

矢量网络分析仪校准误差分析

陈 涛

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘 要: 本文针对 SOLR 双端口校准方法, 分析了校准件不完善——开路器、短路器校准位置不明确及校准件负载不理想对双端口校准结果的影响, 并推导出校准件实际值和理想值的偏差与校准结果之间的数学关系, 结合仿真数据对推导结果进行了验证。

关键词: S 参数, SOLR 校准, 校准件, 测量不确定度

Influence of Nonideal Calibration Items on VNA Measuring

CHEN Tao

(Nanjing Research Institute of Electric Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The influence of nonideal calibration items on short-open-load-reciprocal (SOLR) calibration method to calibrate a four sampler VNA is considered in this paper. The expressions for the deviations of the error terms and of the measured S-parameters of two-port test objects from their true values are presented. Moreover, the data from simulation validate the expressions at the end of this paper.

Key words: S-parameters, short-open-load-reciprocal calibration, calibration items, measuring uncertainty

引 言

矢量网络分析仪标准校准件的参考面只能在于同轴连接处, 无法消除测试夹具引入的误差。SOLR 双端口校准方法是比较普遍的 12 相误差校准法。在校准过程中, 开路器、短路器、匹配负载都被认为是理想的。然而由于实际的制造工艺不完善, 校准件与校准模型不完全一致, 校准件的反射系数会偏离理想的值, 对测量结果引入误差。本文分析了由于校准件的不完善给测量结果引入的误差度, 给出了校准件的反射系数的偏差与校准件测量结果偏差二者数学推导结果和结论, 结合仿真数据证明结论的正确。

1 误差的理论推导

双端口的误差模型的信号流程图如图 1 所示。该误差模型中, S 参数下标 A 代表 DUT 实际的 S 参数, S 参数下标 M 代表矢网测量到的 S 参数, 12 相误差分别为: E_{DF} , E_{DR} : 方向性误差; E_{SF} , E_{SR} : 源失配误差; E_{LF} , E_{LR} : 负载失配误差; E_{TF} , E_{TR} : 传输误差; E_{RF} , E_{RR} 反射性误差; E_{XF} , E_{XR} : 隔离性误差; 其中, 下标 F 代表前向误差, 下标 R 代表反射误差, DUT 的实际 S 参数以及 12 相误差相可由测量的 S 参数得到。通过对其信号流的求解得到:

$$E_{11M} = E_{DF} + \frac{S_{11A} E_{RF} (1 - S_{22A} E_{LF}) + S_{21A} S_{12A} E_{LF} E_{RF}}{1 - S_{11A} E_{SF} (1 - S_{22A} E_{LF}) - S_{21A} S_{12A} E_{LF} E_{SF}} \quad (1)$$

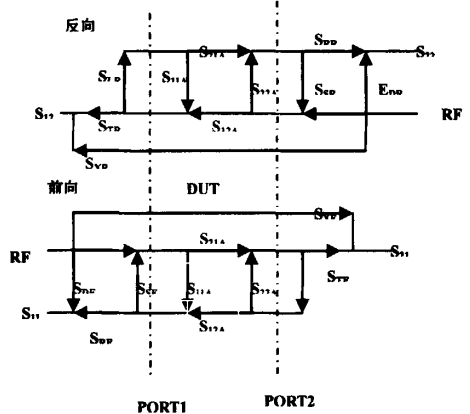


图 1 双端口误差信号流程图

校准时, 两个端口对称, 当在测试端口分别加开路器 ($S_{11A}=1, S_{22A}=S_{21A}=S_{12A}=0$), 短路器 ($S_{11A}=-1, S_{22A}=S_{21A}=S_{12A}=0$), 匹配负载时 ($S_{11A}=S_{22A}=S_{21A}=S_{12A}=0$), (1) 式可以化简为:

$$E_{11M} = E_{DF} \frac{S_{11A} E_{RF}}{1 - S_{11A} E_{SF}} \quad (2)$$

等效为单端口的 SOLR 校准。对 (2) 式取全微分得:

$$\begin{aligned} \partial E_{11M} &= \frac{\partial E_{11M}}{\partial S_{11A}} dS_{11A} + \frac{\partial E_{11M}}{\partial E_{DF}} dE_{DF} \\ &+ \frac{\partial E_{11M}}{\partial E_{RF}} dE_{RF} + \frac{\partial E_{11M}}{\partial E_{SF}} dE_{SF} = 0 \\ \square dS_{11A} &= \frac{(1 - E_{SF} S_{11A})^2}{E_{RF}} (dE_{DF} + \frac{S_{11A}}{1 - E_{SF} S_{11A}} dE_{RF} \\ &+ \frac{E_{RF} S_{11A}^2}{(1 - E_{SF} S_{11A})^2} dE_{SF}) \quad (3) \end{aligned}$$

有开路器, 短路器、匹配负载的实际反射系数为 S_{O11} 、 S_{S11} 、 S_{M11} , 端口测得的 S 参数分别为 E_{M1} 、 E_{M2} 、 E_{M3} 代入 (2) 式得:

$$E_{M1} = E_{DF} + \frac{S_{O11} E_{RF}}{1 - S_{O11} E_{SF}} \quad (4)$$

$$E_{M2} = E_{DF} + \frac{S_{S11} E_{RF}}{1 - S_{S11} E_{SF}} \quad (5)$$

$$E_{M3} = E_{DF} + \frac{S_{M11} E_{RF}}{1 - S_{M11} E_{SF}} \quad (6)$$

对 (4)、(5)、(6) 仿效式 (2), 做全微分, 求解得到:

$$dE_{DF} = -E_{RF} \left[\frac{S_{S11} S_{O11}}{(S_{M11} - S_{O11})(S_{M11} - S_{S11})} dS_{M11} + \frac{S_{M11} S_{O11}}{(S_{S11} - S_{O11})(S_{S11} - S_{M11})} dS_{S11} + \frac{S_{S11} S_{M11}}{(S_{O11} - S_{M11})(S_{O11} - S_{S11})} dS_{O11} \right] \quad (7)$$

$$dE_{RF} = E_{RF} \left[\frac{S_{S11} + S_{O11} + 2S_{S11} S_{O11} E_{SF}}{(S_{M11} - S_{O11})(S_{M11} - S_{S11})} dS_{M11} + \frac{S_{M11} + S_{O11} - 2S_{M11} S_{O11} E_{SF}}{(S_{S11} - S_{O11})(S_{S11} - S_{M11})} dS_{S11} + \frac{S_{S11} + S_{M11} - 2S_{S11} S_{M11} E_{SF}}{(S_{O11} - S_{M11})(S_{O11} - S_{S11})} dS_{O11} \right] \quad (8)$$

$$dE_{SF} = - \left[\frac{(1 - E_{SF} S_{S11})(1 - E_{SF} S_{O11})}{(S_{M11} - S_{O11})(S_{M11} - S_{S11})} dS_{M11} + \frac{(1 - E_{SF} S_{M11})(1 - E_{SF} S_{O11})}{(S_{S11} - S_{O11})(S_{S11} - S_{M11})} dS_{S11} + \frac{(1 - E_{SF} S_{M11})(1 - E_{SF} S_{S11})}{(S_{O11} - S_{M11})(S_{O11} - S_{S11})} dS_{O11} \right] \quad (9)$$

将式 (7)、(8)、(9) 代入式 (3) 中得校准件反射系数的偏差与被测件实际 S 参数误差间的关系。假设 3 个校准件中只有一个不理想, 即:

$$(1) \quad dS_{O11} = 0, dS_{S11} = 0, dS_{M11} \neq 0$$

$$dS_{11A} = \frac{S_{11A}^2 - S_{11A} S_{O11} + S_{S11} + S_{O11} S_{S11}}{S_{M11} - S_{S11}} dS_{M11} = \frac{S_{11A}^2 - 1}{S_{M11}^2 - 1} dS_{M11} \quad (10)$$

$$(2) \quad dS_{O11} = 0, dS_{M11} = 0, dS_{S11} \neq 0; S_{S11} = -1, S_{M11} = 0$$

$$dS_{11A} = \frac{S_{11A}^2 S_{11A} S_{S11} + S_{M11} + S_{S11} S_{M11}}{S_{O11} S_{M11} S_{O11} S_{S11}} dS_{O11} = \frac{S_{11A}^2 + S_{11A}}{S_{O11}^2 + S_{O11}} dS_{O11} \quad (11)$$

$$(3) \quad dS_{O11} = 0, dS_{M11} = 0, dS_{S11} \neq 0; S_{O11} = 1, dS_{M11} = 0$$

$$dS_{11A} = \frac{S_{11A}^2 S_{11A} S_{O11} + S_{M11} + S_{O11} S_{M11}}{S_{S11} S_{M11} S_{S11} S_{O11}} dS_{S11} = \frac{S_{11A}^2 S_{11A}}{S_{M11}^2 S_{M11}} dS_{S11} \quad (12)$$

式 (10)、(11)、(12) 即为单个校准件不理想时, 被测件 S 参数的误差表达式。可以看到, 被测件 S 参数的误差不仅与校准件偏差有关, 还同被测件的反射系数有关。当测量大的回波损耗器件时, 由于 S_{11A} 很小, 代入 (10) 式可以看出被测件的误差主要取决于校准件负载的偏差 dS_{M11} , 被测件的回波损耗越大, 校准件负载的偏差对测量结果的影响就越大; 由式 (11)、(12) 知, 开路器短路器的偏差对大回波损耗器件的测量影响较小。

2 试验与仿真

由于试验条件所限, 为了验证公式 (10), 我们利用 HFSS 仿真两个负载, 即用小反射系数和大反射系数的负载作为校准件, 测试 5GHz~15GHz 下, 单根金线的反射系数。电路结构如图 1 所示。要想测得单根金线的反射系数, 必须校准掉两边微带的影响。这里采用 SOLR 方法来校准。由公式 (10) 可知, 要计算出 dS_{11A} , 除了已知的 S_{11A} , S_{M11} , S_{O11} , S_{S11} , 还需知道 dS_{M11} 。

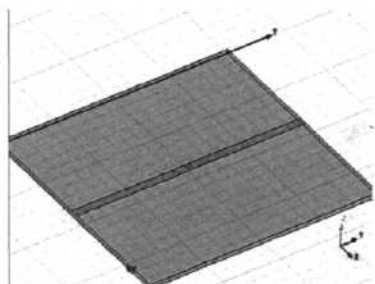


图 2 金丝与微带互联结构图

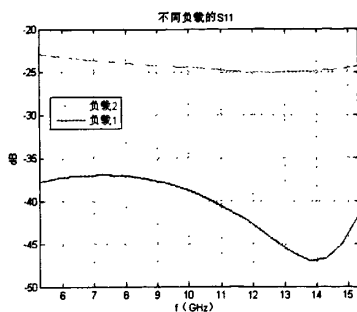


图3 不同负载的反射系数

这里 S_{11A} 为被测件的 S 参数 可由校准程序计算出来, S_{M11} , S_{O11} , S_{S11} 为理想的校准件反射系数, 也为已知量. dS_{M11} 为负载校准件的与理想负载值之间的偏差, 实际中很难仿真得到, 这里我采用仿真相对比的方法加以验证, 选用两个不同反射系数的负载, 两个负载的反射损坏如图 2 所示. 负载 1 性能指标高, 全部频带内反射损耗在 -36dB 以下, 以此作为标准. 用另一个负载 2 的校准值计算的 dS_{M11} 与作为标准值的负载 1 进行对比, 以此来验证算法的准确性.

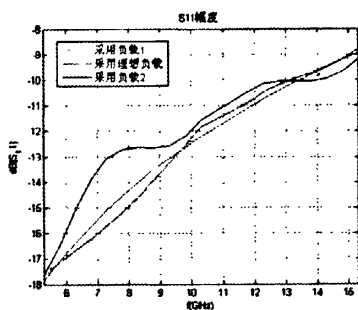


图4 不同负载下被测件反射系数

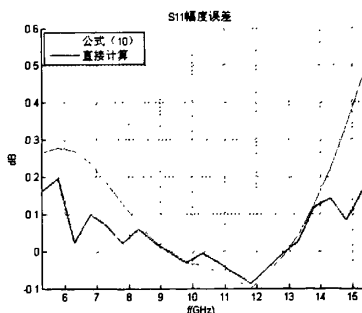


图5 被测件的反射系数偏差值

这里假设开路 and 短路校准件是理想的, 图 3 是不同负载下测得单个金丝的反射损耗值. 其中的理想负载为单独仿真金丝时的反射损耗. 由于负载的指标不同, 仿真计算的结果也不同. 比较而言, 小的反射系数的负载校准件仿真计算的结果与直接仿真单根金丝的更接近. 图 4 为在负载 2 作为校准件的情况下, 通过公式 (10) 计算的 dS_{11A} 与通过 SOLR 算法计算的 S_{11} 与直接仿真得到的 S_{11} 相减得到的 dS_{11A} 的对比图. 二者的曲线基本吻合, 这验证了公式 (10) 的正确.

3 结论

本文从网络分析仪单端口误差模型出发, 推导了 SOLR 校准法中校准件的不理想与测量结果的不确定度之间的关系. 最后结合仿真实验数据结果对这一结论加以分析验证.

参考文献

- [1] 王宏珍, 卜云平, 马迎春. 浅析矢量网络仪测量误差误差修正 [J]. 实用测试技术, 2001, 9 (5): 19-22
- [2] 刘岚, 聂丹. 微波网络分析仪系统误差辨析及 [J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26 (2): 73-79
- [3] ENA Series RF Network Analyzers Use's Guide [M]. Printed in Japan, 03/2004
- [4] Stumper U. Influence of TMSO Calibrati on Standards Uncertainties on VNA S parameter Measurements [J]. IEEE Trans on IM, 2003, 52 (2): 311-315
- [5] J. Stenarson and K. Yhland. Residual error models for the SOLT and SOLR VNA calibration algorithms [C]. 69th ARFTG Conf. Dig., Honolulu, HI, 2007, 133-139
- [6] U. Stumper. Uncertainties of VNA S-parameter measurements applying the TAN self-calibration method [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2007, 56(2): 597-600

陈涛 男, 1982 年生, 硕士. 主要研究方向: 微波电路, 微波检测

E-mail: fo925@163.com

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>