Multi-Channel Parallel Calibration Method Based on Domestic VNA

CAI Hongkun[1*], WU Qingbin[1], LI Shubiao[1,2], LÜ Guang'ao[1]
(1.Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao Shandong 266555, China;
2.Key Laboratory of Electronic Test & Measurement Technology, Qingdao Shandong 266555, China)

Abstract: The multi-channel calibration of vector network analyzer is usually very complicated, and it often needs to connect and measure one same calibration Standard several times, which wastes a lot of time and cost, and increases the wear and tear of Standards fitting joints. The multi-channel parallel calibration is realized, and the calibration procedure is simplified and the measurement efficiency is improved. The experimental results show that the proposed multi-channel parallel calibration method can greatly simplify the calibration and measurement steps, reduce the number of connection times of Standards, and greatly improve the efficiency of multi-channel calibration.

Key words: vector network analyzer; multi-channel calibration; error correction
EEACC: 7130; 7220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.013

基于国产矢量网络分析仪的多通道并行校准方法

蔡洪坤[1*], 武庆斌[1], 李树彪[1,2], 吕光奥[1]
(1.中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555; 2.电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要: 矢量网络分析仪的多通道校准通常是非常复杂的, 往往需要根据测量通道数对相同的校准标准进行多次连接和重复测量, 浪费了大量时间, 加重了标准件接头的损耗。基于国产矢量网络分析仪, 通过改进多通道校准的流程, 提出了多通道并行校准方法, 简化了校准步骤, 提高了测量效率。实验结果表明, 多通道并行校准方法能大幅简化校准测量步骤, 减少标准件连接次数, 大幅提高了多通道校准的效率。

关键词: 矢量网络分析仪; 多通道校准; 误差修正
中图分类号: TN06 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0799-06

随着微波毫米波测试技术和测试需求的发展变化, 矢量网络分析仪的测量功能也不断丰富。基于传统的 S 参数测试, 现代多功能矢量网络分析仪一般还具备增益压缩测量、混频器测量、互调失真测量、互调频谱测量、噪声系数测量等功能[1]。在多功能测试场景中, 测试工程师会希望使用一台矢量网络分析仪对某一被测件进行多个不同指标的测试, 比如在一些 TR 组件的测试中, 会希望同时测试被测件的增益、功率、噪声、变频等指标。这就需要用到矢量网络分析仪不同的测量功能。一般情况下, 不同的测量功能在各个相互独立的测量通道完成, 各通道的参数设置、校准和测量互不影响。

为提高测试精度, 在测试之前需要对测量通道进行校准, 消除测试系统误差。矢量网络分析仪的校准技术经过多年的发展, 校准理论逐渐完善, 校准方法不断丰富[2-8]。但随着应用领域的拓展, 新的技术问题也不断出现。在多通道的测试场景下, 传统的校准方式是串行化地对各通道进行依次校准, 这种方式会产生重复的校准步骤和校准件连接次数, 校准过程非常繁琐。本文根据多通道校准的特点, 提出了矢量网络分析仪多通道并行校准方法。在多通道校准场景下, 通过相同校准标准的合并执行, 最大化地减少了校准操作的步骤和校准件的连接次数。通过测量结果对比, 验证了该方法的易用性和结果的准确性。

1 多通道并行校准技术

矢量网络分析仪多通道测量场景中, 为提高测试精度需要对测量通道进行校准, 去除系统误差。传统多通道校准流程是串行的, 即各通道依次执行一次校准流程。

1.1 传统多通道串行校准流程

多通道校准过程中, 每个通道的校准流程基本相同。首先, 测试人员针对被测件类型选择校准件, 主要是根据被测件和连接线缆接头类型确定; 然后进行校准初始化, 生成各个校准标准的测量步骤; 初

收稿日期: 2024-01-31 **修改日期**: 2024-06-01

始化完成后即可进行校准测量,循环该通道中全部测量步骤,依次执行校准件连接和测量操作;所有标准测量完成后,进行校准计算,获取所有误差项的值;最后进行误差修正,将误差项的值代入误差修正公式,得到修正后的测量值。

常规 N 个通道的串行校准流程如图 1 所示。

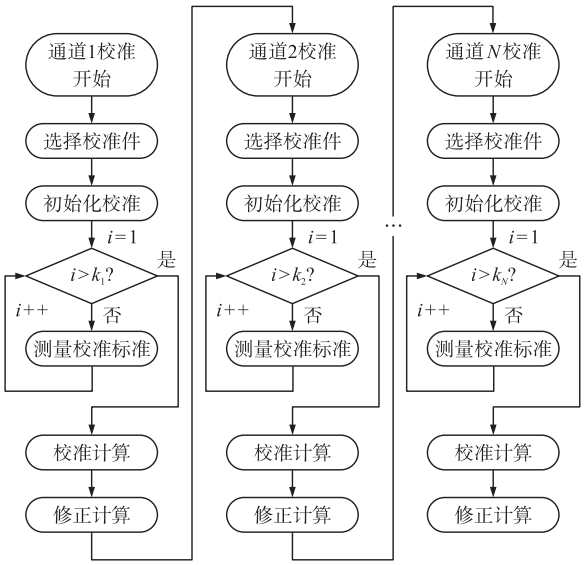


图 1 常规多通道串行校准流程

在校准时,选择校准件之后,校准标准的全集 U 也就确定下来。由于各通道应用的测量类型可以不同,校准测量过程可能会存在校准标准的数量和类型的不同。大部分情况下,各个通道测量的校准标准是 U 的其中一个子集。设各通道的校准标准集合为 S_i,i 为通道号。每个通道中测量校准标准所需的校准步骤数为 k_i(集合 S_i 中的标准个数)。那么 N 个通道所需要的校准测量步骤数为:

$$\mathrm{Num}=k_1+k_2+\cdots+k_N \tag{1}$$

在串行化校准过程中,不可避免地存在不同通道重复测量同一个校准标准的情况。每测量一个校准标准,测试人员就需要连接一次校准标准件并执行一次测量操作。重复的校准件连接和测量步骤,不仅会加重标准件接头的磨损,也导致了时间和人力成本的浪费。

1.2 多通道并行校准设计

根据多通道测试场景,本文改进了校准软件的设计流程。在选择校准件之后,首先循环初始化 N 个通道;然后将 N 个通道的所有校准步骤进行合并处理,得到 N 个通道校准标准的并集 S;再依次测量集合 S 中的校准标准;最后执行全部通道的校准计算和误差修正。

改进后的多通道校准流程图如图 2 所示。

其中,经过校准步骤合并处理之后,校准标准的

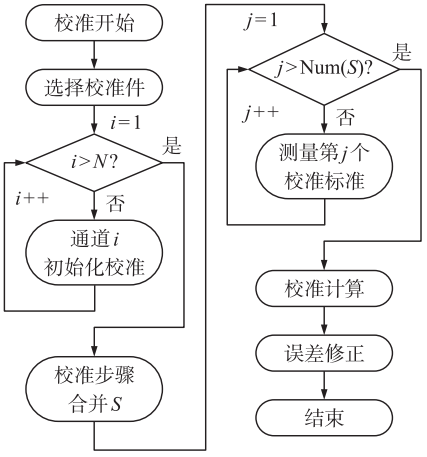


图 2 本文实现的多通道并行校准流程

集合 S 是 1.1 节中 N 个通道各自标准集合的并集:

$$S=S_1\cup S_2\cup\cdots S_N \tag{2}$$

根据并集的定义,$\mathrm{Num}(S)\leqslant k_1+k_2+\cdots+k_N$。在绝大多数测试场景下,要取得较好的校准效果,各通道都要测量大多数的校准标准,即在多通道串行校准流程中各通道的校准测量步骤约等于全集 U 的标准数,即 $k_i\approx \mathrm{Num}(S)$。那么多通道串行校准流程所需要进行的校准件连接次数和测量次数约为:$N\cdot\mathrm{Num}(S)$。与之相对比,多通道并行校准方法简化后的校准步骤数约为串行方法的 $1/N$。

本文提出的并行校准流程通过同一校准标准的合并处理,保证了测试人员不再需要重复测量相同的标准,大幅简化标准件的连接次数和标准测量操作。

2 软件实现

本文提出的改进的多通道校准软件基于某型国产矢量网络分析仪软件平台,该软件平台采用层次化、插件化架构设计,自底向上分为 I/O 驱动层、硬件控制层、应用程序层。软件架构如图 3 所示。

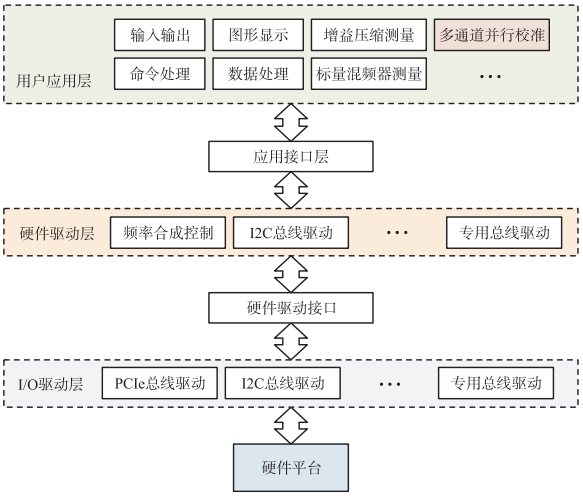


图 3 系统架构图

多通道并行校准软件作为独立插件位于矢量网络分析仪软件架构中的用户应用层。用户应用层包含输入输出、图形显示、数据处理等通用功能插件,也包含如增益压缩测量、标量混频器测量、互调失真测量等专用测量功能插件。多通道并行校准软件通过插件接口与其他通用插件、专用插件进行交互,完成误差项的获取与误差修正功能。

2.1　软件模块划分与设计实现

根据需求,多通道并行校准软件分为用户界面模块、校准配置模块、校准管理模块和校准计算模块四部分,软件模块划分如图 4 所示。

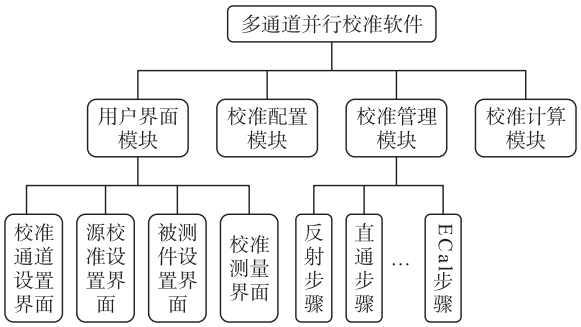


图 4　软件模块划分

其中用户界面模块提供给用户图形化软件接口,用来进行校准相关的设置、校准流程的执行控制和校准结果误差项的保存等;校准配置模块实现校准相关的设置功能,包括校准端口、被测件接头类型、校准件型号等的设置;校准管理模块负责校准步骤的初始化、合并、执行等功能,其中校准步骤根据配置不同,有反射测量步骤、直通测量步骤、电校准(ECal)步骤等;校准计算模块将不同测量步骤获取的测量数据,运用误差模型确定的计算公式得到具体的误差项。

为了更好兼容国产矢量网络分析仪软件平台,采用跨平台开发工具 Qt 和 C++开发了集成化的界面、业务逻辑和相关算法。软件设计采用多线程设计,耗时较长的校准测量过程运行于独立的子线程,保证了在执行校准测量过程中软件界面仍能快速响应用户操作。

2.2　软件实现效果

为了验证软件的实现效果,根据表 1 新建 3 个测试通道,并完成表中相关设置。

表 1　各通道设置

通道号	测量类	频率/GHz	端口号	点数	中频带宽/kHz
1	标准	1~2	1,2	51	1
2	标准	2~4	1,2	51	1
3	增益压缩测量	5~8	1,2	81	1

软件提供了集成化的用户界面用来进行校准通道选择、设置是否进行源功率校准、源校准设置、校准端口选择等设置功能和向导式的校准操作。操作软件界面进入多通道校准的首页,如图 5 所示。该页面显示了各通道的通道号、是否使能校准、测量类名称、是否开启源功率校准等信息,并且可操作界面执行校准端口的选择和源校准设置等操作。

点击各通道的源校准设置列中的“设置…”按钮进入源校准设置页面,如图 6 所示。在该页面可进行通道的端口功率、功率偏移、校准容差等设置。

点击图 5 中“下一步”按钮,进入被测件接头及校准件信息页面,如图 7 所示。在该页面选择被测件接头类型和校准件型号。

图 5　多通道并行校准向导界面

图 6　源校准设置页面

图 7 被测件接头及校准件信息页面

设置完成后,进入校准测量页面,如图 8 所示。校准测量页面显示图形和文本提示信息,测试人员根据提示依次进行各个校准标准的测量。

本文中的校准方法为使用最广泛的双端口 SOLT 校准,包括单端口反射(2 个端口的开路、短路、负载测量,共 6 步)和双端口反射传输(1 次直通测量),另外增益压缩测量还需要进行源功率校准。使用多通道串行校准方法,三个通道的校准总步骤为 22 步,其中通道 1 和通道 2 均需要执行 SOLT 校准的 7 步完成,通道 3 需要 8 步完成校准。

本文提出的多通道并行校准不需要将三个通道的 SOLT 校准的步骤重复执行 3 次,只需执行一次即可,校准总步骤数为 8,测量步骤得到大幅简化。

图 8 校准测量页面

3 测试结果分析

3.1 校准准确性分析

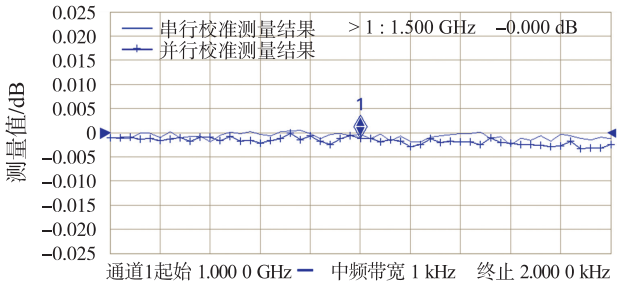
为验证本文实现的多通道并行校准方法的有效性,本小节对常规的 S 参数测量和增益压缩测量场景的多通道并行校准结果与常规的串行校准结果进行对比。测试用到的主要仪器设备包括矢量网络分析仪(3674E 10 MHz~26.5 GHz),3.5 mm 同轴校准件(31121),功率计探头(NRP67T),低噪声放大器(U7227C,100 MHz~26.5 GHz)。

为对比本文提出的多通道并行校准方法的校准效果,首先按照串行校准方法依次执行各个通道的校准,保存校准数据;然后在相同测试条件下执行多通道并行校准,保存校准数据;最后对二者校准结果进行对比。图 9 所示为测量结果对比,图 9(a)和图 9(b)所示分别为通道 1 和通道 2 在端口 1 连接开路器后的测试结果,图 9(c)所示为通道 3 端口 1 和端口 2 连接双阴插头直通件的测量结果。

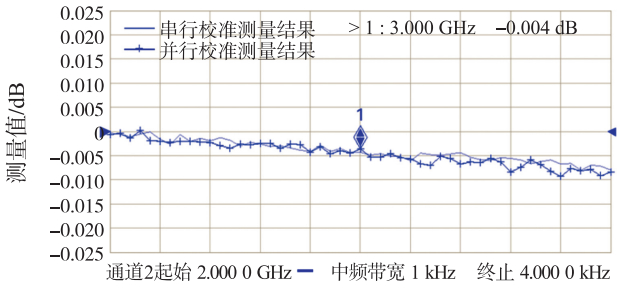
从图中可以看出,通道 1 和通道 2 连接开路器后 S_{11} 测试结果在±0.01 以内,校准精度满足测试需

求。通道 3 直通 S_{21} 测量结果在−0.07 dB 左右,与被测双阴转接头衰减值吻合。

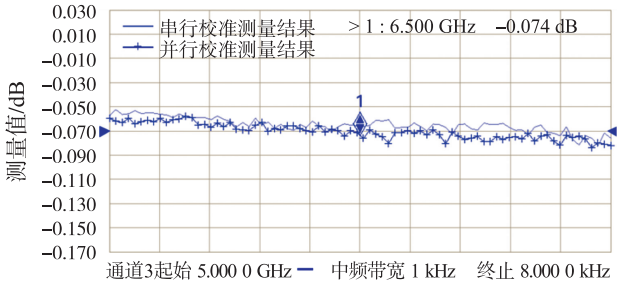
为进一步验证上述增益压缩测量校准结果,在端口 1 和端口 2 连接 U7227C 低噪声放大器,进行各参数的测量。图 10(a)所示为压缩点输出功率(CompOut21)测试结果,图 10(b)所示为压缩点增益(CompGain21)测试结果。



(a) 端口1连接开路器时通道1测试结果(S_{11}幅度)



(b) 端口1连接开路器时通道2测试结果(S_{11}幅度)



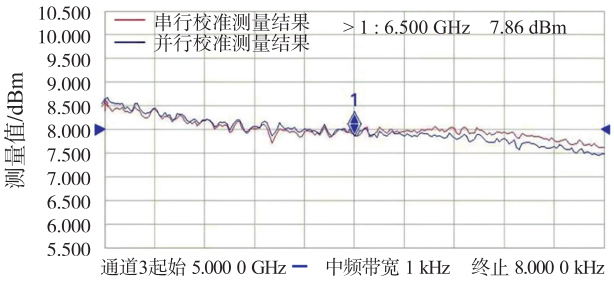
(c) 端口1和端口2直通时通道3测试结果(S_{21}幅度)

图 9　所提出校准方法串行校准与并行校准结果对比

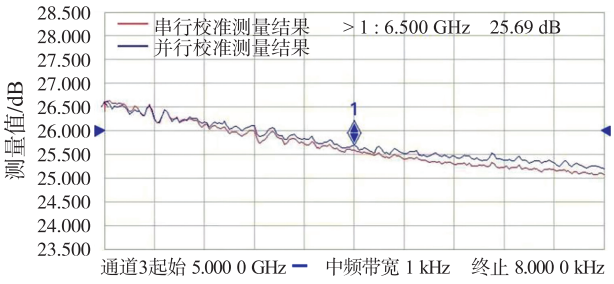
综上,多通道并行校准的校准结果与串行校准测量结果基本吻合,二者测试结果存在的较小的差异主要是由重复性造成,对测试不构成影响,可以忽略。本文提出的多通道并行校准方法,可以在简化校准操作流程的前提下保证校准的准确性。

3.2　校准流程简化效果对比

为验证并行多通道校准方法的校准流程简化效果,本节根据表 2 新建 12 个测试通道,每个测试通道设置为不同的测量类型。



(a) U7227C低噪声放大器压缩点输出功率测试结果



(b) U7227C低噪声放大器压缩点增益测试结果

图 10　所提出校准方法对 U7227C 低噪声放大器压缩点测量结果

表 2　各通道设置

通道号	测量类	校准端口
1	标准	1,2
2	增益压缩测量	1,2
3	互调失真测量	1,2
4	互调频谱测量	1,2
5	标量混频器测量	1,2
6	增益压缩测量(变频)	1,2
7	互调失真测量(变频)	1,2
8	互调频谱测量(变频)	1,2
9	噪声系数测量	1,2
10	噪声系数测量(变频)	1,2
11	频谱分析	1,2
12	差分 I/Q 测量	1,2

首先采用串行多通道校准方法,依次执行 12 个通道的校准流程测量步骤;然后使用多通道并行校准方法对 12 个通道进行校准。表 3 对比了两种方法所需的校准步骤和总的校准步骤数。

通过表 3 可知,在创建 12 个测量通道(涵盖某型国产矢量网络分析仪已支持全部的测量类型)的情景下,本文提出的多通道并行校准方法能够将传统串行校准方法的 93 步校准减少到 8 步,大幅简化校准步骤。

表 3 校准步骤对比

校准方法	校准步骤	步骤总数
多通道并行校准	端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量	8
多通道串行校准	标准测量:端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 增益压缩测量:端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 互调失真测量:端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 互调频谱测量:端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 标量混频器测量:端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 增益压缩测量(变频):端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 互调失真测量(变频):端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 互调频谱测量(变频):端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 噪声系数测量:端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 噪声系数测量(变频):端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 频谱分析:端口 1 的源功率校准测量、端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量 差分 I/Q 测量:端口 1 和端口 2 两个端口的开路、短路、负载测量、端口 1-端口 2 的直通测量	93

4 结论

本文首先介绍了矢量网络分析仪多通道测量的应用场景以及目前多通道校准存在的问题,介绍了矢量网络分析仪校准、误差修正原理及操作流程。通过改进传统的多通道串行校准方法,提出了基于国产矢量网络分析仪的多通道并行校准,介绍了并行校准方法的设计流程。最后,基于国产矢量网络分析的多通道并行校准软件通过实验验证,结果显示,该设计能在保证校准效果的前提下,简化校准操作步骤和校准件的连接次数,大幅提升了多通道校准的效率。

参考文献:

[1] 秦红波. 矢量网络分析仪校准技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.

[2] Dunsmore J P. Handbook of Microwave Component Measurements: with Advanced VNA Techniques [M]. New York,NY,USA:Wiley,2020:67-70,134-137.

[3] 叶荣芳,徐佳. SOLT 校准方法及其在射频测量中的应用[J]. 电子器件,2006,29(1):179-182.

[4] 孙静,刘晨,梁法国,等. 利用矢量网络分析仪单端口校准误差项提取二端口网络的 S 参数[J]. 计量学报,2021,42(11):1549-1503.

[5] 吴杰峰,吴绍精,谢晋雄. 射频器件测量的校准技术研究[J]. 无线通信技术,2022,31(3):40-45.

[6] 王一帮,吴爱华,刘晨,等. 一种对在片测量系统中串扰误差进行修正的新型校准方法[J]. 计量学报,2021,42(12):1553-1558.

[7] 赵苏宇,朱伟. 矢量网络分析仪反射测量误差分析与修正[J]. 电子测试,2021(7):68-70.

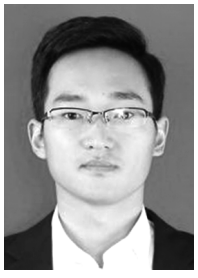
[8] 吴思燕. 浅谈矢量网络分析仪校准方法[J]. 中国新通信,2016,18(14):61-62.

[9] 方志坚,王力. 矢量网络分析仪误差模型分析与应用[J]. 电子质量,2007(6):9-10.

[10] 祝宁华,王幼林,陈振宇. 微波网络分析仪的校准[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2004,34(3):329-336.

[11] 宋翔,年夫顺. 基于矢量网络分析仪的混频器测试技术[J]. 电子测量技术,2011,34(11):113-117.

[12] Huton J K. Analysis of Microwave Measurement Techniques by Means of Signal Flow Graphs [J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques,1960,8(2):206-212.



蔡洪坤(1989—),山东德州人,工程师,硕士,毕业于重庆大学,现就职于中电科思仪科技股份有限公司微波仪器事业部,主要研究方向为矢量网络分析仪测试应用、校准算法,chk_8911@163.com。