

# 超越 S 参数测试 ——矢量网络分析仪 PNA-X

David Ballo

(安捷伦科技公司 产品销售工程师)

## 0 引言

无论在研发还是在生产制造中,工程师在测试射频元件时都面临许多重大挑战。在研发过程中,更快并以较少的重复工作来解决设计难题至关重要。生产制造过程中,需要在保持精度和最大产出率的同时,缩短测试时间和降低测试成本。

减缓压力的方法之一是使用灵活的高度综合的测试解决方案——如 Agilent N5242A PNA-X 微波网络分析仪。由于 PNA-X 的先进体系结构,它不仅提供卓越的性能和精度,而且还能针对超越与网络分析仪相关的传统散射参数(S参数)的各种测量进行配置。一些内置组件(如第二个信号源和宽带合路器)能对射频和微波器件,尤其是放大器、混频器和变频器的非线性特性进行非常精确的表征,可以对这些器件的性能有更加全面的了解。

## 1 确保精确的系统模拟

精确的幅度和相位测量对应用在现代化无线和航空/国防系统设备中的器件至关重要。在设计阶段,系统模拟需要高度精确的元件表征来保证系统满足其性能要求。在生产制造中,精确的测量验证每一个元件是否满足其公布的指标。

S 参数在射频元件(如滤波器、放大器、混频器、天线、隔离器和传输线)测量中使用最为广泛。测量结果能确定射频器件在正向和反向传输信号时其以复数值(幅度和相位)表示的反射和传输性能。它们全面描述了射频元件的线性特性,这对全系统模拟来说是有很有必要的一部分,但要在全系统做更加完全的模拟时,仅仅进行 S 参数测试是不够的,诸如器件特性随频率变化而呈现出的幅度响应不平坦性或相位响应斜率的不恒定性等这些偏差都会引起严重系统性能下降。

器件的非线性特性也会造成系统性能的恶化。例如,如果放大器的驱动信号已经超过其线性工作的范围,则它将会出现增益压缩、调幅到调相(AM 到 PM)的转换及互调失真(IMD)。

## 2 核心测量概述

矢量网络分析仪(VNA)是测定元件特性最经常使用

的仪器。传统 VNA 包含一个给被测器件(DUT)和多测量接收机提供激励的射频信号发生器,以测量信号在正向传输和反向传输时入射、反射和传输信号,如图 1 所示。信号源在固定功率电平进行扫描以测量 S 参数,而在固定频率上对其功率扫描,可以测量放大器的增益压缩和 AM-PM 转换。这些测量能测定线性和简单非线性器件的性能。

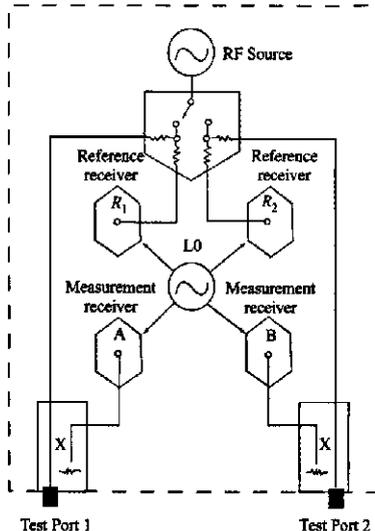


图 1 传统二端口 VNA 框图

对于基本的 S 参数和压缩测试,信号源和接收器调谐到相同的频率。不过,通过使信号源和接收机频率偏移,将接收机调谐至激励频率的整数倍,也能测出放大器的谐波性能。使信号源和接收机频率偏移的能力同样可以测量频率转换器件(如混频器和变频器)的幅度、相位和群延迟性能。

上述这些测量通常是使用连续波进行激励(CW)的,而许多器件要求使用脉冲射频测试,即测试信号必须以特定脉冲宽度和重复频率进行选通。

传统 VNA 有两个测试端口,这在大多数射频器件只有 1 个或 2 个端口时可满足需要。随着无线通信领域的快速增长,3 个或 4 个端口的器件已经非常普遍,因而四端口网络分析仪也和二端口网络分析仪同样会被普遍

使用。

### 3 简化放大器和混频器测量

利用二端口或四端口时,PNA-X 与传统 VNA 结构相比有 4 大改进。

(1)两个信号源:第二个内部信号源与第一个信号源的频率和功率电平设置是相互独立的。第二个信号源可用于非线性放大器测试如互调失真(IMD),或用作测试混频器和变频器的快速本地振荡器(LO)。

(2)宽带信号合路器:内部信号合路器可以在仪器的相关测试端口耦合器之前将两个源合并在一起。这便简化了需要两个信号源的放大器测试设置。

(3)信号切换和接入点:辅助开关和射频接入点能实现灵活的信号路径选择,并增加外部信号调理得硬件(如推动放大器)或外部测试设备(如数字信号发生器或矢量信号分析仪)。

(4)脉冲测试能力:内部脉冲调制器和脉冲发生器提供完全一体化的脉冲 S 参数解决方案。

这些改进简化了测试设置过程并在测量放大器、混频器和变频器时缩短了测试时间。这些新增加的特性结合在一起极大地扩大了对被测器件(DUT)进行一次连接可以实现的测量范围。图 2 示出一个对放大器的 S 参数、增益压缩和相位压缩及固定信号 IMD 进行同时测量的实例。

两个内置信号源的性能增强也会简化放大器和混频器测量。例如,测试端口可利用的最大信号功率通常为 +13~+20 dBm(取决于型号和频率)。这对将放大器驱

动到非线性区很有帮助,并且在把信号源用作测试混频器的 LO 信号时也经常要这样。这两个内置信号源的谐波成分也非常低(通常为 -60 dBc 或更低),从而提高谐波和 IMD 测量的精度。此外,典型置为 40 dB 的功率扫描范围使得在表征放大器的特性时很容易就可以让放大器从线性工作范围转化到非线性工作范围。

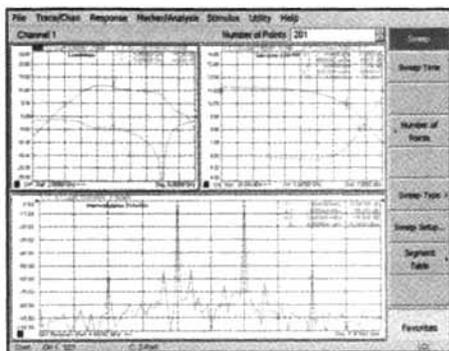


图 2 显示表对放大器的 S 参数、压缩和 IMD 进行同时测量的 PNA-X 实例

### 4 解决各种测量问题

虽然 VNA 只需一个射频源就可以测量元件的 S 参数、压缩和谐波,但增加第二内部信号源则可以对更为复杂的非线性特性。如 IMD,进行测量,特别是当这两个源与网络仪内部的信号合路器配合使用时尤其如此。

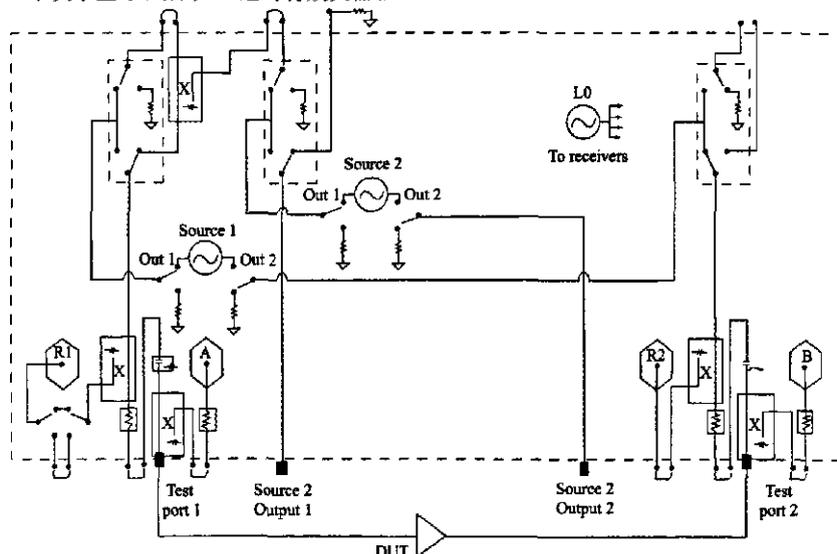


图 3 针对 IMD 测量配置的二端口 PNA-X 框图

对于 IMD 测量,使用信号合路器将两个信号合并,然后送到被测放大器(AUT)的输入端。图 3 给出 PNA-X

如何使用内部信号源和合路器来完成此过程。AUT 的非线性会引起与被放大的输入信号一道出现

的互调分量。在通信系统中,这些多余的分量将进入工作频段且不能通过滤波去除。实践中,只测三阶分量,因为它们造成系统性能下降的最重要因素。

图4给出一个用PNA-X完成的扫描IMD测量实例。两条居中迹线显示激励信号,下方两条迹线显示IMD分量。最上方的迹线则是利用了PNA-X特别有优势的公式编辑特征计算并显示的三阶截获点(IP3)。

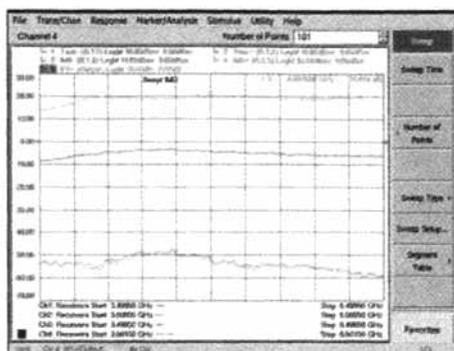


图4 扫频IMD测量的PNA-X实例

在扫描状态下进行IMD测试的一个非常有用的改变是对功率电平而不是对频率进行扫描,这有助于研发工程师们建立晶体管和放大器非线性行为模型。在图5显示的测量结果中,可以看到基频信号以及三阶、五阶和七阶互调分量的幅度和相位随输入功率的变化而变化的情况。

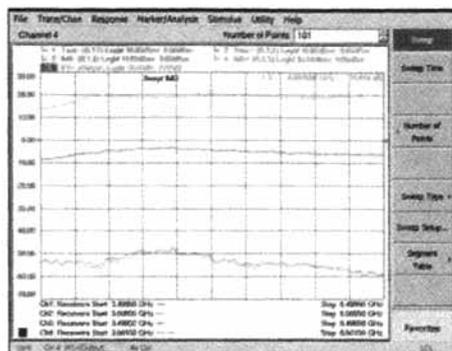


图5 PNA-X进行功率扫描IMD测试的实例

与其他方法相比,使用VNA进行以上测量有3个优点:首先,只用一台测试仪器,只进行一次链接便能对全部参数进行测量;S参数、增益压缩、输出谐波、IMD等;其次,与使用频谱分析仪相比,用功率计对VNA进行校准之后,测量精度更高;最后,如果使用一台频谱分析仪和两个独立的信号源进行同样的测试,完成测试需要花几分钟的时间,但使用PNA-X只需0.6s。相位与驱动的关系是用PNA-X很容易完成的另一种常见的双信号源测试。这个测试参数表征的是当在相邻通道或带外存在大信号时,放大器处理小信号的能力。测试的方法是把不同频率的

一个大信号和一个小信号合在一起然后送至被测放大器(AUT),然后在改变大信号的功率时(使用功率扫描),测量小信号的S21相位。

另一种使用双信号源技术、在建立晶体管和放大器非线性行为模型时会用到的参数是“热态S参数”(准确地说是“放大器工作状态下的S参数-译者注”),这种测试方法用来表征在某一给定频率下,当存在一个比较大的偏离于S参数测试信号的另外一个输入信号,并且被测放大器的输出因为这个大信号的存在而产生压缩时,放大器小信号S参数的特性。在进行热态S参数测试时,一定要十分小心,不要让被测放大器输出的“热信号”超出了矢量网络分析仪测试接收机的损坏电平。

## 5 测量平衡元件

平衡电路既能降低对电磁干扰的敏感度和又能降低电磁干扰的产生。平衡元件可以是在3个射频端口的平衡-单端器件或有4个端口的平衡-平衡器件。用四端口VNA很容易对这些元件进行测试,可以测量差模响应和共模响应以及模式变换项。

这些测试可以用单端激励或真实模式激励来完成。单端法是每次只测试一个DUT端口(只需要一个射频源)并对差模响应和共模响应以及交叉模式特性进行数学计算。这是最快且精确的技术,条件是外加功率电平应使AUT保持在线性或适度压缩的工作区。

在高驱动电平条件下测试放大器的平衡性能时,如果仍然使用单端测量的方法,非线性特性会引测量结果的严重误差,这就需要真实(差分或平衡)模式激励。这种方法将两个幅度相同的信号以180°(差模信号)或0°(共模信号)的相位差加到放大器输入端对上。理论上这很容易使用双源VNA做到,但是精确测量还需要两个条件:对两个信号源的相位差做高分辨率的调整;以及能调整信号源的相位和幅度,以抵消由源输出阻抗与AUT输入阻抗相互作用所引起的输入失配。PNA-X能满足这两个要求。

## 6 测试混频器和变频器

第二个内部信号源也可用于测试频率转换器件如混频器或变频器,测试时除输入激励之外还需要LO信号。第二个信号源对扫描LO测试十分有用,在测试时LO信号连同射频输入信号一起被扫描,但保证RF信号和LO信号的频率差是固定的。这个方法常用于测量宽带变频器的前端元件。与使用外部信号发生器相比,使用从VNA内部信号源引出的信号作为LO信号在测试速度上有几位明显的改善(使用PNA-X的测试速度比传统方法的测试速度最高可快35倍)。

使用PNA-X进行混频器和变频器测量的设置非常简单。为了测试端口匹配和变频损耗或变频增益,DUT的输入端、输出端和LO端口分别与PNA-X的端口1、端口2和端口3相连。增加参考混频器能对混频器或变频器

的相位或群延迟进行测试。第二个信号源的两个输出可用于驱动参考混频器和 DUT 混频器,如图 6 所示。

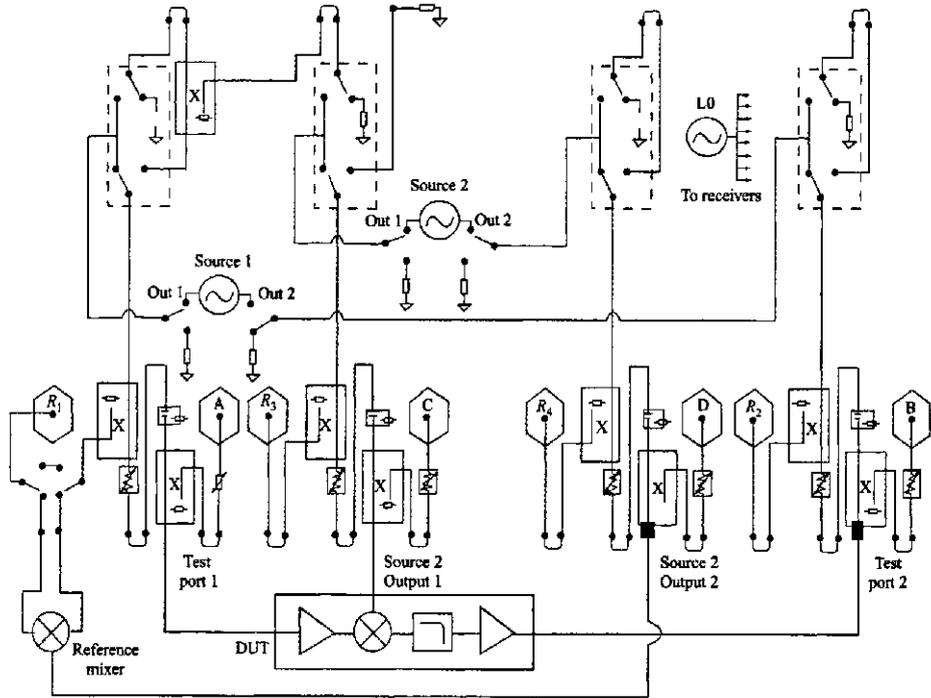


图 6 针对矢量混频器测量配置的四端口 PNA-X 框图

## 7 结 论

基于 VNA 的测试系统为测量无线通信和航空/国防系统中所使用的射频和微波元件提供了动力。与传统 VNA 相比,Agilent PNA-X 微波网络分析仪的先进体系结构具有更大的灵活性,使工程师可以通过一次链接便能测量各种各样的高性能尖端元件。PNA-X 内最主要的增

加项是第二个信号源和内部宽带信号合路器,从而简化了放大器、混频器和变频器的测量。除 S 参数、压缩和谐波的传统单信号源测量之外,两个信号源还可用于 IMD、相位随驱动的变化、热态 S 参数和真实激励模式的测试。PNA-X 端口上信号源的高功率输出、低谐波和宽功率扫描范围的属性完全适应当前器件的测试要求。

## 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>