

线性 TSM 和 TRL 校准方法中方程的选择

王幼林, 陈振宇, 钱 辰, 祝宁华

(中国科学院半导体所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 本文分析了校准方程的关系, 提出对于互易的测试夹具, 使用一个传输标准得到的四个线性方程可以同时用于校准计算. 在这个关系的基础上, 讨论了 TSM (thru short-match) 和 TRL (thru-reflect-line) 方法中的方程选择. 实验和分析表明不同的选择会导致不同精度的结果, 校准精度可以通过利用已建立的关系和合适地选择方程得以提高. 已建立的理论也可应用于 TOM 和 LRL 方法.

关键词: 校准; 微波网络分析仪; 测试夹具; 散射参数测量

中图分类号: TN707 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 05-0714-03

Choice of Equations in Linear TSM and TRL Methods

WANG You-lin, CHEN Zhen-yu, QIAN Chen, ZHU Ning-hua

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 912, Beijing 100083, China)

Abstract: The relation of calibration equations is investigated. It has been shown that for the reciprocal test fixtures, the four equations obtained from the measurement with a transmission standard can be used simultaneously in the calculation. Choices of the equations in the thru short-match (TSM) and thru-reflect-line (TRL) methods are discussed. Experimental results show that the different choice of equations will lead to different solutions, and the calibration accuracy can be improved by utilizing the established relation of the calibration equations and properly choosing calibration equations. The proposed theory can be applied to the thru-open-match (TOM) and line-reflect-line (LRL) methods.

Key words: calibration; microwave network analyzer; test fixtures; scattering-parameter measurement

1 引言

在微波频段, 用网络分析仪测量微带电路, 半导体器件的散射参数时, 通常预先对夹具进行校准以保证测量精度. 在过去的研究中, 已经提出了很多校准方法^[1~8]. Silvonon^[3,4]提出了一组含有七个未知量的线性方程, 并且建立了一种普适性的新校准计算方法. 使用传输标准可以得到四个线性方程, 在大多数情况下, 测试夹具是互易的, 这样只有三个方程是独立的. 使用反射标准, 只能得到两个方程. 基于上面的理论, 提出了线性的 TSM (thru short-match) 和 TOM (thru-open-match) 校准方法^[5]. 其校准过程简单, 并且没有相位不确定性和频率限制问题. 对于这两种校准方法, 对三个标准的测量可以得到八个方程, 而只需要解出七个未知量, 所以, 可以从 thru 标准的四个方程中任选三个, 共有四种选择, 但它们给出不同的结果.

TRL (thru-reflect-line) 方法中, 反射标准的散射参数是未知的, 可以在校准过程中加以确定^[1,2], 这样可以消除由于反射标准的不精确带来的误差. 这种优点使其成为广泛使用的校准方法. 采用这三个标准可以得到十个校准方程, 而只有八个

未知量. 因此, 在校准过程中也存在方程的选择问题.

Silvonon^[4]指出不同的结果是由测量误差引起的, 但是并未指出哪一种选择可以得到最精确的结果. 到目前为止, 还没有人对此问题给予仔细的研究. 本文首先分析了使用一个传输标准的四个线性方程的关系. 根据所得的关系, 讨论了 TSM 和 TRL 方法的方程选择, 给出了各种可能的组合, 并用实验检验了各种结果的校准精度. 最后, 关于如何选择方程才能得到最好的校准精度给出了建议.

2 校准方程的关系

如图 1 所示, 测试的级联网络由夹具 A 和 B 及插入其中的标准组成. 对于传输标准 P, 由网络级联和流图的分析, 可以得到下列线性方程^[1,3,7]:

$$S_{A11} + S_{A22} S_{P11} S_{MP11} - A S_{P11} + k S_{B11} S_{P21} S_{MP12} = S_{MP11} \quad (1)$$

$$S_{A22} S_{P12} S_{MP11} - A S_{P12} - k S_{MP12} + k S_{B11} S_{P22} S_{MP12} = 0 \quad (2)$$

$$S_{A22} S_{P11} S_{MP21} + k S_{B11} S_{P21} S_{MP22} - k B S_{P21} = S_{MP21} \quad (3)$$

$$S_{A22} S_{P12} S_{MP21} - k S_{MP22} + k S_{B11} S_{P22} S_{MP22} + k S_{B22} - k B S_{P22} = 0 \quad (4)$$

其中

收稿日期: 2002-07-11; 修回日期: 2002-11-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (No. G2000036601); 国家杰出青年科学基金 (No. 69825109)

$$X = S_{X11} S_{X22} - S_{X12} S_{X21}, X = A \text{ or } B \quad (5)$$

$$k = S_{A21} / S_{B12} \quad (6)$$

测试夹具的未知参量为:

$$S_{A11} \quad S_{A22} \quad A \quad k \quad kS_{B11} \quad kS_{B22} \quad k \quad B. \quad (7)$$

如果测量的级联网络是互易的, k 可表示为:

$$k = \frac{kS_{B11} kS_{B22} - S_{A11} S_{A22} + A}{k \quad B} \quad (8)$$

这个方程说明式(7)所列测试夹具的七个未知量不是独立的。

另一方面,消去方程(1)和(4)中的 $S_{P21} S_{MP12}$ 和 $S_{P12} S_{MP21}$ 可得:

$$\begin{aligned} & -S_{A11} - S_{A22} S_{P11} S_{MP11} + A S_{P11} + S_{MP11} \\ & \quad kS_{B11} \\ & = \frac{kS_{MP22} - kS_{B11} S_{P22} S_{MP22} - kS_{B22} + k \quad B S_{P22}}{kS_{A22}} \quad (9) \end{aligned}$$

同样消去方程(2)和(3)中的 S_{MP21} / S_{P21} 和 S_{MP12} / S_{P12} 可得

$$\frac{S_{A22} S_{MP11} - A}{k - kS_{B11} S_{P22}} = \frac{kS_{B11} S_{MP22} - k \quad B}{1 - S_{A22} S_{P11}} \quad (10)$$

联立式(9)和(10),消去包含 S_{P11} , S_{P22} , S_{MP11} 和 S_{MP22} 的项,便可得到式(8)。当把式(8)代入式(1) - (4)中,消去 k ,能得到三个独立的非线性方程。因此,校准过程变为非线性方程的求解。上面的推导表明,当从式(1) - (4)中任意选取三个方程后,剩下的方程可以替代式(8)。也就是说,式(1) - (4)可以同时使用。这样处理所带来的最大好处是方程求解线性化,大大简化校准过程。

3 校准方程的选择

对于 TSM 方法,可以得到的八个校准方程为 $T1-T4$, $S1$, $S4$, $M1$ 和 $M4$,其编号与式(1) - (4)一致。由于计算只需七个方程,所以当 $T1-T4$ 同时使用时, $S1$, $S4$, $M1$ 和 $M4$ 中只能选取三个,那么共有四种组合。按照文献[3]的方法,从 $T1-T4$ 中选三个,再加上 $S1$, $S4$, $M1$ 和 $M4$,也有四种组合。所有可能的八种组合和分析结果都在表 1 给出了。对于 $T1-T4$ 中的任意三个方程和式(8)一起使用时的情况,它们的解与同时选 $T1-T4$ 的对应组合是一样的,例如,选择 $T1-T4$ 中的任意三个、式(8)、 $S1$, $M1$ 和 $M4$ 可以构成四种组合,它们与组合 1 的解完全一样,这符合上节的分析,在表 1 中给出这些组合。为了简单,其他的组合并没有给出。

同样,对于 TRL 方法,我们得到十个方程 $T1-T4$, $R1$, $R4$, $L1-L4$ 。由于反射标准是未知的, $R1$ 和 $R4$ 必须同时使用。使用 thru 和 line 两个传输标准可以得到以下两个关系^[5,6]:

$$(-S_{T12} S_{T21} - S_{L12} S_{L21}) S_{MT12} S_{ML21} = (M_T + M_L - S_{MT11} S_{ML22} - S_{ML11} S_{MT22}) S_{T12} S_{L21} \quad (11)$$

$$S_{MT21} S_{ML12} S_{T12} S_{L21} = S_{MT12} S_{ML21} S_{T21} S_{L12} \quad (12)$$

因此,当把 thru 作为第一个传输标准, $L1-L4$ 中只有两个是独立的,也就是说只能选择两个用于校准计算。这样, $T1-T4$ 必须同时使用,这与第二节分析一致。当然,也可以同时使用 $L1-L4$,只选择 $T1-T4$ 中的两个方程。考虑 thru 和 line 都属于传输线,则两种情况是一致的。通常采用前一种选择,这样会

有六种组合,它们的结果在表 2 中给出。对于此方法中,反射标准的解有符号选择的问题,对其的确定可以用 short 或 open 作为反射标准来实现^[6],因此待测夹具参数的符号也就可以确定。考虑夹具 A 和 B 的可比较性和它们的传输特性,在表 1 和表 2 中只给出 S_{A11} , S_{A22} , A , $S_{A21} S_{B21}$ 和 $S_{A12} S_{B12}$ 结果,夹具 B 的特性可对比得到。

表 1 TSM 方法的不同组合的比较

° = 好, × = 差(对测量误差敏感), = 好但有频率限制

组合	S_{A11}	S_{A22}	A	$S_{A12} S_{B12}$	$S_{A21} S_{B21}$
1 $T1-T4, M1, M4, S1$	°	°	°	°	°
2 $T1-T4, M1, M4, S4$	°	°	°	°	°
3 $T1-T3, (8), M1, M4, S1$	°	°	°	°	°
4 $T1, T2, T4, (8), M1, M4, S1$	°	°	°	°	°
5 $T1, T3, T4, (8), M1, M4, S1$	°	°	°	°	°
6 $T3, T3, T4, (8), M1, M4, S1$	°	°	°	°	°
7 $T1-T4, S1, S4, M1$	°	×			
8 $T1-T4, S1, S4, M4$	×				
9 $T1, T2, T3, S1, S4, M1, M4$	°	×	°	°	°
10 $T1, T2, T4, S1, S4, M1, M4$	°	°	°	°	×
11 $T1, T3, T4, S1, S4, M1, M4$	°	°	°	×	°
12 $T2, T3, T4, S1, S4, M1, M4$	°	°	°	°	°

表 2 TRL 方法的不同组合的比较

° = 好, × = 差(对测量误差敏感), = 好但有频率限制, - = 无解

组合	S_{A11}	S_{A22}	A	$S_{A12} S_{B12}$	$S_{A21} S_{B21}$
1 $T1-T4, L1, L2, R1, R1$		×	×		
2 $T1-T4, L1, L3, R1, R4$	-	-	-	-	-
3 $T1-T4, L1, L4, R1, R4$					
4 $T1-T4, L2, L3, R1, R4$	×	×	×	×	×
5 $T1-T4, L2, L4, R1, R4$	-	-	-	-	-
6 $T1-T4, L3, L4, R1, R4$	×		×		

所有测试实验是在 3.5mm 同轴校准环境下进行的。我们首先对 HP8720D 网络分析仪在 50MHz 到 20.05GHz 的频率范围内采用 HP85052 标准组件^[9]进行双端口 short-open-load-thru (SOLT)方法校准^[9],然后进行夹具的校准测试。

从表 1 中可以看出,组合 1 和组合 2 给出最好的结果,它们只使用一个 short 方程。在这两种组合中,未知量(除 S_{A11} 和 S_{B22} 外)的表达式是不一样的,但给出同样精确的结果。也就是说,校准中只需要对 short 标准在一个端口的测量,这与 TMS 方法是一致的^[7]。组合 3 - 6 的结果和组合 1 是相同的,但是要解非线性方程。在组合 7 和 8 里,只用一个 match 方程,这时校准结果中出现频率限制,并且某些结果有较大的误差,这是因为对 thru 和 short 的测量在某些频率点是关联的^[8]。组合 7 中的 S_{A11} 并没有频率限制,因为它可以从 $M1$ 中解出。组合 9 - 12 分别存在 S_{A22} , $S_{A21} S_{B21}$ 和 $S_{A12} S_{B12}$ 不精确的解。组合 12 中的 S_{B11} 是不精确的,在表中没有给出。图 2 展示了组合 1、7 和 10 中的 S_{A22} 和 $S_{A21} S_{B21}$ 校准结果的差别。为了比较,直接测量的数据也在图上给出。对于 TRL 方法,从表 2 中可以看出各种组合结果的不同是由于 $L1-L4$ 的不同选择引起的。组合 1 和组合 6 表明,某些项的解不好。组合 2 选择 $L1$ 和 $L3$,我们得不到未知量的解析表达式,因为所选方程的行列式的值

等于零. 组合 5 和组合 2 是相似的. 如果选 $L1$ 和 $L4$, 所得结果的精度较高. 在组合 4 中, $L2$ 和 $L3$ 被选, 所有未知量的结果都非常差. 上述各组解都存在周期性的频率限制点^[6]. 图 3 给出了组合 1 和组合 3 中的 S_{A22} , A 和 S_{A21} S_{B21} 的结果进行比较. 在同一图中, 还给出了直测数据. 从图上可以看出, 各组解的精确程度很不相同.

当夹具的散射参数得到以后, 把待测器件连接在两夹具之间进行测量, 根据网络级联便可计算得到待测器件的散射

参数^[1]. 根据上面的分析和比较可以看出, 对于 TSM 方法, 表 1 中组合 1 和组合 2 的结果最符合直测数据, 并且是线性方程求解. 对于 TRL 方法, 表 2 中组合 3 给出最好的结果. 这些组合的方程选择方法与文献^[4]中的一致.

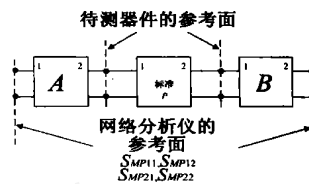


图1 校准测试图

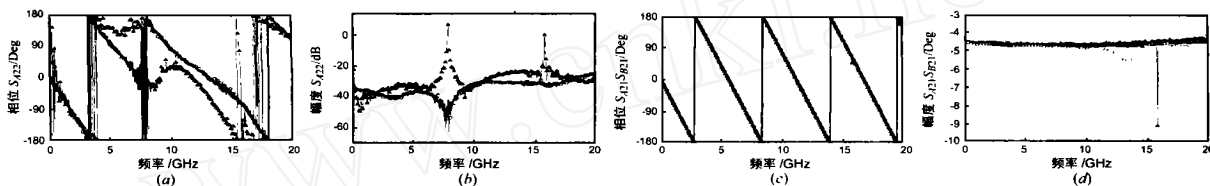


图2 TSM方法的组合1()、组合3(-)和组合10(-▽-)的计算结果与直测数据(→)比较

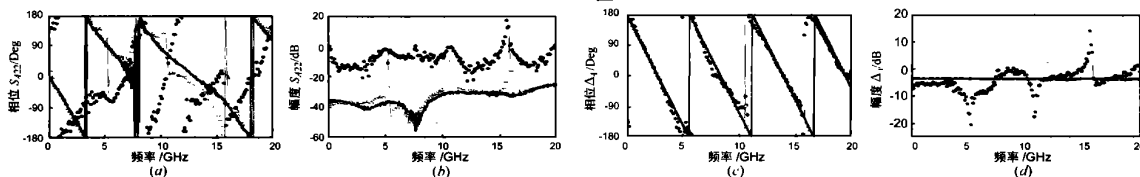


图3 TRL方法的组合1()和组合3(-)的计算结果与直测数据(→)比较

4 结论

通过上面的理论分析和实验讨论了方程的选择问题. 它包括两个方面: 第一, 对于互易测试夹具, 第一个传输标准的四个方程应该同时使用; 第二, 对于第二个传输标准, 应选择第一和第四个方程, 这样可得到相对最精确的校准. 虽然其他的组合从数学的角度来说是正确的, 但却给出不精确的结果. 对于 TSM 方法, 组合 1 和组合 2 的结果最好, 当只选择一个 match 的方程, 校准结果会出现频率限制. 对于 TRL 方法, 组合 3 的结果是最精确的. 由于测试标准阻抗匹配, 一些组合不能得到解析表达式. 本文的分析主要针对 TSM 和 TRL 方法, 因为 open 与 short 类似, 所以对于 TOM 方法, 我们可以得到同样的结论. 同样, thru 可以用其他的 line 代替, 上面的结论可扩展应用于 LRL 方法.

致谢 本文作者感谢芬兰赫尔辛基技术大学的 KJ Silvenen 教授富有成果的讨论.

参考文献:

- [1] Speciale R A. A generalization of the TSD network-analyzer calibration procedure, covering n -port scattering-parameter measurements, affected by leakage errors [J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, December 1977, 25(12): 1100 - 1115.
- [2] Engen G F, Hoer C A. Thru-reflect-line: An improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, December 1979, 27(12): 987 - 993.
- [3] Silvenen K J. Calibration of test fixtures using at least two standards [J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, April 1991, 39

(4): 624 - 630.

- [4] Silvenen K J. A general approach to network analyzer calibration [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, April 1992, 40(4): 754 - 759.
- [5] Zhu N H. Phase uncertainty in calibrating microwave test fixtures [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, October 1999, 47(10): 1917 - 1922.
- [6] Eul H-J, Schiek B. A generalized theory and new calibration procedures for network analyzer self-calibration [J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, April 1991, 39(4): 724 - 731.
- [7] Jargon J A, Marks R B, Rytting D K. Robust SOLT and alternative calibration for four-sampler vector network analyzer [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, March 1999, 47(10): 2008 - 2013.
- [8] Zhu N H, Auracher F. Correlation of calibration equations for test fixtures [J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, October 1999, 47(10): 1949 - 1953.
- [9] Agilent Technologies (former HP Company), HP8720D Network Analyzer User's Guide [Z]. Http://www.agilent.com.

作者简介:



王幼林 男, 1970 年出生于河南潢川, 1991 年获得四川大学光学专业学士学位, 2000 年获得北京师范大学光学专业硕士学位, 现为中科院半导体所博士研究生, 研究方向为微波网络分析仪校准, 光电子器件的高频测试分析和封装.