

在片矢量网络分析仪测试系统 量值比对方案的探讨

孙晓颖 孙 静 栾 鹏 吴爱华 韩利华 梁法国
(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北石家庄 050051)

摘 要 目前国内尚未建立在片矢量网络分析仪测试系统的有效溯源途径, 随着微电子行业的高速发展, 在片模式下测量的散射参数的计量问题急需解决。为达到量值一致、可靠的目的, 本文针对在片矢量网络分析仪测试系统提出了量值比对方案, 提出采用失配衰减单片作为传递标准。对比对结果的数据统计方法进行了探讨, 同时采用两种统计方法进行离群值剔除, 采用各实验室测量值的算术平均值作为参考值, 推导出这种情况下比对结果的归一化偏差 E_n 。

关键字 在片矢量网络分析仪 量值比对 参考值 归一化偏差 E_n

Discussion on the Scheme of on-wafer Vector Network Analyzer Test System Comparison of Values

SUN Xiao-ying SUN Jing LUAN Peng WU Ai-hua HAN Li-hua LIANG Fa-guo
(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051)

Abstract Currently not been established effective traceable way in the on-wafer vector network analyzer test system, with the rapid development of the microelectronics industry, calibration issues of measure in on-chip mode scattering parameters need to be resolved. To achieve consistent and reliable value, this paper introduces a scheme of on-wafer Vector Network Analyzer Test System comparison of values, proposes on-chip mismatch attenuations as the transfer standard. Statistical methods of the comparison results are discussed in the article, while removing outlier by two means of statistical methods, adopting the arithmetic average value of all laboratory measurement results as the reference value, deriving the normalized bias based on the case.

Keywords On-wafer Vector Network Analyzer Comparison of values Reference value Normalized bias E_n

1 引 言

量值比对, 是指在规定条件下, 对相同准确度等级的同种测量标准或工作测量器具之间的量值进行的比较。

在缺乏高一级测量标准时, 往往通过比对来统一量值。如各个国家的最高测量标准通常是通过国际比对来证明量值的一致程度。对于各实验室的测量标准, 当没有更高一级的测量标准可溯源时, 实验室的比对结果是量值一致性的有效证明。

量值比对强调两点。

- 1) 找不到更高一级测量标准;
- 2) 参与比对的测量设备应是具有相同准确度等级的同等测量设备。

目前, 对于在片矢量网络分析仪测试系统, 由于无法找到更高一级的测量标准, 国内尚未建立有效的溯源途径, 所以, 在片矢量网络分析仪测试系统量值比对的结果是证明其量值正确、一致、可靠的有效手段。

2 比对的目 的

在片矢量网络分析仪测试系统是目前测试芯片电路的主要测试仪器，其系统组成如图 1 所示，主要由矢量网络分析仪和微波探针台共同组成，可以实现芯片电路的在片网络参数测量。

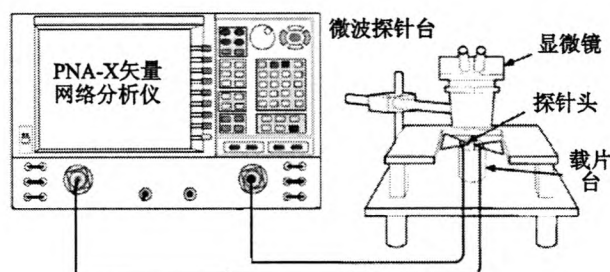


图 1 在片矢量网络分析仪测试系统组成

目前国内只能对同轴和波导接口的矢量网络分析仪进行溯源和校准，对于在片矢量网络分析仪测试系统还不能实现溯源和校准。为了解决在片矢量网络分析仪测试系统的校准和溯源问题，通过设计制作了一组失配衰减单片，利用量值比对手段，证明在片矢量网络分析仪测试系统传输和反射特性的量值一致性的程度；同时可得到该组失配衰减单片的标准值，利用失配衰减单片的标准值对在片矢量网络分析仪测试系统进行量值传递，解决该系统的溯源问题。

3 比 对 方 案

3.1 技术依据

JJF 1117-2010 《计量比对》；

2008 《计量比对管理办法》国家质量监督检验检疫总局令 107 号；

JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》；

GJB/J 3608—99 《自动网络分析仪检定规程》。

3.2 比 对 的 方 式

如图 2 所示，采用环式比对的方式进行比对。

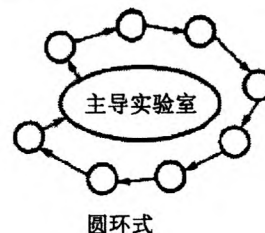


图 1 环式比对方式

3.3 传递标准的设计及制作

由于在片矢量网络分析仪测试系统的量值溯源主要考虑传输幅度特性及反射特性，且传递标准件要求良好的重复性、稳定性，传递标准件可根据失配的频段及量值溯源要求设计为无源结构的失配衰减单片。以(2~26.5)GHz 在片矢网测试系统为例，设计制作了衰减量为 3dB、6dB、15dB 的失配衰减单片，采用平衡式 Π 型电阻网络的形式，以 GaAs 材料微带线的形式制作而成，利用溅射技术，把镍铬合金在衬底上制成高频电阻，并在其上覆盖氮化硅薄膜。传递标准件制作完成后，应进行测试，并进行重复性及稳定性考核。每次测量 n ($n \geq 6$) 个观测值，计算 n 个观测值的实验标准偏差 s 和算术平均值 \bar{x}_i ；一年内共测 m ($m \geq 4$) 次，再计算 \bar{x}_i 的平均值 \bar{x} 及其实验标准偏差 s_m 。考核结果 $s \leq 2u_c/3$ ，重复性满足要求； $s_m \leq u_c$ ，稳定性满足要求。

3.4 比 对 的 准 备

主导实验室根据计量比对管理办法，应提前编制《在片矢量网络分析仪测试系统量值比对方案及实施细则》，征求各方面的意见和建议，经参比实验室及专家组认真讨论后定稿。

主导实验室负责对传递标准进行重复性及稳定性考核。在规定的条件下，采用同一标准、同一测量人员、同一测量地点，对失配衰减单片进行多次测量 ($n \geq 6$, $m \geq 4$)，以考察衰减器失配与衰减量的重复性及稳定性。重复性应满足小于合成标准不确定度 $2u_c/3$ 的要求； $s_m \leq u_c$ ，稳定性应满足小于合成标准不确定度 u_c 的要求。

3.5 比 对 内 容 及 过 程

各参比实验室使用本实验室的“在片矢量网络分析仪测试系统”分别对传递标准（失配衰减单片）进行测试。具体数据点由失配的频段及传递标准的量值来确定。每个数据点共测量 6 次（不

包含离群值), 取 6 次测量数据的算术平均值作为该实验室的测量结果。各参比实验室分别得到各自测量结果, 并评定测量不确定度。

主导实验室负责对比对数据进行最终处理, 得到参考值、参考值不确定度; 归一化偏差 E_n 、评定各参比实验室数据是否符合一致性要求; 总结对比结果, 生成对比总结报告。

4 比对数据的处理方法及判定标准

量值比对过程中, 要求每个实验室对每个数据点进行 6 次测量, 取 6 次测量数据的算术平均值作为该实验室该数据点的测量值。6 次测量数据应先进行异常值的判定与剔除。若产生异常值, 剔除异常值后增加相应的测量次数, 以保证最终有 6 次合理且不离群的测量数据。然后, 以所有参加实验室的测量结果的算术平均值作为该数据点的参考值。最后, 分别计算各参加实验室的归一化偏差 E_n 值评价比对数据, 当 $|E_n|$ 小于或等于 1 时, 测量结果符合一致性要求; 否则, 测量结果不符合一致性要求。

4.1 异常值的判定和剔除

异常值 (abnormal value), 又称离群值 (outlier), 指在对一个被测量重复观测所获得的若干观测结果中, 出现了与其他值偏离较远且不符合统计规律的个别值, 它们可能属于来自不同的总体, 或属于意外的、偶然的测量错误。如果一系列测量值中混有异常值, 必然会歪曲测量的结果。这时若能将该值剔除不用, 即可使结果更符合客观情况。在有些情况下, 一组正确测得值的分散性, 本来是客观地反映了实际测量的随机波动特性, 但若人为的丢掉了一些偏离较远但不属于异常值的数据, 由此得到的所谓分散性很小, 实际上是虚假的。因为, 以后在相同条件下再次测量时原有正常的分散性还会显现出来。所以必须正确的判别和剔除异常值。

在测量过程中, 记错、读错、仪器突然跳动、突然震动等异常情况引起的已知原因的异常值, 应该随时发现, 随时剔除, 这就是物理判别法。有时, 仅仅是怀疑某个值, 对于不能确定哪个是异常值时, 可采用统计判别法进行判别。

常用的统计判断准则有 3σ (拉伊达) 准则、格拉布斯 (Grubbs) 准则和狄克逊 (Dixon) 准

则 3 个。它们都限于对正态或近似正态的样本数据的判断处理。

在 $n > 50$ 的情况下, 3σ 准则较简便; $3 < n < 50$ 的情况下, 格布拉斯准则效果较好, 适用于单个异常值; 有多于一个异常值时狄克逊准则则较好。

在片网测试系统量值比对过程中, 要求每个数据点测量 6 次, 故 $n=6$ 。选用格布拉斯准则与狄克逊准则同时进行判断, 取 $\alpha=0.05$, 二者判断结论一致则认为应当剔除; 若二者判断结论有矛盾时, 则取 $\alpha=0.01$, 当二者判断结论一致则剔除该测量数据; 如果 $\alpha=0.01$ 时, 二者判断仍然矛盾, 则该测量数据不剔除。

4.1.1 格拉布斯 (Grubbs) 准则

设在一组重复观测结果 x_i 中, 其残差 v_i 的绝对值 $|v_i|$ 最大者为可疑值 x_d , 在给定的置信概率为 $p=0.99$ 或 $p=0.95$, 也就是显著性水平为 $\alpha=1-p=0.01$ 或 0.05 时, 如果满足式 (1), 可以判定 x_d 为异常值。

$$\frac{|x_d - \bar{x}|}{s} \geq G(\alpha, n) \quad (1)$$

式中, $G(\alpha, n)$ ——与显著性水平 α 和重复观测次数 n 有关的格布拉斯临界值。其中 $G(0.05, 6) = 1.822$, $G(0.01, 6) = 1.944$ 。

4.1.2 狄克逊 (Dixon) 准则

设所得的重复观测值按由小到大的规律排列为: x_1, x_2, \dots, x_n 。其中的最大值为 x_n , 最小值为 x_1 。按以下几种情况计算统计量 γ_{ij} 或 γ'_{ij} :

1) 在 $n=3\sim 7$ 情况下,

$$\gamma_{10} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}, \quad \gamma'_{10} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$$

2) 在 $n=8\sim 10$ 情况下,

$$\gamma_{11} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}, \quad \gamma'_{11} = \frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$$

3) 在 $n=11\sim 13$ 情况下,

$$\gamma_{21} = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_2}, \quad \gamma'_{21} = \frac{x_3 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$$

4) 在 $n \geq 14$ 情况下,

$$\gamma_{22} = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_3}, \quad \gamma'_{22} = \frac{x_3 - x_1}{x_{n-2} - x_1}$$

以上的 γ_{10} , γ'_{10} ; ...; ...; γ_{22} , γ'_{22} 分别简化写成 γ_{ij} 和 γ'_{ij} 。设 $D(\alpha, n)$ 为狄克逊检验的临界值, 判定异常值的狄克逊准则为:

当 $\gamma_{ij} > \gamma'_{ij}$, $\gamma_{ij} > D(\alpha, n)$, 则 x_n 为异常值;
当 $\gamma_{ij} < \gamma'_{ij}$, $\gamma'_{ij} > D(\alpha, n)$, 则 x_1 为异常值。
否则, 没有异常值。

使用这一准则, 可以多次剔除异常值, 但每次只能剔除一个。每次剔除异常值后, 则增加相应的测量次数, 并重新排序计算统计量 γ_{ij} 和 γ'_{ij} , 然后再进行下一个异常值的判断。最终要保证 6 次合理不离群的测量数据。

狄克逊检验的临界值中 $D(0.05, 6) = 0.628$,
 $D(0.01, 6) = 0.740$ 。

4.2 参考值的确定

如果所有参比实验室中没有实验室能够提供比较权威的比对参量的参考值, 则这类比对有一个前提: 各个参加实验室必须工作在相同的准确度水平, 即认为它们是等精度的。这在技术和测量的前沿是经常遇到的情况。这时, 参考值 Y_i 可采用各个实验室测量值的算术平均值。

在片失网测试系统量值比对活动中, 各实验室标准装置为同等水平测量仪器, 所以, 采用所有参加实验室测量结果的算术平均值作为参考值。比对实验第 i 个测量点的参考值 Y_{ri} 为

$$Y_{ri} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_{ji} \quad (2)$$

式中, j ——对参考值有贡献的第 j 个实验室; i ——比对实验的第 i 个测量点; n ——对参考值有贡献的实验室数量; Y_{ji} ——为第 j 个实验室上报的在第 i 个测量点上的测量结果。

4.3 参考值的不确定度

由于参考值选用所有参加实验室测量结果的算术平均值, 且各实验室的不确定度之间完全

不相关, 且在比对实验中传递标准引入的不确定度的影响可以忽略, 参考值 Y_{ri} 的标准不确定度按式 (3) 计算:

$$u_{ri} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{ji}^2} \quad (3)$$

式中, u_{ji} ——第 j 个实验室宣称的在第 i 个测量点上的测量结果的标准不确定度; u_{ri} ——第 i 个测量点的参考值的标准不确定度。

4.4 比对结果的评价

比对结果通常用比对判据 E_n 值进行评价, E_n 值又称为归一化偏差, 为各实验室比对结果与参考值的差值与该差值的不确定度之比, 当 $|E_n|$ 小于或等于 1 时, 比对实验室测量结果符合一致性要求; 当 $|E_n|$ 值大于 1 时, 比对实验室测量结果不符合一致性要求。

在片失网测试系统量值比对活动中, 采用所有参加实验室测量结果的算术平均值作为参考值。所以, 在第 i 个测量点上, 第 j 个实验室的测量结果 Y_{ji} 与参考值 Y_{ri} 是相关的。

对于第 t 个 (即 $j=t$) 参加实验室, 其在第 i 个测量点的测量结果差值 ($Y_{ti} - Y_{ri}$) 可以用各参加实验室的测量值表示如下

$$(Y_{ti} - Y_{ri}) = \frac{n-1}{n} Y_{ti} - \frac{1}{n} \sum_{j \neq t} Y_{ji} \quad (4)$$

因各实验室测量值是相互独立的, 故差值 ($Y_{ti} - Y_{ri}$) 的标准不确定度 u_{rti} 可用各实验室报告的测量不确定度 u_{ti} 和 u_{ji} ($j=1, 2, \dots, n; j \neq t$) 的方和根表示如下:

$$u_{rti} = \sqrt{(c_{ti} u_{ti})^2 + \sum_{j \neq t} (c_{ji} u_{ji})^2} \quad (5)$$

式中, 灵敏系数 (或传播系数) c_{ti} 和 c_{ji} ($j=1, 2, \dots, n; j \neq t$) 可由式 (4) 求偏导数给出

$$c_{ti} = \frac{n-1}{n} \quad (6)$$

$$c_{ji} = \frac{1}{n} \quad (7)$$

由此可求得第 t 个实验室在第 i 个测量点的测量结果差值的标准不确定度 u_{rti} 为

$$u_{rti} = \sqrt{\left(\frac{n-1}{n}u_{ti}\right)^2 + \sum_{j \neq t}^n \left(\frac{1}{n}u_{ji}\right)^2} \quad (8)$$

如果各参比实验室测量结果的扩展不确定度的置信水平都取 95%，且测量结果皆服从正态分布，则第 t 个参加实验室的测量结果差值的扩展不确定度 U_{Rti} 为

$$U_{Rti} = \sqrt{\left(\frac{n-1}{n}U_{ti}\right)^2 + \sum_{j \neq t}^n \left(\frac{1}{n}U_{ji}\right)^2} \quad (9)$$

式中， U_{ri} 和 U_{ji} ($j=1, 2, \dots, n; j \neq t$) 是各参加实验室报告的测量结果的扩展不确定度（置信水平均为 95%）。

因此，在进行比对试验时，采用所有参加实验室测量值的算术平均值作为参考值时，用于评定各参加实验室测量结果的比率 E_{nti} （第 t 个实验室在第 i 个测量点的 E_n 值）可表示为

$$E_{nti} = \frac{n(Y_{ti} - Y_n)}{\sqrt{(n-1)^2 U_{ti}^2 + \sum_{j \neq t}^n U_{ji}^2}} \quad (10)$$

比对结果一致性的评判原则为

$|E_n| \leq 1$ ，参比实验室的测量结果与参考值之差在合理的预期之内，比对结果满意（一致性好）；

$|E_n| > 1$ ，参比实验室的测量结果与参考值之差没有达到合理的预期，比对结果不满意（一致性差）。

5 结束语

为解决在片矢量网络分析仪测试系统的溯源问题，本文设计了一套量值比对方案。通过设计制作一组失配衰减单片，对在片矢量网络分析仪测试系统的传输幅度特性与反射特性进行比对实验。对比对结果进行数据处理与分析，得到归一化偏差 E_n 值来证明在片矢量网络分析仪测试系统的量值一致性程度；得到参考值作为失配衰减单片的标准值，利用该标准值对在片矢量网络分析仪测试系统进行量值传递。在数据处理方法上，本文同时采用两种统计方法进行异常值剔除，确保所得测量数据的客观可靠；采用各实验室测量结果的算术平均值作为参考值；重点推导出此情况下的 E_n 值公式来评价参比实验室量值一致程度。

参考文献

- [1] 计量技术基础.北京:原子能出版社.2002年
- [2] 一级注册计量师基础知识及专业实务.北京:中国计量出版社.2009年
- [3] 计量比对 JJF 1117-2010.国家质量监督检验检疫总局.2010
- [4] 校准实验室间能力验证(比对)试验的比率值 E_n .刘欣萌,陈成仁.计量技术.2001(5)

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测量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练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练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>