



# 矢量网络分析仪 ZVB 在放大器测试中的应用

作者：白永杰，罗德与施瓦茨中国有限公司 产品支持部

放大器的测试指标可以分为两类：线性指标测试和非线性指标测试。线性指标的测试基于S参数的测量，采用常规矢量网络分析仪完成。对于非线性指标的测试，传统测试方案采用频谱仪加信号源方法，但这种方案有很多缺点：1) 无法实现同步扫频、扫功率测试。2) 不能进行相位测量，如幅度相位转化(AM/PM) 测量。

R&S ZVB采用创新的硬件结构，其输出功率很高、功率扫描范围宽，因而无需另外单独使用前置放大器，一次扫描即可确定放大器功率压缩特性。ZVB采用了强大的自动电平控制设计以及高选择性、高灵敏性的接收机，因而可在较宽的动态范围内进行放大器的谐波测试而无需使用外部滤波器。

此外R&S ZVB提供了丰富的测试功能和友好的操作界面，使得放大器的各种指标测试变得简单又直观。

## 端口匹配特性测量

端口匹配特性主要测试端口的  $S_{11}$  与  $S_{22}$  参数。如端口 1 的  $S_{11}$  参数等于反射信号  $b_1$  与入射信号  $a_1$  之比：

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad | \quad a_2 = 0$$

$S_{11}$  参数也可称为输入反射因子。 $S_{11}$  为复数，工程上通常用回波损耗(RL)和驻波比(VSWR)来表达端口的匹配程度。 $S_{11}$  与这两

个参数的关系如下：

回波损耗  $RL = -20\log(\rho)$ ，其中  $\rho = |S_{11}|$

$$\text{驻波比 } VSWR = \frac{1+\rho}{1-\rho}$$

以上两个参数与  $S_{11}$  的换算由 ZVB 自动完成，用户只需要在[Format] 菜单中选择[dB Mag]->回波损耗,[SWR]->驻波比，就可以显示相应的测试曲线。

ZVB 提供轨迹统计功能[Trace Statistics]，可自动显示轨迹的最大值、最小值和峰-峰值，并且可以通过设置 [Eval Range]，来调整统计频率范围。该功能对带限器件（如滤波器）的带内指标测试非常有用。

在电路设计的过程中，精确输入阻抗信息对于设计人员更为重要。比如：在手机板设计中，设计人员要精确测试前端放大器的输入、输出阻抗，然后根据输入、输出阻抗信息设计对应的匹配网络，达到手机的最大功率发射和最佳的整机灵敏度。输入阻抗与  $S_{11}$  的关系如下：

$$Z_m = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \cdot Z_0, \quad \text{其中 } Z_0 = 50 \Omega$$

用户通过选择[Format] 键中的[Smith]菜单显示阻抗测试轨迹，通过设置 Marker 可以方便的测得每一频点对应的输入电抗和电阻。另外 ZVB 标配的虚拟加嵌功能，能模拟在输入、输出端口加上虚拟的匹配网络之后整个网络的性能。该功能大大简化了设计人员的

工作量，无需实际的电路调整，就能预测调整后的DUT性能。用户通过选择[Mode]菜单中的[Virtual Transform]来激活该功能。

## 传输参数测量

除了端口匹配特性的测量，放大器前向放大和反向隔离特性也可分别由测试  $S_{21}$  和  $S_{12}$  得到。前向的传输参数  $S_{21}$  等于在端口2测得前向功率  $b_2$  与端口1的激励功率  $a_1$  的比值：

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad | \quad a_1 = 0$$

而放大器的增益等于  $S_{21}$  绝对幅度的对数值：

$$\text{增益 Gain} = 20 \log(|S_{21}|)$$

反向的传输参数  $S_{12}$  等于在端口1测得反向功率  $b_1$  与端口2的激励功率  $a_2$  的比值：

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad | \quad a_2 = 0$$

而放大器的反向隔离度等于  $S_{12}$  绝对幅度的对数值：

$$\text{隔离度 Isolation} = -20 \log(|S_{12}|)$$

用户只需分别设置  $S_{21}$  和  $S_{12}$  的显示格式为 dB ([format] -> [dB Mag])，放大器增益和隔离度即可同时显示在 ZVB 上。

## 功率压缩特性测量

功率压缩特性的测试主要用来衡量待测件 (DUT) 的线性度。对于放大器的测试，工程上通常采用输出功率 1 dB 压缩点 ( $P_{1dB}$ ) 来表征该特性。 $P_{1dB}$  的定义为：随着输入功率的增加，放大器的增益下降到比线性增益低 1 dB 时的输出功率值，如图 1 所示。

ZVB 不仅可以测量参数随频率变化的曲线还可以测量参数随输入功率变化的曲线。ZVB 内置信号源可以提供非常大的功率扫描范围，其典型

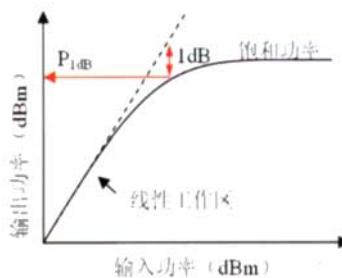


图 1.  $P_{1dB}$  定义

值为 60dB，而且 60dB 的功率扫描范围完全由电子衰减器来实现而非采用传统的机械步进衰减器。机械式衰减器的幅度可重复度较差且使用寿命较短，所以 ZVB 特别适合测试有源器件的功率压缩特性。

ZVB 提供多通道 (Channel) 的测试功能，不同的通道可以设置不同的扫描方式，所以可以在一个通道内设置频率扫描用于测试 S 参数，而在另一通道内设置成功率扫描用于测量功率压缩特性，这样调试人员就可以在调试放大器 S 参数的同时，观察放大器  $P_{1dB}$  的变化。用户可通过 [Chan select] 键，选择 [Add Channel + Trace +Diag Area] 菜单来增加一个测试通

道，然后选择 [Sweep] 键中的 [Sweep type] 菜单，选择 [Power] 就可以进行功率扫描测试。另外 ZVB 在轨迹统计功能 [Trace Statistics] 中提供了自动寻找增益压缩点的功能 [Compression Point]，方便用户快速读值。

$P_{1dB}$  的测量涉及到  $S_{21}$  随着绝对输入功率变化的曲线，而矢量网络分析仪通常用于 S 参数相对量的测量。为了提高其绝对测量精度，推荐使用的功率计对矢量网络做功率校准。R&S 公司的 NRP 系列功率计可以通过 USB 接口直接和 ZVB 连接，从而省掉功率计主机和昂贵的 GPIB 卡。ZVB 功率校准过程分成两个过程：矢量网络的内部源幅度校准和接收机幅度校准。在第一个过程中将功率探头直接和矢量网络的源端口连接，对应选择 [CAL] 键下的菜单 [Start Power Cal] -> [Source Power Cal]。第二步将已校准的源端口和接收端口连接进行接收机的校准，对应选择 [CAL] 键下的菜单 [Start Power Cal] -> [Receiver Power Cal]。

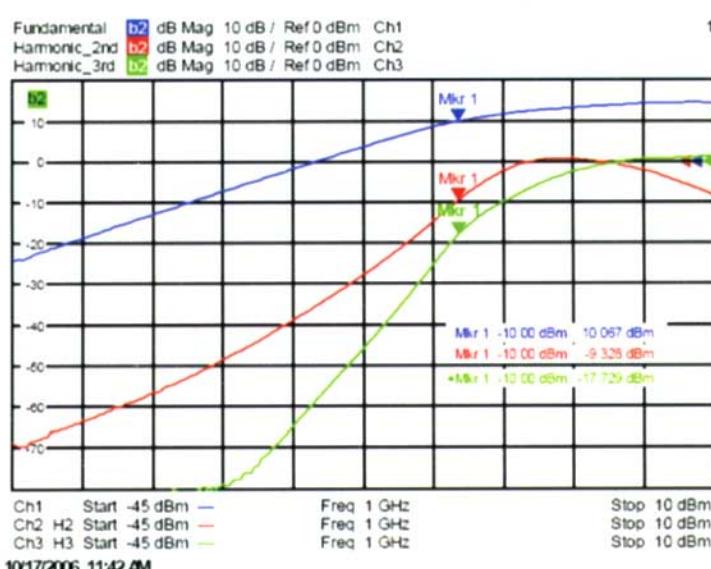


图 2. 放大器谐波输出功率随基波输入功率变化曲线

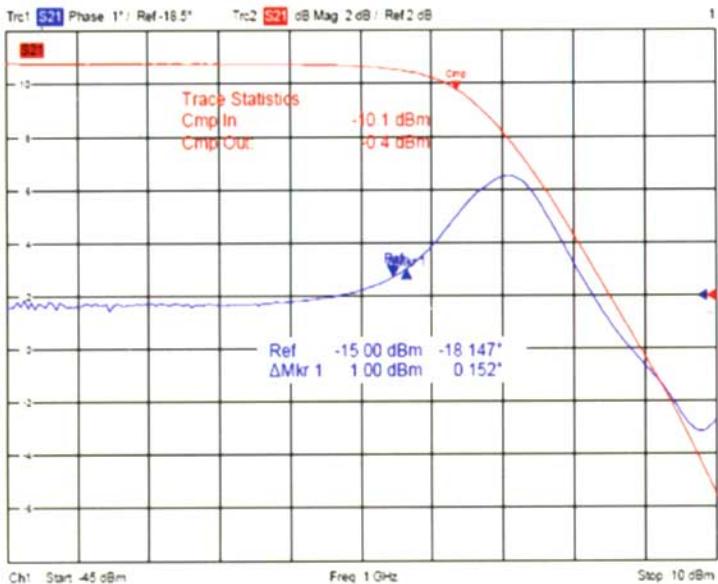


图3. 放大器AM/PM测试曲线

## 谐波测量

随着激励功率的增加,放大器将进入非线性工作区,不仅会出现输出功率压缩现象,还会出现非线性频率分量。这些新的频率输出分量多为输入频率的整数倍,称为谐波分量。设计人员往往比较关心的是输入基波分量与谐波分量的幅度差值,因为幅度差越大,意味着在同样的直流输入功率情况下,更多的功率转换为所需的基波功率,而非谐波功率,也可视为提高了放大器的效率。

传统的放大器的谐波测量是通过信号源加频谱仪的方式实现,即用信号源作为激励信号源,频谱仪观测基波和谐波的信号幅度。放大器的谐波测试往往需要测量不同输入基波功率对应的谐波输出功率,或者测试不同的频率点上同一输入基波功率对应的谐波输出功率。传统的方法须手动记录或者编写自动测试程序进行测试。

相对于这些繁琐的方法,ZVB提供了更为灵活的解决方法。ZVB打破了传统矢量网络信号源和接收机必须

工作在同一频率上的限制,可以使矢量网络信号源和接收机工作在不同的频率点上。具体对于谐波测量而言,可以让矢量网络源输出基波信号,而接收机工作在谐波频率上,并可方便实现对基波输入频率或输入功率的扫描测试(图2)。对应ZVB的设置:可先通过[Chan Select]+[Add channel]

+trace+Diag Area]的方法来添加一个新的观测窗口和新的测试通道。然后在[Mode]键下选择[Harmonics]进入谐波测试模式,而后通过选择2<sup>nd</sup>、3<sup>rd</sup>或者输入其它谐波次数来测量对应的谐波。

对于测试绝对谐波功率对输入基波功率的变化,同样推荐在测试前应该进行功率校准。ZVB也提供谐波功率校准的方法。通过[Harmonic Power Cal]进入功率校准对话框,其基本操作过程与测试放大器功率压缩特性时相同,只不过在进行源功率校准时的频率为整个测试频率,而在接收机校准时的频率为谐波频率而已。

## 幅度相位转化测量

放大器的非线性特性除了功率压缩和产生谐波频率两个方面外,还有相位非线性特征,即随着输入功率的改变,放大器插入相移的变化。工程上通常采用AM/PM转化来描述,其具体的定义为:输入功率每变化1dB,插入相移的改变量,单位为Degrees/dB(图3)。

同功率压缩特性的测量一样,应

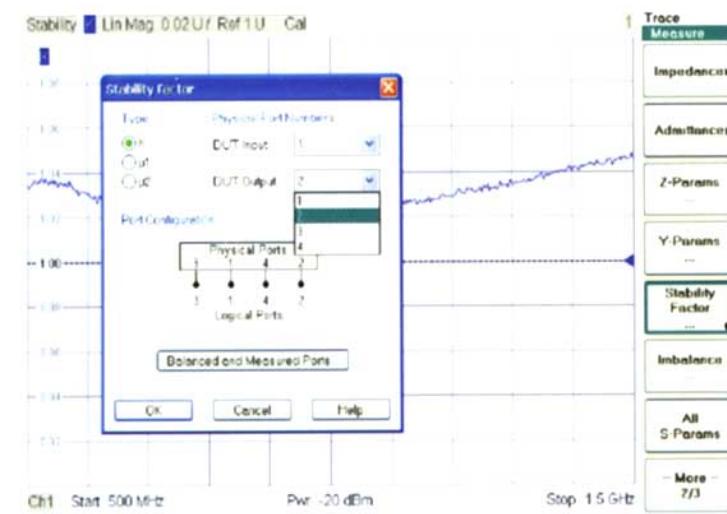


图4. 放大器稳定性测试

设置ZVB扫描类型[Sweep Type]为功率扫描[Power]，测试轨迹为S<sub>21</sub>，但显示格式[Format]应设置为相位方式[Phase]。在测试过程中，可使用ZVB提供Delta Marker与Reference功能方便地读值。

### 稳定性因子测量

理想状况下放大器的输入、输出端接阻抗应该为50Ω，但是在实际的电路环境下往往并非如此。而有些放大器在某些端接阻抗可能出现自激振荡，从而产生许多无用杂散输出信号。放大器的稳定性是指放大器对产生自激振荡的抑制能力。工程上一般把放大器的稳定性状况分为两种情况：绝对稳定和条件稳定。绝对稳定是指在任何端接阻抗条件下都不出现振荡，而条件稳定是指如果端接阻抗选择的合适将不出现振荡现象，但在某些端接阻抗上将出现自激振荡。

稳定性因子有多种定义的方法，ZVB支持三种稳定性因子测量。稳定性因子的测量基于S参数的测量，其S参数的关系如下：

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}|^2}{2 \cdot |S_{12} \cdot S_{21}|}$$

$$\mu_1 = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - S_{11} \cdot (S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21})| + |S_{12} \cdot S_{21}|}$$

$$\mu_2 = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - S_{22} \cdot (S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21})| + |S_{12} \cdot S_{21}|}$$

对于绝对稳定放大器必须满足：K>1和两个附加条件：1-|S<sub>11</sub>|<sup>2</sup>>|S<sub>12</sub>·S<sub>21</sub>|与1-|S<sub>22</sub>|<sup>2</sup>>|S<sub>12</sub>·S<sub>21</sub>|。而采用 $\mu_1$ 和 $\mu_2$ 来描述就不需要附加条件，满足 $\mu_1>1$ 或 $\mu_2>1$ 即可断定放大器为绝对稳定。

通过简单的设置，ZVB就可进行放大器稳定性测试（图4），对应选择[Format]键下的[Stability]菜单，在弹出的对话框里选择输入、输出端口和测试稳定性因子的类型即可。

### 结束语

综合所述，R&S ZVB提供的众多测试功能使其不仅适合放大器S参数

测量也适合放大器幅度、相位非线性特性测量和稳定度的测量，满足放大器从设计到生产诸多测试需求。**EDN**



**驱动LED！**

**RECOM**

**新款恒流  
大功率 LED- 驱动器！**

**性能：**

- 可以驱动10个2W功率LED
- 300mA到700mA恒流
- 宽输入电压（5V到36V）
- 脉宽调制（PWM）数字调光与远程开/关控制引脚
- 0~4VDC模拟调光与远程控制
- 效率高达97%
- 短路电流保护
- -40°C ~ -85°C工作温度
- 满足无铅/RoHS标准

**应用：**

- 大功率LED驱动器
- 恒流源
- 高可靠性照明设备
- 全面照明
- 工业级照明设备

RCD系列是一个用于驱动大功率LED的恒流源步进LED驱动器。该系列产品可以提供一个宽输入/输出电压范围、一个超微型封装、高效率（高达97%）和两种调光控制选择（脉宽调制（PWM）和模拟式），来满足各种各样的客户需求。

封装 A: RCD-24-XXX - 类型与引脚方式 (mm)



底视图

DC-DC 转换器 - AC-DC转换器 - 开关稳压器 - LED驱动器

**www.recomasia.com**

support@recomasia.com - 电话 +65 6276-8795 - 传真 +65 62731477

请与RECOM Asia分销商联系： EIL Co., Ltd

香港 电话 852-27416811	上海 电话 86-21-64282950
上海 电话 86-21-64686607	深圳 电话 86-755-61288615
深圳 电话 86-755-83002789	西安 电话 86-29-86570551
www.eilhk.com	

Micropower Tech Co., Ltd

香港 电话 852-27416811	上海 电话 86-21-64282950
上海 电话 86-21-64686607	深圳 电话 86-755-61288615
深圳 电话 86-755-83002789	西安 电话 86-29-86570551
www.micropower.cn	

## 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>

