分析仪的参考通道,这样有利于仪器保持锁定和测量的稳定,同时可以消除前置放大器频率响应和漂移误差,从而对放大器进行精确的测量。当被测放大器的输出功率超过网络分析仪接收机的输入压缩电平时,可以利用耦合器、衰减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程度。当用额外的衰减进行校准时,应当注意,在校准期间加到接收机的输入电平有可能降低。为了进行精确测量,功率电平必须高于接收机的

本底噪声。为此,通常将具有窄带调谐接收机的网络分析仪用于高功率应用,因为此类网络分析仪的本底噪声通常小于-90 dBm,并且在宽广的功率电平范围内接收机都能呈现优良的线性。

2.2 电缆测量中延迟时间问题

网络分析仪在测量过程中,激励源是按照扫描时间的设置进行,扫描的速度为 $d\phi/dt$ 。由于来自DUT的信号频率在给定瞬间时可能与网络分析仪的频率不完全一致,故接收机会得到信号的错误信息,从而使测量结果造成错误。若DUT是一根有时间延迟T的长电缆,则在电缆终端(网络分析仪接收机的输入端)上的信号频率将滞后于网络分析仪信号源频率 $F = Td\phi/dt$ 。若这个频移远大于接收机的检波中频带宽(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。图2给出了用网络分析仪测量一根长度为4.27 m的电缆的传输响应。曲线1表示利用1 s的扫描时间,曲线2利用的是缺省扫描时间,两者数据相差约0.5 dB,这个扫描时间对于特定的DUT来说太快了。要解决这个问题,可采用增加扫描时间和在参考测试通道使用延迟线的方法。

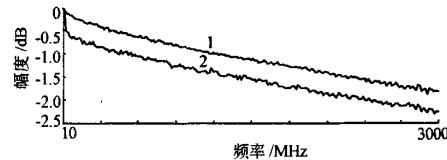


图2 被测电缆的传输响应

2.3 反射测量

对二端口元件进行测量时,要求在未测端口上有良好的终端负载。这一点尤其是对低损耗双向元件,如通带滤波器和电缆来说更加重要。网络分析仪只对反射测量提供单端口校准,它能修正由方向性、源匹配和频率响应引起的误差,但不能修正由负载匹配引起的误差。单端口校准假定在DUT的端口2(此端口未被测量)接有良好的匹配负载,因为匹配负载未被修正。为此,其中的一个方法是将一个高质量的负载接到元件的端口2上。这种方法能给出与全二端口校准不相上下的测量精度。然而,若元件的端口2直接与网络分析仪的测试端口相连,则有良好终端负载的假定不能成立。将一个衰减器(例如6 dB~10 dB)放在元件端口2与网络分析仪的测试端口之间能显著改善测量精度。这可以使网络分析仪的有效负载匹配改善达衰减器的2倍。比如,测量一个插入损耗1 dB、回波负载匹配18 dB及方向性40 dB的分析仪,将对回波损耗给出为-4.6 dB、10.4 dB的最坏情况测量不确

定度。这个变化范围过于偏大,可能造成本来不符合指标的滤波器变成合格,或使良好的滤波器变为不合格。增加高质量(例如 $\text{SWR} = 1.05$, 或匹配 32 dB)的 10 dB 衰减器使网络分析仪的负载匹配改善到 29 dB ($(2 \times 10 + 18)$ 与 32 dB 相组合), 这时最坏情况的测量不确定度减小到 2.5 dB 、 -1.9 dB 。这一变化范围就更为合理。能有效地利用单端口校准而没有任何串联衰减的一个例子, 是对反向隔离很大的放大器的输入匹配进行测量。在这种情况下, 放大器的隔离实质上消除了不良负载匹配的影响。

2.4 利用频偏工作方式精确测量混频器、调谐器和变频器

射频变频元件测量实际上可以是针对不同的元件, 这些元件共同的特点是利用其非线性使输入/输出信号发生频率的变化。常见的变频器包括混频器(Mixer)、处于非线性区的放大器、单独的混频器件、I/Q 调制解调器, 以及滤波器和放大器的射频前端电路等。

与其他元件一样, 对变频器也需要测量其传输/反射特性。如输入/输出端口及本振输入的匹配特性、传输特性、端口间的信号隔离等参数。与其他元件测量相比, 混频器的测量具备以下技术特点:

a) 三端口: 混频器包含输入、输出和本振 3 个端口, 测量过程需要更复杂的仪器配置。

b) 传输参数测量: 精确地测量混频器的传输特性是混频器测器中的难点, 特别是关于其相位参数的测量, 这需要测量仪器具备频率偏置功能。

c) 校准技术: 任何仪器完成测量都会包含仪器的系统误差, 网络分析仪测量过程中可以通过校准来消除其系统误差, 保证测量精度。对混频器的测量, 因为其输入和输出不同频, 所以需要采取新的校准方法消除仪器系统误差。

混频器的传输特性(变频损耗)定义为输出信号功率与输入信号功率的比值, 该指标与本振的功率有直接关系。从概念上来说, 传输相位特性应为元件输出信号与输入信号的相位比值, 但对变频器而言, 其输出信号与输入信号是不同频率的, 不同频率信号进行相位比较是没有意义的。所以对于变频器的相位参数测量必须利用参考混频器来提供参考信号。针对反射参数测量, 测量仪器工作在同频状态, 网络分析仪可通过端口校准消除仪器的系统误差, 可得到 DUT 精确的反射参数。但对传输参数的测量, 无论采用哪种测量配置方案, 测量结果都会受到参考混频器的影响, 需要利用新的校准方法消除参考混频器引起的测量误差。为测量混频器的矢量传输性能, 可采用参考混频器和

被测混频器并联配置方案。参考混频器和被测混频器工作在相同的变频关系下。测量过程中, 两个混频器实际上共用相同的激励和本振信号, 这样可以保证相位的相干性。当对混频器进行测量时, 任何一种方法都需要中频滤波器来消除混频器不希望的混频分量及射频和本振泄漏信号。利用网络分析仪的参考接收机和端口 2 接收机分别测量参考混频器和被测混频器的输出信号, 这两个信号为同频信号, 可以完成相位比较, 所以可得到被测混频器的传输相位参数。

2.5 提高非插入式元件的测量精度

适配器等效互换法需要使用性能相同、但有不同阴阳连接器的两个精密匹配的适配器。为了实现等效互换, 适配器必须有相同的匹配性能、特性阻抗、插入损耗和时延。适配器等效互换法的第一步是用第 1 个适配器进行校准,

测量射频和微波元件时, 全二端口误差修正能给出最高精度。但当有非插入式元件时(例如, 2 个端口均为阴接头的器件), 则它的测量端口在校准期间不能直接相连, 特别是在对输出端匹配不良的元件, 如放大器或低损耗元件进行测量时, 需要格外小心。以下 4 种方法可以处理非插入式元件直通连接时的潜在误差:

a) 利用很短的直通段。这种方法允许不必考虑潜在误差。当在校准期间将端口 1、2 相连时, 分析仪便计算第 2 个端口(负载匹配端口)的回波损耗以及传输项。当校准配件的说明中未包含直通段的正确长度时, 在对负载匹配的测量中便会出现误差。若用圆筒将端口 1、2 相连, 对端口 2 匹配的测量便将没有正确的相位, 误差修正算法将不会消除端口 2 不完善阻抗的影响。若直通段连接非常短, 则这种方法特别有效。然而, 对于典型的网络分析仪, “短”意味着小于 $1/100$ 波长。若直通连接为 $1/10$ 波长(在所关心频率上的波长), 则修正后的负载匹配并不比原始负载匹配好。当直通长度接近于 $1/4$ 波长时, 剩余负载匹配还要差 6 dB 。对于 1 GHz 的测量, $1/100$ 波长意味着小于 3 mm 。

b) 利用等效替换适配器。此方法需要使用性能相同、但有不同阴阳连接器的 2 个精密匹配的适配器。假定仪器测量端口 2 个都是阳头, 并且元件有 2 个阴接头端口。通常, 将阴/阴直通适配器接到端口 2, 并执行校准的传输部分。此后, 移去阴/阴直通适配器, 并将第 2 个适配器接于端口 2 上, 于是第 2 个适配器就成为等效端口。然后, 在 2 个端口上进行反射校准。此后, 在接入第 2 个适配器的情况下测量 DUT, 校准后得到的误差等于 2 个适配器之差。

c) 修改直通段 – 传输线标准。若用于生产制造测量，则等效替换适配器法要求的另外的适配器可能是一个缺点。为此，可以修改校准配件的定义，以包含直通段传输线的长度。若校准配件经过修改已考虑了直通的损耗和延迟，则测量的将是负载匹配的正确值。找出阳/阳、阴/阴直通段的这些值是很容易的。首先，执行等效替换适配器校准，以 2 个阴接头或阳接头测试端口结束。然后，简单地测量非插入式直通段，并考察 S_{21} 延迟（利用频率中心值）和损耗。利用这个值来修改校准配件。

d) 利用适配移去技术。许多网络分析仪都提供适配器移去技术来消除直通段适配器的影响。这项技术能给出最精确的测量结果，但要求 2 次全二端口校准。

3 结束语

网络分析仪的型号很多，但只要了解仪器的原理框图，熟悉仪器的信号流程，掌握仪器测量的误差分析，积累经验，不断学习，就能够熟练地掌握并灵活地应用网络分析仪的各种测量方法。

参 考 文 献

- [1] 汤世贤. 微波测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [2] 林守远. 微波线性无源网络 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] 王志田, 等. 无线电电子学计量 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.

谷歌海(1975-),男,工程师,主要从事微波仪器的计量/校准技术研究,计量管理工作。

Principle of Operation of Network Analyzer and Its Application to Electrical Measurements

GU Xinhai

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: The fundamental principles of Vector Network Analyzer, its application range are described in this paper. The description of fundamental principles of Vector Network Analyzer and its error correction would help you understand and improve your use of Vector Network Analyzer. Also application to some kinds of measurement, such as, how to solve problem of high power level in the measurement of high-power amplifiers, how to compensate for time delay in cable measurements, how to improve reflection measurements, how to use frequency-offset mode for accurate measurement of Mixers, Frequency-Converters and Tuners, and how to increase the accuracy of non-insertible device measurements.

Keywords: vector network analyzer; microwave measurement; error analysis

(上接第 14 页)

Application of DVI Display Technology in Radar Terminal

ZHANG Jiguo

(East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China)

Abstract: DVI(Digital Vision Interface) is a general standard in the field of computer and monitor. The standard describes the data transmission from the computer to the monitor. Function of plug-in and play-out is supported in DVI. The system can obtain better anti-EMI, longer distance and higher resolution with DVI rather than with VGA. This article introduces as an example a project of radar terminal. The software realizes display processing of object parameters and maps etc. The hardware carries out display processing of echo, receives the display data from graphic card by DVI standard, and mixes these two data streams, outputs the final display data by VGA and DVI standard. The requirement to the graphic card can be reduced very much in the system by this way. The final image of system is suitable for the project's requirement.

Keywords: DVI; radar terminal; display

微波射频测试仪器使用操作培训

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；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>