

# 构建虚拟网络的网络分析仪夹具校准新方法<sup>\*</sup>

刘 超 张尚剑 谢 亮 祝宁华<sup>†</sup>

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室,北京 100083)

(2004 年 9 月 16 日收到,2004 年 11 月 16 日收到修改稿)

一般矢量网络分析仪(VNA)的双端口测试夹具校准,至少需要三个已知标准才能实现.本文基于 Triple-Through 理论构建两个虚拟的对称网络,提出了一种只需要采用一个标准的网络分析仪双端口测试夹具校准新方法.采用这种方法校准测试夹具后,扣除夹具影响的实验结果与没有测试夹具转接直接测试数据十分吻合,证明该方法精度高,而且简单易行.

关键词:校准,测试夹具,网络分析仪,散射参数测量

PACC:0620D,0600,0620H,0690

## 1. 引 言

矢量网络分析仪是一种常用的测量待测网络散射参数( $S$  参数)的分析仪器.微波信号在待测网络中的传输过程类似于光在透镜中的传输过程,一部分输入信号在输入端口被反射;另一部分信号被待测网络吸收或放大;其余的信号通过该网络传输出去.散射参数由相对于输入信号的幅度比值与相位差表示,其可以全面直观地表示待测网络的反射和传输特性.对于双端口网络,散射参数中的  $S_{11}$  和  $S_{22}$  定义为输入端和输出端的反射系数, $S_{12}$  和  $S_{21}$  定义为正向和反向传输系数.测试过程中,网络分析仪将待测网络看成是双端口的“黑盒子”,通过频率扫描或功率扫描,获得待测网络的传输/反射特性与工作频率及功率的关系,从中我们可以全面分析出待测网络的增益、损耗、群时延和电长度等特性.

在使用网络分析仪之前,要将其校准到测试端口,消除包括同轴电缆在内的系统误差.网络分析仪是通过 3.5mm 或 2.4mm 同轴电缆与待测网络的连接的,因此,只能直接测量具有同轴接口的待测网络.但一般待测网络的测试端口并非都是同轴形式,比如微波集成电路的输入、输出端口常为微带线或共面传输线,因此测量时需要借助测试夹具进行测试端口的转换.在这种情况下,待测网络的测试结果

中也会包含测试夹具的影响.因此,为保证测量精度,在测试前也需要对测试夹具进行校准.

网络分析仪双端口夹具校准通常需要包括至少一个传输标准在内的三个标准才能实现.可选用的标准有直通(Thru)、延迟线(Line)、开路(Open)、短路(Short)和匹配(Match).已有的根据所选用的标准来命名的双端口测试夹具校准方法有 SOLT(Short-Open-Load-Thru)<sup>[1]</sup>方法,TRL(Thru-Reflect-Line)<sup>[2]</sup>方法,TSM(Thru-Short-Match)<sup>[3]</sup>方法,TOM(Thru-Open-Match)<sup>[3]</sup>方法,TSD(Thru-Short-Delay)<sup>[4]</sup>方法.在这些测试夹具校准方法中只有 TSM 和 TOM 方法不存在频率限制和相位不确定性问题,并且它们的校准精度接近于基于 12 项误差模型的 SOLT 方法,被证明是简单、准确的宽带校准方法<sup>[5]</sup>.可是这两种校准方法的精确性仍取决于选用标准的精度<sup>[3,6]</sup>,因此,若能减少夹具校准过程中的选用的标准数目,就能够提高校准的精度.本文基于 Triple-Through 理论<sup>[7]</sup>提出了一种只采用一个标准的网络分析仪双端口测试夹具校准新方法.通过借助辅助夹具构造虚拟对称夹具,将双端口测试夹具校准问题简化为单端口测试夹具校准问题.然后采用 TM(Thru-Match)单端口夹具校准方法,在只需要一个标准的情况下实现了网络分析仪双端口测试夹具的校准.本文第 2 部分基于微波网络理论,介绍了新方法的原理,第 3 部分给出采用新方法取得的实验结果,并

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 2001AA312030)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人,E-mail:nhzhu@red.semi.ac.cn

与 TSM 方法的结果进行了比较。

## 2. 原理

双端口测试夹具的校准过程就是将已知的标准作为待测网络,通过求解它们与测试夹具组成的级联网络的校准方程,得到测试夹具散射参数的过程。如果将两个双端口测试夹具分别设为夹具 A 和夹具 B,一般情况下,它们均为互易网络,其散射参数满足<sup>[8]</sup>

$$S_{A12} = S_{A21}, S_{B12} = S_{B21}. \quad (1)$$

Silvonen 指出<sup>[9]</sup>,校准两个互易测试夹具 A 和 B,需要求出 7 个未知量:

$$S_{A11}, S_{A22}, \Delta_A, k, S_{B11}, S_{B22} \text{ 和 } k\Delta_B, \quad (2)$$

其中

$$\Delta_F = S_{F11} S_{F22} - S_{F12} S_{F21}, F = A, B, \quad (3)$$

$$k = S_{A21} / S_{B12}. \quad (4)$$

如果夹具 A 与夹具 B 为可互换的对称网络,除了满足(1)式描述的互易网络关系外,它们的散射参数还符合:

$$\begin{bmatrix} S_{A11} & S_{A12} \\ S_{A21} & S_{A22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{B22} & S_{B21} \\ S_{B12} & S_{B11} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

可以看出,此时校准参量  $k$  值等于 1,因此,两个对称夹具的双端口校准可以简化为单端口夹具校准。

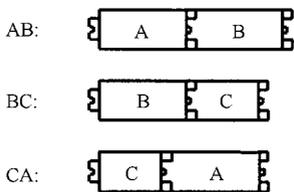


图1 Triple-Through 理论示意图

在实际测试中,两个绝对理想对称的夹具是很难找到的。我们参照 Meys 提出的 Triple-Through 理论<sup>[7]</sup>,借助于辅助夹具 C 构造了两个虚拟的对称网络 AA 和 BB,其连接方式如图 1 所示。图中符号 AB, AC 和 CB 分别代表夹具 A 和夹具 B,夹具 A 和夹具 C,夹具 C 和夹具 B 之间的直通连接。虚拟的对称夹具 AA 和 BB 的传输参数可由 AB, CB 和 AC 三个直通连接的微波网络的传输参数表示<sup>[7]</sup>:

$$T_{AA} = T_{AB} I' T_{BC} I' T_{CA}, \quad (6a)$$

$$T_{BB} = T_{BC} I' T_{CA} I' T_{AB}, \quad (6b)$$

其中  $T_{AA}, T_{BB}, T_{AB}, T_{BC}$  和  $T_{CA}$  分别表示级联网络

AA, BB, AB, BC 和 CA 的传输参数,  $I'$  定义为  $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。微波网络的传输参数与其散射参数存在如下关系<sup>[10]</sup>:

$$T_X = \frac{1}{S_{X21}} \begin{bmatrix} 1 & -S_{X22} \\ S_{X11} & -\Delta_X \end{bmatrix}$$

$$X = AA, BB, AB, BC \text{ 或 } CA. \quad (7)$$

如果将图 1 所示的三个级联网络的散射参数代入表达式(7)式转换为传输参数的表达式,然后再一起代入到(6)式中,就可得到对称网络 AA 和 BB 的传输参数。

另外对称微波网络 AA, BB 也可以分别看成是两个夹具 A 和两个夹具 B 之间的直通连接。它们的传输函数还可以写成<sup>[7]</sup>

$$T_{AA} = T_A I' T_A I', \quad (8a)$$

$$T_{BB} = T_B I' T_B I'. \quad (8b)$$

由(7)(8)式可以得出微波网络 AA 和 A 的散射参数的关系:

$$S_{A22} = \frac{S_{AA11} - S_{A11}}{S_{AA12}}, \quad (9a)$$

$$S_{A12} S_{A21} = S_{AA12} (1 - S_{A22}^2). \quad (9b)$$

从(9)式可以看出,如果能够求出  $S_{A11}$ , 则  $S_{A22}, S_{A21}, S_{A12}$  可知。由于  $S_{A12} = S_{A21} = \pm \sqrt{S_{A21} S_{A12}}$ , 通过判断相位的方法<sup>[11]</sup> 就可以求出散射参数  $S_{A21}$  (或  $S_{A12}$ ), 这样夹具 A 的所有散射参数就全部得到了。同样,在已知  $S_{B11}$  的前提下,夹具 B 的散射参数也可通过虚拟的对称网络 BB 的散射参数得到。

校准参量  $S_{A11}, S_{B11}$  只有通过求解夹具 A, B 与标准连接的级联网络的校准方程才能得到。采用两个标准的单端口夹具校准方法有 TM (Thru-Match) 方法、TS (Thru-Short) 方法和 TO (Thru-Open) 方法,其中只有 TM 方法不仅方程形式最简单,而且不存在频率奇点和相位不确定性<sup>[11]</sup>, 所以我们选择 TM 方法来求解校准参量  $S_{A11}$  和  $S_{B11}$ 。为了进一步减少校准过程中选用的标准的数目,我们选用图 1 所示的 Triple-Through 理论中 AB 级联网络的散射参数测量数据作为的零电长度的直通测试结果。因此在我们的整个测量过程中,只使用了一个匹配标准就可求出(2)式列举所有参量,实现了网络分析仪的两个互易测试夹具校准。

## 3. 实验结果

为了验证我们提出的校准方法的正确性,选用

HP8720D 型网络分析仪及与其配套的 HP85052D 型 3.5mm 同轴校准标准为进行了校准和测试实验. 网络分析仪的输入和输出端口的极性分别为“ male ”和“ female ”, 夹具校准前首先用精度最高的 SOLT 双端口校准方法对网络分析仪进行校准. 校准参考面设置为直通标准的传输函数等于 1 处. 网络分析仪的校准和测试状态的设置是: 频率扫描范围为 50 MHz 至 20.05 GHz, 输出功率为 5 dBm, 扫描点数为 401 点, 扫描时间为 500 ms. 为了减少多次重复连接产生的随机误差的对测试结果影响, 实验中基于 Triple-Through 理论的构造对称网络的测试结构设计如图 2 所示. 夹具 C 由 C1, C2 和 C3 三个部分组成, 其中 C1, C3 为可互换的标准夹具, 它们用来转换夹具 C 的极性. 我们选用两个 6 dB 的衰减器分别作为夹具 A 和 B, 一个 3 dB 的衰减器和两个 HP85052D 标准的精密空气线组成夹具 C, 一段无源容性微带电路作为待测网络. 为了方便直接测试, 夹具 A, B, C 和待测网络的输入、输出端口都为同轴形式.

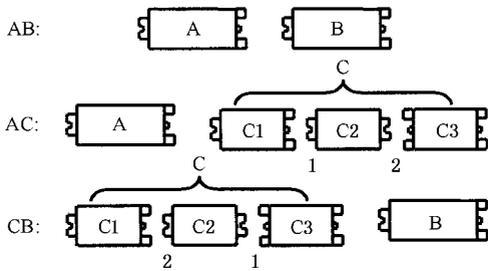


图 2 实验中用于构造对称夹具的测试结构示意图

为了比较本文提出的构建虚拟对称网络的夹具校准方法与 TSM 方法的精确度, 将两种方法得到的校准参量  $k$  与直接测试数据进行比较. 从图 3 可以明显看出散射参数的幅度和相位均比 TSM 方法精确. 这是由于我们在校准过程中只选了一个标准, 从而减少了校准标准对测量结果影响的缘故. 图 4 所示为采用本文提出的夹具校准方法扣除夹具影响得到的待测网络散射参数和没有测试夹具直接测量结果的比较, 可明显看出二者几乎完全吻合, 证实了本文提出的这种构建虚拟对称网络的网络分析仪校准方法是一种简单高精度新方法.

### 4. 结 论

本文提出了一种新的网络分析仪夹具校准方法. 首先, 通过 Triple-Through 理论构造出两个虚拟的对称网络 AA, BB, 将双端口夹具校准问题转化为单端口夹具校准问题. 然后借助匹配标准分别测量得到夹具 A 和 B 反射系数, 这样就可求出双端口夹具校准所需的所有未知量. 本文采用的夹具校准方法与传统的双端口互易测试夹具校准方法最大的区别是, 只采用一个标准而非三个标准就实现了双端口测试夹具的校准. 实验证明校准后的测试数据与直接测量结果符合良好, 比 TSM 方法更精确. 该方法简单易行、精度高, 可广泛用于微波网络分析仪的双端口测试夹具校准.

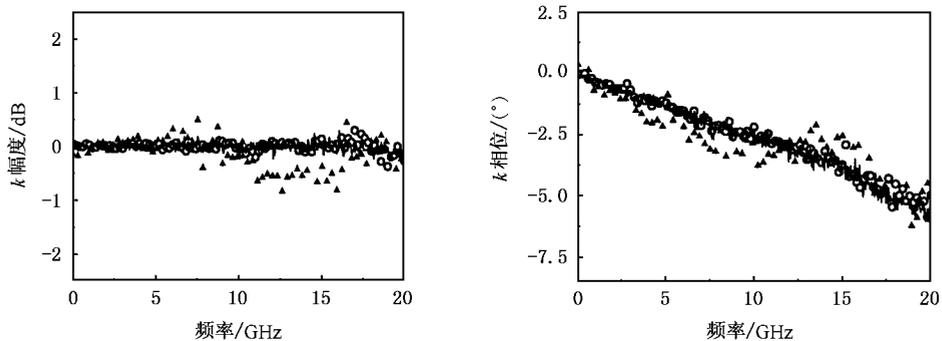


图 3 图中实线表示夹具 A, B 的校准参量  $k$  的直接测量数据, 空心圆和实心三角形分别为本文的校准方法和 TSM 校准方法的结果

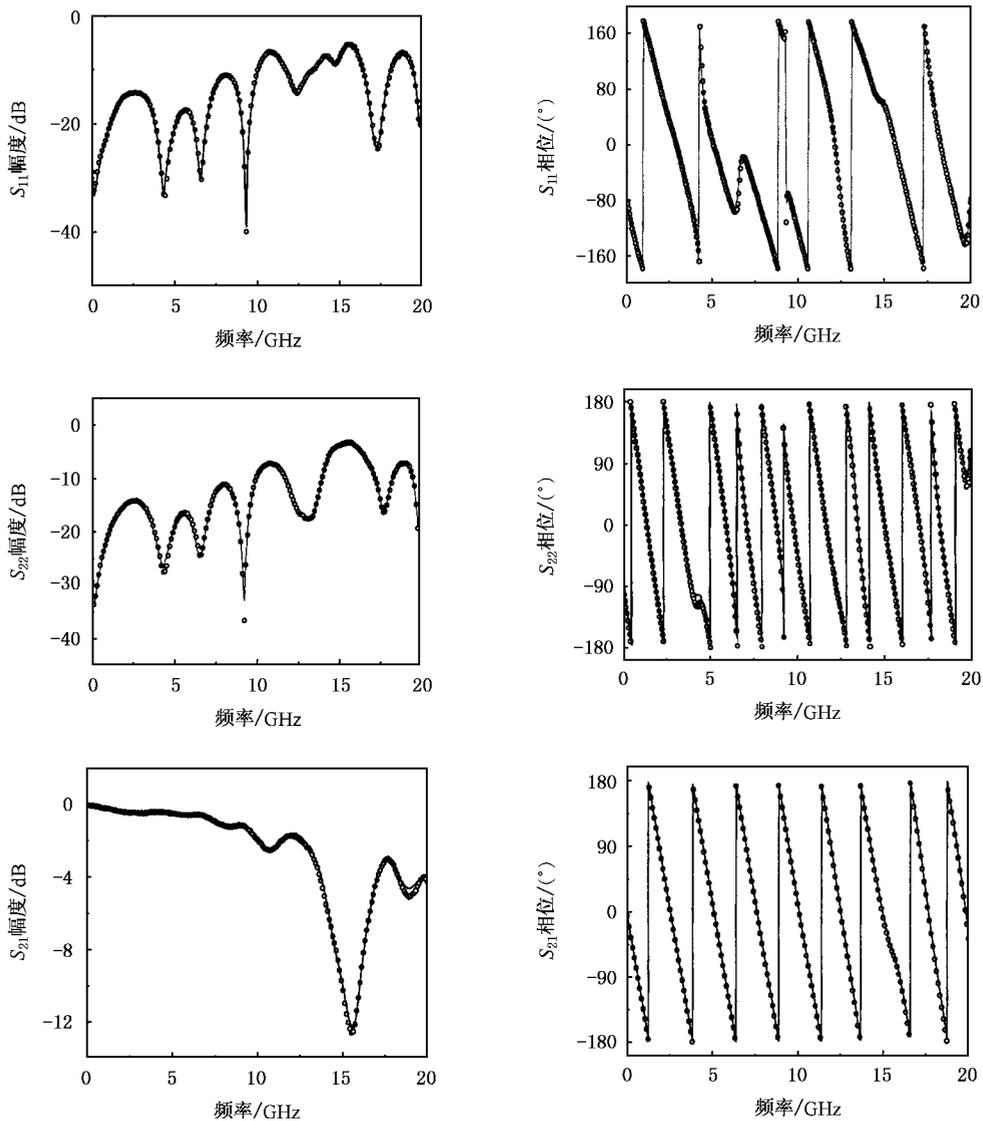


图4 图中实线表示待测网络的直接测量数据,空心圆表示本文的校准方法的实验结果

- [ 1 ] Jargon J A , Marks R B and Rytting D K 1999 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **47** 2008
- [ 2 ] Engen G F and Hoer C A 1979 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **27** 987
- [ 3 ] Zhu N H , Chen Z Y and Wang Y L 2002 *Microwave and Optical Technology Letters* **34** 26
- [ 4 ] Franzen N R and Speciale R A 1975 in *Proc. 5th European Microwave Conf.* ( England : Exhibitions and Publishers ) p67
- [ 5 ] Zhu N H 1999 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **47** 1917
- [ 6 ] Zhu N H and Auracher Franz 1999 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **47** 1949
- [ 7 ] Rene P Meys 1988 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **36** 1043
- [ 8 ] Zhao C H and Yang S Y 2000 *Foundation of Contemporary Microwave Techniques* ( Harbin : Harbin Engineering University Press )( in Chinese )[ 赵春晖,杨莘元 2000 现代微波技术基础 ( 哈尔滨 哈尔滨工程大学出版社 ) 97 ]
- [ 9 ] Silvonen K J 1991 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **39** 624
- [ 10 ] Zhu N H , Qian C , Wang Y L , Pun Y B and Chung Po-Shuen 2003 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **51** 2000
- [ 11 ] Reinhold Ludwig and Pavel Bretchko 2002 *RF Circuit Design : Theory Applications* ( Beijing : Beijing Electronics Industry Press ) 116 ( in Chinese )[ Reinhold Ludwig 和 Pavel Bretchko 2002 射频电路设计 理论与应用 ( 北京 : 电子工业出版社 ) 116 ]

# A new method based on the construction of hypothetical symmetrical networks for fixture calibration in network analyzers<sup>\*</sup>

Liu Chao Zhang Shang-Jian Xie Liang Zhu Ning-Hua<sup>†</sup>

( State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics , Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China )

( Received 16 September 2004 ; revised manuscript received 16 November 2004 )

## Abstract

At least three known standards are normally required for the full two-port test fixture calibration in vector network analyzers ( VNA ). In this paper , a calibration procedure using only one standard , based on establishing two hypothetical symmetrical fixtures using triple-through method , is shown . The results using the calibrating method to subtract the influence of fixtures are in accord with the directly measured data of the device-under-test ( DUT ) without the fixtures very well , which shows that the proposed method is very simple and accurate .

**Keywords** : calibration , test fixture , network analyzer , scattering parameter measurement

**PACC** : 0620D , 0600 , 0620H , 0690

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China( Grant No.2001AA312030 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : nhzhu@red.semi.ac.cn