

二端口网络分析仪测量多端口器件的方法

徐丽

(东南大学国家专用集成电路系统工程技术研究中心, 南京 210096)

摘要: 给出了一种用二端口矢量网络分析仪(VNA)对多端口器件进行测量的方法。该方法通过多端口器件的一端口测量得到端口负载, 运用 Gamma-R 参数法减小由于其余端口所接负载的非匹配性引入的误差, 并通过 Matlab 软件实现。利用该方法对三端口双工器进行测量, 并将最后结果与三端口 VNA 测得的结果进行比较, 比较结果表明幅度误差小于 0.5dB, 相位误差小于 5 度。该方法在多端口 VNA 不可获得的情况下, 可以应用到多端口器件的精确测量上。

关键词: 多端口器件, 二端口矢量网络分析仪, S 参数, Gamma-R 参数

A Multi-port Device Measurement Technique Using a Two-Port Network Analyzer

Xu Li

(National ASIC System Engineering Research Center, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: A method for multi-port device measurement using a two-port vector network analyzer (VNA) is presented. This method uses one-port measurement of multi-port device to get port terminations and Gamma-R parameters to reduce the error due to imperfect terminations of the remaining ports. It can be easily implemented in Matlab. A three-port duplexer was measured using this method and the results were compared to the data measured using a three-port VNA. The compared results show that the error of the amplitude is less than 0.5dB and the error of the phase is less than 5 degree. This method is precise on multi-port device measurement.

Key words: multi-port device, two-port VNA, S parameters, Gamma-R parameters

1 引言

随着集成电路技术的改进和对性能要求的提高, 多端口器件的使用日益普遍, 特别是具有较优噪声性能的差分多端口器件。尽管多端口矢量网络分析仪(VNA)及其校准方法在不断发展中^[1-2], 市场上也已经存在三、四端口 VNA, 但二端口 VNA 的使用仍然是最普遍的, 二端口 VNA 的校准方法也是最成熟的。因此研究二端口 VNA 对多端口器件的测量方法是有重要意义的。一般情况下, 用二端口 VNA 测量 N 端口器件, 需要进行 $N(N-1)/2$ 次二端口测量。如果器件的非工作端口接匹配负载, 那么器件的多端口 S 参数可以从测得的二端口数据中直接得到。

但是, 匹配负载很难实现, 特别是在宽频段内, 因此测得的数据中必然存在误差, 必须进行修正才能得到真正的多端口 S 参数。目前已经提出的修正方法主要有迭代法^[4]、重新归一化 S 参

数法^[5]、Gamma-R 参数法^[4]、端口数减少法^[6]以及其它各种方法等^[7-9]。它们从误差产生的本质原因出发, 在复杂度、对端口负载的要求和最后精度上各有优缺点。本文通过多端口器件的一端口测量得到端口负载, 此方法得到的端口负载是实际连接情况下的, 根据 Gamma-R 参数法应用得到的负载反射系数来消除负载失配引入的误差, 很大程度的提高了测量精度, 也减小了测量的工作量, 并且可以通过 MATLAB 实现。

2 多端口测量原理

用二端口 VNA 测量 N 端口器件时, 其余 $N-2$ 个端口需要接负载, 假设反射系数为 Γ_i 的负载与端口 i 相连。为了说明本方法, 以三端口器件的测量为例。三端口器件的未知 S 参数为 3×3 矩阵, 记为 S :

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

为了得到这个矩阵, 需要进行三次二端口测量, 分别记为: \mathbf{S}_a 、 \mathbf{S}_b 、 \mathbf{S}_c , 三个端口负载的反射系数分别记为: Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 。二端口 VNA 测得的 S 参数与三端口 S 参数的关系有:

$$^2S_{ij} = ^3S_{ij} + \frac{^3S_{ii}^3S_{jj}\Gamma_t}{1 - ^3S_{ii}\Gamma_t} \quad (2)$$

式中 i 、 j 是器件的测量端口号, t 是负载端口号, 等式左边是测得的二端口 S 参数。

如果三个端口接的是匹配负载, 即没有反射, 满足 $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 0$, 那么测得的三个二端口 S 参数可以通过式(5)直接合并得到三端口 S 参数的精确值:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{a11} | S_{b11} & S_{a12} & S_{b12} \\ S_{a21} & S_{a22} | S_{c11} & S_{c12} \\ S_{b21} & S_{c21} & S_{c22} | S_{b22} \end{pmatrix} \quad (5)$$

由于三个端口负载不可能做到完全匹配, 二端口 S 参数不可能完全等于三端口 S 参数, 对角线上元素也不可能完全相等, 因此必须消除因为负载的非理想匹配引入的误差。文献[4]中提出一种新的方法——Gamma-R 参数法用于消除误差。

Gamma-R 参数 $[R]$ 和 S 参数 $[S]$ 的相互转换关系为:

$$[R] = ([\Gamma] + [S])([I] - [\Gamma][S])^{-1} \quad (6)$$

$$[S] = ([I] + [R][\Gamma])^{-1}([R] - [\Gamma]) \quad (7)$$

式中: $[I]$ 是单位对角矩阵, $[\Gamma]$ 是以相应端口负载的反射系数为对角线元素的对角矩阵。先将二端口 S 参数转换为二端口 Gamma-R 参数,

此时对应的反射矩阵分别为: $[\Gamma_a] = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix}$ 、

$[\Gamma_b] = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_3 \end{bmatrix}$ 、 $[\Gamma_c] = \begin{bmatrix} \Gamma_2 & 0 \\ 0 & \Gamma_3 \end{bmatrix}$, 再将二端口

Gamma-R 参数组合成三端口 Gamma-R 参数, 此时已经消除了端口负载失配引入的误差, 组合方式类似于式(5), 得到(8):

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{a11} | R_{b11} & R_{a12} & R_{b12} \\ R_{a21} & R_{a22} | R_{c11} & R_{c12} \\ R_{b21} & R_{c21} & R_{c22} | R_{b22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

此时, 误差已经消除, 对角线上元素存在隐含对称性, 因此有:

$$\begin{cases} R_{11} : R_{a11} = R_{b11} \\ R_{22} : R_{a22} = R_{c11} \\ R_{33} : R_{c22} = R_{b22} \end{cases} \quad (9)$$

根据 Gamma-R 参数和 S 参数的转换关系, 得到:

$$\begin{cases} \frac{\Gamma_1^* + S_{a11} - \Gamma_1^*\Gamma_2 S_{a22} - \Gamma_2 S_{a11}}{1 - \Gamma_1 S_{a11} - \Gamma_2 S_{a22} + \Gamma_1 \Gamma_2 S_a} = \frac{\Gamma_1^* + S_{b11} - \Gamma_1^*\Gamma_3 S_{b22} - \Gamma_3 S_{b11}}{1 - \Gamma_1 S_{b11} - \Gamma_3 S_{b22} + \Gamma_1 \Gamma_3 S_b} \\ \frac{\Gamma_2^* + S_{a22} - \Gamma_1^*\Gamma_2 S_{a11} - \Gamma_1 S_{a22}}{1 - \Gamma_1 S_{a11} - \Gamma_2 S_{a22} + \Gamma_1 \Gamma_2 S_a} = \frac{\Gamma_2^* + S_{c11} - \Gamma_2^*\Gamma_3 S_{c22} - \Gamma_3 S_{c11}}{1 - \Gamma_2 S_{c11} - \Gamma_3 S_{c22} + \Gamma_2 \Gamma_3 S_c} \\ \frac{\Gamma_3^* + S_{c22} - \Gamma_2^*\Gamma_3 S_{c11} - \Gamma_2 S_{c22}}{1 - \Gamma_2 S_{c11} - \Gamma_3 S_{c22} + \Gamma_2 \Gamma_3 S_c} = \frac{\Gamma_3^* + S_{b22} - \Gamma_1^*\Gamma_3 S_{b11} - \Gamma_1 S_{b22}}{1 - \Gamma_1 S_{b11} - \Gamma_3 S_{b22} + \Gamma_1 \Gamma_3 S_b} \end{cases}$$

三个等式并不是线性无关的, 不能求得三个反射系数的解, 只可以建立其中两个反射系数用第三个反射系数表示的表达式:

$$\begin{cases} \Gamma_1 = \frac{\Gamma_2 (|S_c| - S_{c11} S_{b22}) + S_{b22} - S_{c22}}{|S_b| + \Gamma_2 (|S_c| S_{b11} - |S_b| S_{c11}) - S_{b11} S_{c22}} \\ \Gamma_3 = \frac{\Gamma_2 (|S_a| - S_{b11} S_{a22}) + S_{b11} - S_{a11}}{|S_b| + \Gamma_2 (|S_a| S_{b22} - |S_b| S_{a22}) - S_{a11} S_{b22}} \end{cases} \quad (10)$$

三个负载中只需要知道端口“2”所接的负载即可, 因此需要对端口“2”的负载测量, 最简单的方法就是设计测试夹具, 用网络分析仪对端口阻抗直接测量, 对测量结果进行夹具的去嵌入, 得到负载特性, 但是这样测量得到的负载与连接在器件端口的负载有所偏差, 直接测量只得到了负载的特性, 而当负载与器件端口相连时, 两者之间会相互影响, 会有寄生效应存在。因此最有效的方法是利用三端口器件的一端口测量来得到端口“2”的负载, 此时得到的负载与实际连接情况完全一致, 测量过程考虑了寄生效应的影响, 连接在端口的负载是端口阻抗元件和一小段连接线共同作用的效果。

将测得的一端口 S 参数 S_{d11} 转换为 R_{d11} , 有:

$$R_{d11} = \frac{\Gamma_1^* + S_{d11}}{1 - \Gamma_1 S_{d11}} \quad (11)$$

R_{d11} 也可以作为组合后的三端口网络的 R_{II} , 因此又出现了另一个隐含的等式: $R_{a11} = R_{d11}$, 有:

$$\frac{\Gamma_1^* + S_{d11}}{1 - \Gamma_1 S_{d11}} = \frac{\Gamma_1^* + S_{a11} - \Gamma_1^*\Gamma_2 S_{a22} - \Gamma_2 S_{a11}}{1 - \Gamma_1 S_{a11} - \Gamma_2 S_{a22} + \Gamma_1 \Gamma_2 |S_a|} \quad (12)$$

得到端口“2”所接负载的反射系数：

$$\Gamma_2 = \frac{S_{a11} - S_{d11}}{|S_a| - S_{d11}S_{a22}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)，就可以得到端口“1”和“3”的负载，将得到的端口负载代入 Gamma-R 参数和 S 参数的转换关系，就可以得到精确的三端口 S 参数。

根据上述分析的要求，制作了三端口双工器的测试夹具。一般 VNA 的接口为 SMA 头，而双工器为贴片器件，需要通过微带线进行转换连接，为使夹具引入的影响尽可能的小，微带传输线应尽可能的短。测试夹具的制作要求微带线的本征阻抗为 50Ω ，选用 FR4 板材，介电常数为 4.8，测试夹具如图 1 所示。测试所用的双工器是 EPCOS 公司的 B7663，发射端的工作频段为 $824\sim849\text{MHz}$ ，接收端的工作频段为 $869\sim894\text{MHz}$ 。

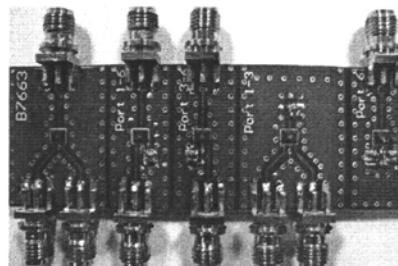


图 1 双工器的测试夹具

3 应用与测量结果

网络分析仪采用 Agilent 的 ENA5070B，同轴校准件采用 Agilent 的 85033E 3.5mm 机械校准件，采用二端口 SOLT 校准方式去除网络分析仪和连接电缆的系统误差，由测量系统与待测器件之间的微带线引入的误差通过端口延伸法消除。因为微带线的本征阻抗为 50Ω 且长度很短，损耗可以忽略，因此端口延伸能精确的消除微带线带来的相位误差，满足精度要求。

3 次二端口测量和 1 次得到的 S 参数存为 SP 文件，误差修正过程在 Matlab 中实现，最后得到的三端口 S 参数也存在 SP 文件，在 Matlab 中读写 SP 文件的方式为：

```
% read s2p file
S_temp_RI=read(rfdata.data,'S_measure.s2p');
temp=extract(S_temp_RI,'S_parameters');
```

```
point=length(temp);
% write s3p file
S=zeros(2,2,point);
for m=1:1:point
    %.....calculate temp_S
    S(:,:,m)=temp_S;
end
set(S_temp_RI,'S_Parameters',S);
write(S_temp_RI,'S_calculate.s3p');
```

将通过本方法得到的三端口 S 参数与三端口 VNA 测得的数据进行比较分析，选取 3 个 S 参数 S_{13} （天线与发射端之间的传输响应）、 S_{23} （天线与接收端之间的传输响应）、 S_{33} （天线端回波损耗）给出比较结果，如图 2、3、4 所示。

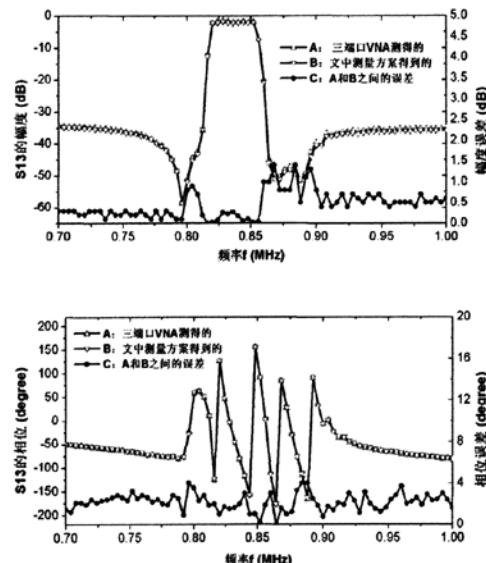
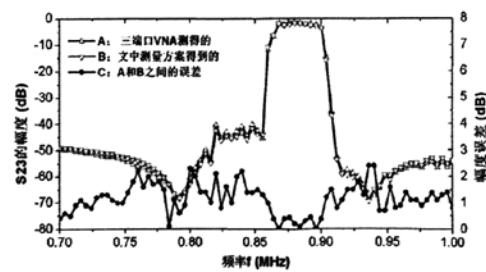


图 2 比较结果：(a) S_{13} 的幅度 (dB)
(b) S_{13} 的相位 (degree)



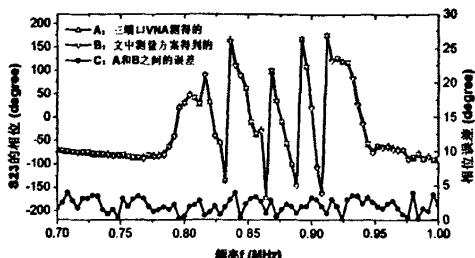


图 3 比较结果: (a) S_{22} 的幅度 (dB)
(b) S_{22} 的相位 (degree)

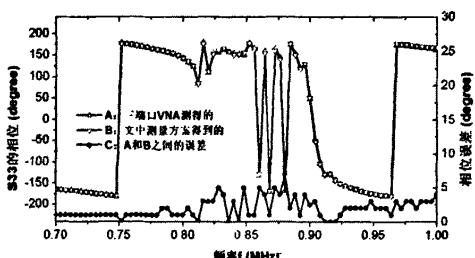
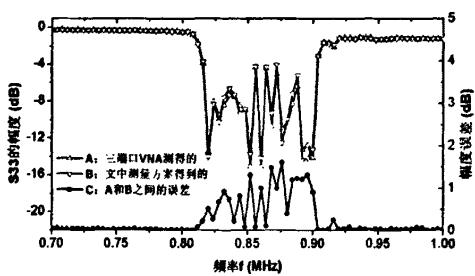


图 5 比较结果: (a) S_{33} 的幅度 (dB)
(b) S_{33} 的相位 (degree)

从比较结果中发现, 测试结果和计算结果有很好的一致性, 因此双工器的参数特性完全可以通过二端口 VNA 的测量和本文提出的方法得到。同时从图 2、3、4 中发现, 误差受到器件的频响波动影响, 频响波动较小且幅值较高时, 测试的精度越高, 频响波动较大且幅值较小时, 误差波动也较大。这主要与网络分析仪扫描时抖动有关, 在扫描幅度较小的信号时, 网络分析仪本身的仪器噪底对测试结果也有影响, 虽然降低网络分析仪的中频带宽可以降低其噪底, 但是无可避免的增大扫描时间。而双工器主要关注的指标在于通道内的插入损耗, 从测试结果中看出, 在接收和发射通带内幅度误差 <0.5 dB, 相位误差 $<5^\circ$, 在主要应用频率范围内精度都可以满足要求。

4 结论

提供了一种简单有效的用二端口矢量网络分析仪对多端口器件进行测量的方法。它有效修正了由于非匹配负载引入的误差, 应用灵活, 且可以通过 MATLAB 实现。以三端口器件为例, 配合网络分析仪的校准, 通过 3 次二端口测量和 1 次一端口测量, 可以得到精确的三端口 S 参数。本方法可以用二端口 VNA 测得多端口器件的精确特性, 为多端口器件的广泛使用解决了后顾之忧。

参考文献:

- [1] A Ferrero, U Pisani, K J Kerwin. A New Implementation of a Multiport Automatic Network Analyzer[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(11): 2078-2085
- [2] T Meyer, A Jostingmeier, N Spiliotis, et al. Multiport Scattering Parameter Measuring System[C]. In: 62nd ARFTG Microwave Measurements Conference, 2003. 269-273
- [3] J Martens, D Judge, and J Bigelow. Multiport Vector Network Analyzer Measurements[J]. IEEE Microwave Magazine, 2005, 6(4): 72-81
- [4] J C Rautio. Techniques for Correcting Scattering Parameter Data of an Imperfectly Terminated Multiport When Measured with a Two-Port Network Analyzer[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1983, 31(5): 407-412
- [5] J C Tipper. A Rigorous Technique for Measuring the Scattering Matrix of a Multiport Device with a 2-Port Network Analyzer[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1982, 30(5): 661-666
- [6] Hsin-Chia Lu, Tah-Hsiung Chu. Multiport Scattering Matrix Measurement Using a Reduced-Port Network Analyzer[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51: 1525-1533
- [7] Ilona Rolfes, Burkhard Schiek. Multiport Method for the Measurement of Scattering Parameters of N-ports [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2005, 53(6): 1990-1996
- [8] C J Chen, T H Chu. Virtual Auxiliary Termination for Multiport Scattering matrix Measurement Using Two-Port

- Network Analyzer [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2007, 55(8): 1801-1810
- [9] Donggun Kam, Joungho Kim. Multiport Measurement Method Using a Two-Port Network Analyzer With Remaining Ports Unterminated [J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2007, 17(9): 694-696
- [10] Weber Robert J. 微波电路引论——射频与应用设计 [M]. 北京, 电子工业出版社, 2005: 70-88

作者简介:

徐丽: 女, 1984 年 12 月出生, 2006 年毕业于东南大学电子工程系, 目前正在东南大学电子科学与工程学院 ASIC 中心攻读硕士学位, 研究方向为射频测试。

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>

