

文章编号: 2095-4980(2015)02-0267-05

## 有源器件端口反射系数测量方法分析

张翠翠, 王 益, 王建忠

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 有源器件的端口反射系数是器件的主要参数, 端口反射系数的大小直接影响信号的输出功率。为实现有源器件在“射频开”状态下端口反射系数的测量, 开展了阻抗调谐器法和网络分析仪频率偏移法的源端口反射系数测量方法研究, 并针对信号源和放大器开展了相应的实验。测量结果表明, 10 dBm输出时2种方法测得反射系数模值的差别小于0.06, 相位变化差别优于 $10^\circ$ , 为有源器件端口反射系数的测量提供了可行的方法。

**关键词:** 有源器件; 反射系数测量; 阻抗调配器; 网络分析仪

**中图分类号:** TN98

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201502.0267

## Analysis on the reflection coefficient measurement of the active device

ZHANG Cuicui, WANG Yi, WANG Jianzhong

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** Reflection coefficient of the active device is the main parameter which directly affects the output power of the signal. The two methods—impedance tuner and Vector Network Analyzer(VNA) frequency shift, are analyzed in order to measure the reflection coefficient of active device on the state of "RF ON". Some measurement experiments on the signal generator and amplifier are performed. The results show that, the difference between the two methods is less than 0.06, and the phase difference is below  $10^\circ$ , under 10 dBm of the output. The work provides feasible ways to measure the reflection coefficient of active devices.

**Key words:** active device; reflection coefficient measurement; impedance tuner; network analyzer

目前, 对于无源器件来说, 端口反射系数测量技术比较成熟, 可以借助网络分析仪(VNA)来测量, 但是对于有源器件(信号发生器和放大器等)的端口反射系数普遍还是采用无源器件的方式来完成, 即在“射频关”的状态下进行测量, 而实际工作中有源器件均工作在有信号输出的状态, 这与“射频开”的状态时完全不同。本文将开展有源器件工作状态下的端口反射系数测量, 提供2种可行的方法: 阻抗调配器(tuner)法和网络分析仪频率偏移法。

阻抗调配器常用做负载牵引器件<sup>[1-5]</sup>, 通过不断地调节阻抗调配器的端口反射, 以使信号源、放大器等器件得到最大的输出, 国内外在该方面开展了较成熟的研究。上述负载牵引理论是基于端口的多次反射理论开展的, 该技术可用于有源器件的端口反射系数, 国外开展了这方面的研究<sup>[6-10]</sup>, 如 Gary Simpson 等人通过负载牵引的方法完成器件的端口反射系数测量, 从而得到端口的阻抗, 然而对于该方法的准确性和可行性尚无法验证。网络分析仪频率偏移法作为一种方便快捷的手段, 也可用于有源器件的端口反射系数测量, 目前, 国内外尚无这方面的研究。这2种方法相互验证, 可用于不同输出功率范围的有源器件端口反射系数测量。

### 1 阻抗调配器法的源端口反射系数测量

#### 1.1 阻抗调配器法的源端口反射系数测量原理

基于阻抗调配器的源端口反射系数测量的基本原理是源端口与阻抗调配器端口发生多次反射, 3次改变阻抗调配器的端口反射系数, 形成2组方程, 从而得到被测源端口的反射系数模值和相位。本文以信号源的输出端反射系数测量为例来分析, 信号源端口反射系数的测量框图如图1所示。

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-04-24

基金项目: 科工局技术基础基金资助项目

信号源输出与阻抗变化器连接，信号源输出端口和阻抗调配器端口产生多次反射，阻抗调配器后连接功率计，用于监视阻抗调配器端口的入射功率，衰减器一方面减小了功率计端口反射系数对阻抗调配器的输入端口反射系数产生的影响；另一方面把信号衰减到功率计的测量范围内。图1的 $S_1$ 面上，信号发生器和负载均为失配状态，则信号发生器输出的微波信号将在负载与信号发生器之间产生无穷次来回反射<sup>[11]</sup>，迭加后负载的入射波 $a$ 与信号发生器在负载匹配状态下的输出波 $b_{out}$ 见式(1)：

$$a = \frac{b_{out}}{1 - \Gamma_{out}\Gamma_L} \tag{1}$$

式中： $\Gamma_{out}, \Gamma_L$ 分别为信号发生器的输出反射系数和负载的反射系数； $a$ 为迭加后负载的输入信号。若取 $P_{out}$ 为负载匹配状态下信号发生器的输出功率， $P_{in}$ 为负载入射波迭加后的入射功率，由式(1)可得：

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{|1 - \Gamma_{out}\Gamma_L|^2} \tag{2}$$

令  $\Gamma_{out} = |\Gamma_{out}|e^{j\theta_{out}}, \Gamma_L = |\Gamma_L|e^{j\theta_L}$ ，则式(2)可写为：

$$P_{out} = P_{in} - 2P_{in}|\Gamma_{out}||\Gamma_L|\cos(\theta_{out} + \theta_L) + P_{in}|\Gamma_{out}|^2|\Gamma_L|^2 \tag{3}$$

取3次改变阻抗变化，代入式(3)可得：

$$P_{out} = P_{in,i} - 2P_{in,i}|\Gamma_{out}||\Gamma_{L,i}|\cos(\theta_{out} + \theta_{L,i}) + P_{in,i}|\Gamma_{out}|^2|\Gamma_{L,i}|^2 \tag{4}$$

式中， $\Gamma_{L,i}, \theta_{L,i}, P_{in,i} (i=1,2,3)$ 分别为第*i*次改变负载反射系数的模和相位及入射波叠加后的负载入射功率。由式(4)组成3个方程，仅有 $|\Gamma_{out}|$ 和 $\theta_{out}$ 2个未知数，通过求解式(4)组成的方程便可求得 $|\Gamma_{out}|$ 和 $\theta_{out}$ 。由此可见，完成3次负载反射系数 $|\Gamma_{Lk}|, \theta_{Lk}$ 的预置及相应的负载入射功率 $P_{in,i} (i=1,2,3)$ 的测量，便可求得被测器件的输出端反射系数。

上述计算过程基于matlab实现，由于求解方程是超越方程，采用解析算法，求解反射系数 $|\Gamma_{out}|$ 的最小网格为0.0001，相位 $\theta_{out}$ 的最小网格为0.001°，多次计算情况说明该计算精确度满足实际需要。

### 1.2 阻抗调配器法测量信号源端口反射系数

基于上述分析搭建实验测量系统如图2所示。测量系统中的待测信号源为SMB100A信号源，信号源的最大输出功率为20 dBm左右，频率上限为3.2 GHz，调谐器为MAURY公司1643P型号的调谐器。根据不同频率和不同位置下的阻抗调配器输入端反射系数 $\Gamma_L$ 和插入损耗 $A$ (衰减器和阻抗调配器在相应状态下的级联衰减量)，阻抗调配器的输入功率 $P$ 可由微波功率计检测得到。若微波功率计检测的功率为 $P'$ ，则得到阻抗调配器的输入功率 $P$ 与功率计检测的功率 $P'$ 之间的关系式(5)：

$$P = P' + A \tag{5}$$

实验中测量了信号源端口功率输出分别为10 dBm, 0 dBm时的端口反射系数和相位，如图3所示。从图中可以看出信号源在20 dBm和10 dBm时端口反射系数基本一致，比0 dBm和-20 dBm时反射系数略高，由于信号源输出-20 dBm时功率较小，功率测量结果不确定度较大，因此计算得到源端口反射系数有几个点存在上下波动。

### 1.3 阻抗调配器法测量放大器端口反射系数

放大器的端口反射系数测量时需要相应的信号源做驱动，整个测量过程与信号源测量过程一致。以TEGAM公司的型号为1727A的放大器作为被测对象，放大器增益为30 dB，输出功率为30 dBm, 20 dBm和10 dBm时的端口反射系数与相位的测量结果如图4所示，当放大器的输出功率较小时，其端口反射系数相较于大功率输出时更小，这是由于放大器输出功率较小时输出端的衰减器降低了端口反射系数。

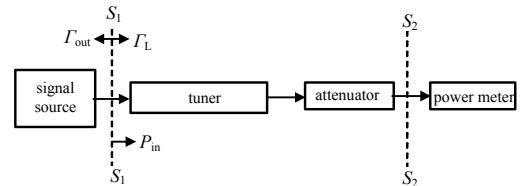


Fig.1 Block diagram of reflection coefficient measurement on active port  
图1 源端口反射系数测量框图

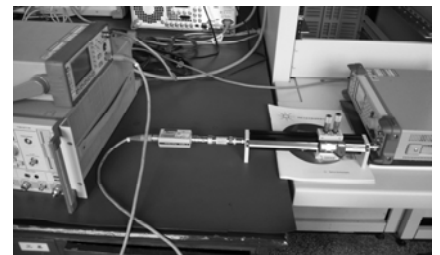


Fig.2 Physical map of reflection coefficient measurement on signal generator  
图2 信号源端口反射系数测量实物图

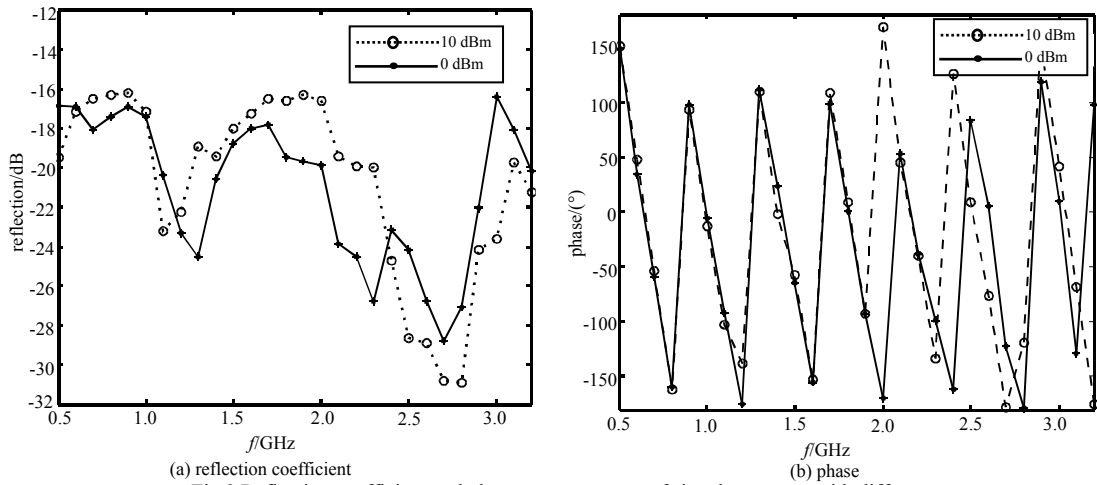


Fig.3 Reflection coefficient and phase measurements of signal generator with different outputs

图 3 信号源不同输出功率下端口反射系数模值和相位测量值

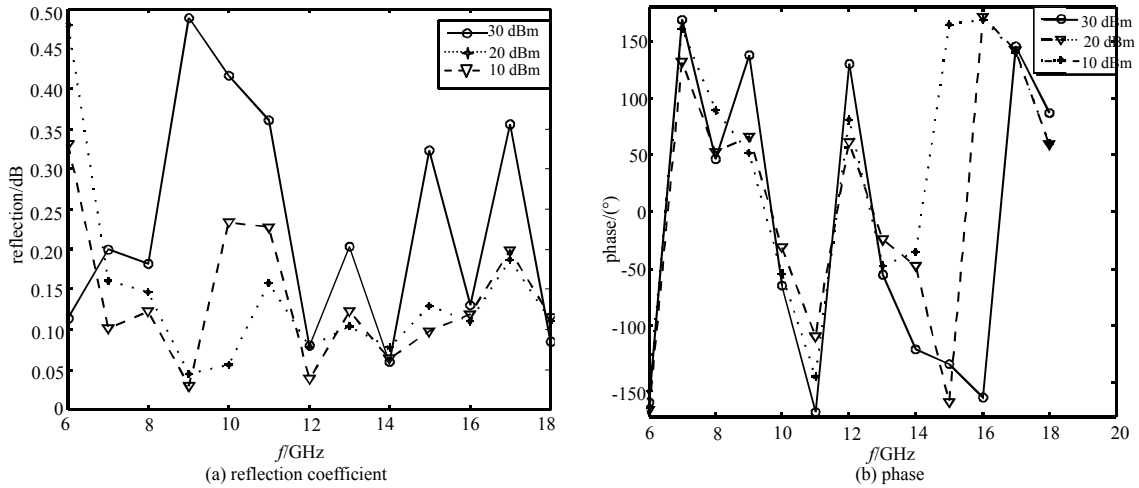


Fig.4 Reflection coefficient and phase measurements of amplifier with different outputs

图 4 放大器不同输出功率下端口反射系数模值和相位测量值

## 2 基于频率偏移法的源端口反射系数测量方法

### 2.1 测量原理

以信号发生器为被测对象,该方法基于信号发生器的反射系数在相邻频率点(如10 MHz)保持不变,且VNA具有良好的频率分辨能力和邻近信号抑制能力。工作原理如图5所示,待测信号源输出某一固定频点正弦信号 $f_1$ ,网络分析仪测量频率为 $f_2$ ,网络分析仪的测量频率点与信号源输出频率之间有一频率偏移 $f$ ,即 $f_2=f_1+f$ ,可以利用网络分析仪接收机的中频滤波特性对信号源的输出进行抑制。被测信号发生器对信号 $f_2$ 的反射信号,在频率点 $f_2$ 测得的端口反射系数即为信号源输出频率为 $f_1$ 时的热态端口反射系数。上述测量前提是信号端口反射系数在较小的频率范围内基本不变。

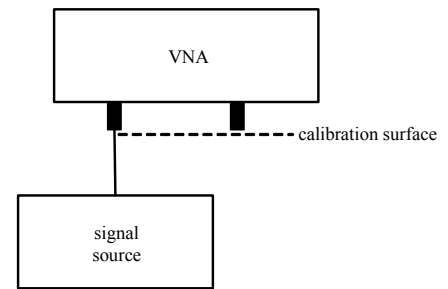


Fig.5 Block diagram of reflection coefficient measurement with VNA frequency shift

图 5 网络分析频率偏移法端口反射系数测量原理框图

### 2.2 网络分析频率偏移法源端口反射系数测量实验

实验时应合理选择信号源输出功率,信号源输出功率范围选择在-20dBm~10 dBm之间,当信号源输出功率较大时,若其与VNA连接容易造成VNA损坏。在测量过程中,VNA输出功率范围选在为-20 dBm~-10 dBm之间。

实验过程中R&S SMB100A信号源作为被测信号源,使用N5244A网络分析仪完成相关测量。实验中测量了信号源端口功率输出分别为10 dBm和0 dBm状态下信号源的端口反射系数,测量结果如图6所示。

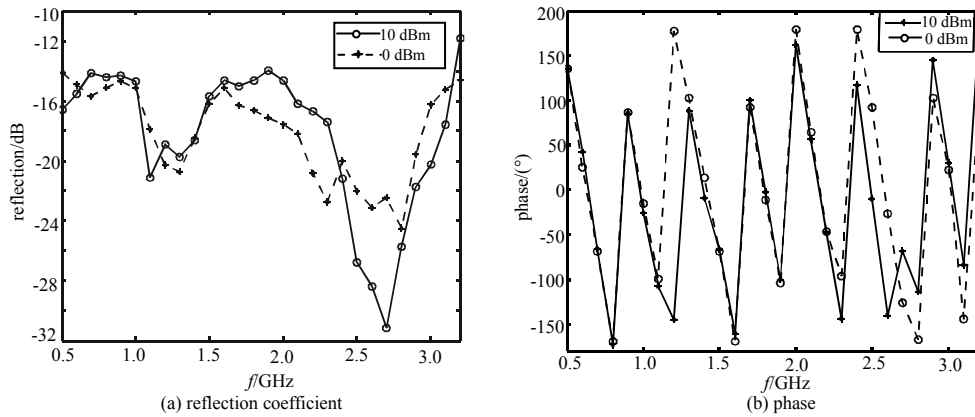


Fig.6 Reflection coefficient measurements of signal generator with different outputs(VNA frequency shift)

图6 信号源端口反射系数随输出功率变化图(VNA 频率偏移法)

### 3 2种测量方法比较

图7中给出了信号输出功率为10 dBm时2种方法测量结果比较。从测量结果可以看出2种测量方法得到的信号源端口反射系数的趋势一致，VNA法测得反射系数较调谐器法较小。VNA是选频器件，在测量端口反射系数时中频带宽设置较小，只针对相应的频率点进行反射系数的测量；基于阻抗调谐器法的源端口反射系数测量时，使用的功率计为非选频器件，其测得的功率为各频率点的功率总和，与选频器件相比，测得的功率偏高，测得反射系数偏大。由于信号源端口反射系数本来就较小，基本保持在-15 dB(0.18)以下，当信号源输出功率为10 dBm时，2种测量结果的差值小于0.05；当信号源输出功率为0 dBm时，2种测量结果的差值小于0.06。

这2种测量方法各有优缺点，阻抗调配器法适用于源输出功率较大时源端口反射系数的测量。当源输出功率较小时，由于还需要经过衰减器，功率计测得功率较小，误差较大，引起测得反射系数不确定度较大，当源输出功率小于0 dBm时，优选VNA频率偏移法进行测量，这种方法操作简单，较容易实现。

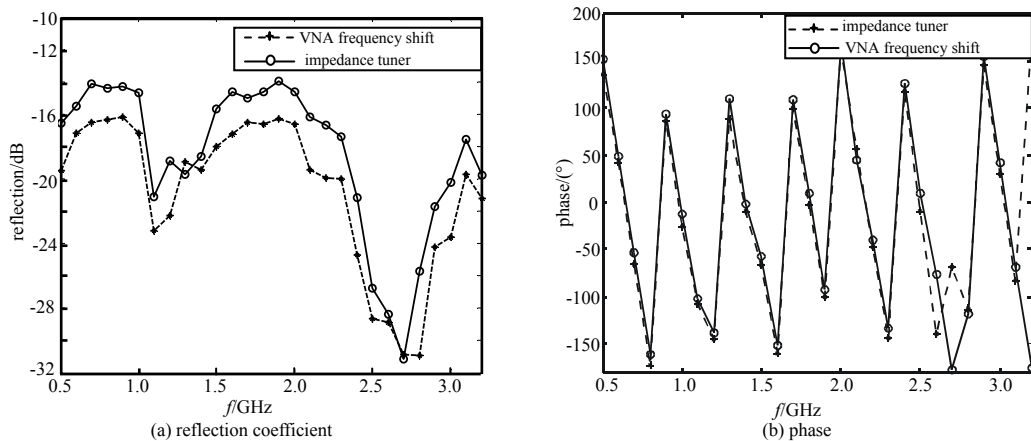


Fig.7 Comparison of the two methods with 10 dBm output of signal generator

图7 信号源传输10 dBm时2种测量方法比较图

### 4 结论

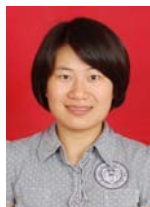
文中分析了2种有源器件的端口反射系数测量方法—阻抗调配器法和VNA频率偏移法，并应用2种方法完成了对信号源端口反射系数(模值和相位)的测量。2种方法均切实可行，VNA频率偏移法操作简单，适用于输出功率较小时端口反射系数的测量；阻抗调配器法通过3次改变信号源端口的负载反射系数构建方程，得到信号源端口的反射系数。本文为信号源、放大器等有源器件的端口反射系数测量提供一种可行的方法。

#### 参考文献:

- [1] 孙殿举,吴学杰,候磊,等. 负载牵引法在开关类功率放大器设计中的应用[J]. 现代电子技术, 2010(5):191-192. (SUN Dianju,WU Xuejie,HOU Lei,et al. Application of load-pull in switch-mode power amplifier design[J]. Modern Electronics

- Technique, 2010(5):191-192.)
- [2] 罗希,刘永强,蔡树军. 采用功率测量负载牵引的阻抗匹配方法[J]. 集成电路设计与开发, 2008(33):927-929. (LUO Xi,LIU Yongqiang,CAI Shujun. Impedance matching technique using power load pull[J]. Design and Development of IC, 2008(33):927-929.)
- [3] 唐宗熙,李恩. 一种测量微波功率放大器输出端反射系数的新方法[J]. 计量学报, 2001,22(2):147-151.(TANG Zongxi,LI En. A new method for measuring the microwave output reflection coefficient of power amplifier[J]. Acta Metrologica Sinica, 2001,22(2):147-151.)
- [4] Tsironis C,Bing Li,Dubouil D. A new method for test and design multistage power amplifiers using load pull data[C]// ARFTG conference digest-spring. Anaheim,CA,USA:IEEE, 1999:1-4.
- [5] Itoh Y. Microwave and millimeter-wave amplifier design via load-pull techniques[C]// GaAs IC Symposium, 2000:43-46.
- [6] Gary Simpson, Mike Majerus. Measurement of large signal device input impedance during load pull[C]// 50th ARFTG Conference. Portland,OR,USA:IEEE, 1997:101-106.
- [7] Teppati V,Ferrero A,Parena D,et al. Accuracy improvement of real-time load-pull measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007(2):610-613.
- [8] Majerus M. DUT input impedance measurement in an automated load-pull system[C]// ARFTG Conference Digest Spring. [S.l.]:IEEE, 2004:175-182.
- [9] Denis M D. Large signal characterization of dual-gate field effect transistors using load-pull measurement[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 1993,41(2):183-188.
- [10] 唐宗熙,李恩. 微波功率固态放大器负载牵引特性的自动测试[J]. 计量学报, 2004,25(4):362-365. (TANG Zongxi,LI En. Automatic measurement of load-pull property of power solid-state amplifier at microwave frequency[J]. Acta Metrologica Sinica, 2004,25(4):362-365.)
- [11] 汤世贤. 微波测量[M]. 北京:国防工业出版社, 1991. (TANG Shixian. Microwave Measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.)

#### 作者简介:



张翠翠(1984-),女,山东省枣庄市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为无线电及高功率微波测量.email:cuicui\_zhang@163.com.

王益(1986-),男,四川省绵阳市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为高功率微波测量.

王建忠(1974-),男,成都市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为无线电、高功率微波和光学测量技术.