

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.02.10

# 矢量网络分析仪单端口校准以及两端口校准测量柔性电缆方法探讨

严瑾, 蔡小宏, 王春林

(中国空间技术研究院西安分院 计量中心, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 介绍了矢量网络分析仪单端口校准方法以及两端口校准方法如何对柔性电缆进行测量, 从而来判断其是否满足技术指标要求, 并对两类校准方法以及各自优缺点、适用范围进行了分析比较。

**关键词:** 柔性电缆; 单端口校准方法; 两端口校准方法; 未知直通校准方法; 测量不确定度

中图分类号: TB971

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)02-0038-04

## Discussion on Measuring a Flexible Cable with 1-port Calibration Method and 2-port Calibration Method by Using Network Analyzer

YAN Jin, CAI Xiaohong, WANG Chunlin

(Xi'an Branch Measurement Center of China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** An introduction is given on measuring a flexible cable with 1-port calibration method and 2-port calibration method (unknown thru calibration method) by using network analyzer. The cable manual is referred to see if the values meet the specification. And then the characteristics and application of the two calibration methods are compared and analyzed.

**Key words:** flexible cable; 1-port calibration method; 2-port calibration method; unknown thru calibration method; measurement uncertainty

## 0 引言

随着微波有源、无源器件的测试对矢量网络分析仪测量精度的不断提高, 矢量网络分析仪及其附件的计量要求也不断提高。矢量网络分析仪测量结果的好坏与电缆以及校准件关系密切, 一个有问题的测试电缆可导致测试失败, 所以电缆性能的好坏直接关系到测试结果。使用矢量网络分析仪前对柔性电缆进行计量确认其性能是很重要且必要的, 但矢量网络分析仪相关检定规程中未涉及到柔性电缆的计量检定方法。本文介绍了经过多次实践的、可行的、精确的计量检定柔性电缆的方法, 并对不同方法进行了比较分析。

电缆或许是最简单的射频元件, 通常具有很低的损耗和很好的匹配。然而, 测量如此理想的器件还需要精密的校准和测量技术以使得测量中的误差不会掩

盖器件性能<sup>[1]</sup>。本文针对柔性电缆的回波损耗和插入损耗参数, 分别介绍单端口校准和两端口校准方法如何精确测量矢量网络电缆参数, 并将两种校准方法进行比较, 以根据不同的测试条件选择合适的校准方法。

## 1 单端口校准测量矢量网络柔性电缆方法

### 1.1 柔性电缆回波损耗的测量方法

首先在网络分析仪的任意一个端口上执行一个单端口(如 Port1)校准, 校准前选择合适的中频带宽(如 IF Bandwidth = 100Hz)、合适的扫描点数, 校准时可选用机械校准件或电子校准件。当选用机械校准件时, 首先选择校准类型为单端口反射校准, 然后选用正确的校准件接口类型, 分别对端口接入开路器、短路器以及宽带负载进行单端口校准<sup>[2]</sup>。当选用电子校准件时, 仅需将电子校准件接入该单端口, 同样选择校准类型后, 对该单端口进行校准即可。校准完毕后, 将被测电缆一端连接至该单端口, 并且在电缆的另一端连接校准盒中的一个宽带负载, 如图 1 所示, 这时在网络分析仪上选择对数(dB)显示格式, 则其显示的轨

收稿日期: 2014-11-04; 修回日期: 2014-12-21

作者简介: 严瑾(1983-), 女, 工程师, 工程硕士, 主要从事无线电参数的计量检定以及相关领域的研究工作。

迹即为该电缆的回波损耗。应用矢量网络分析仪的 Marker Search 功能, 选择轨迹中的最大点, 该点即为电缆回波损耗的最差情况, 将其与对应型号电缆的回波损耗指标相比较, 看其是否满足指标要求。

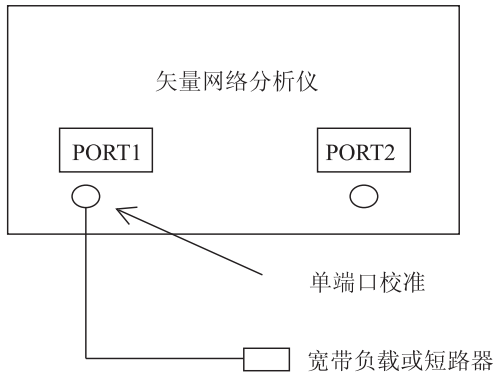


图1 单端口校准方法框图

### 1.2 柔性电缆插入损耗的测量方法

该被测电缆仍然连接至端口 1, 取下宽带负载, 连接校准盒中的一个短路器到电缆端口另一端, 如图 1 所示。应用矢量网络分析仪中的 Marker Search 功能, 选择轨迹中的最小点, 该点值此时为 2 倍的电缆实际的插入损耗, 要得到该点插入损耗的真实值则对轨迹中该最小点的值除以 2 即可。将此值与电缆插入损耗指标相比较, 看是否满足指标要求。以美国 Agilent 公司(现名为 Keysight 公司)矢网柔性电缆为例, 其电缆插入损耗指标, 一般情况下为与频率相关的一维函数, 测试人员可以根据其频率范围选取不同的频率点, 应用以上方法将各频点的插入损耗值与指标值进行比较, 以判断电缆性能的好坏。应用短路器测量插入损耗的单端口校准方法的理论模型见图 2。

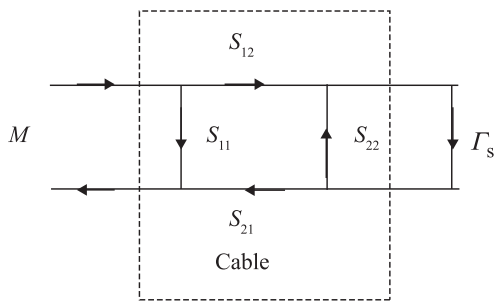


图2 单端口校准方法理论模型

在理想情况下, 不考虑电缆匹配不理想而引入的参数  $S_{11}, S_{22}$ ;  $M$  为矢网端口 1 的反射系数,  $\Gamma_s$  为被测件的反射系数, 这里被测件为短路器, 所以  $\Gamma_s = -1$ ,  $S_{21}, S_{12}$  为被测电缆的正向、反向传输参数, 则上述测量插入损耗的理论推导为

$$M = S_{21}S_{12}\Gamma_s \quad (1)$$

电缆为互易器件, 并且认为短路器性能理想, 则

$$|M| = |S_{21}^2| \quad (2)$$

将插入损耗转变为 dB 格式, 则

$$IL = -20\log_{10}|S_{21}| = -20\log_{10}\sqrt{|M|} = \frac{RL}{2} \quad (3)$$

其中  $IL$  为插入损耗,  $RL$  为回波损耗。

由以上推导可以看出应用短路器的单端口校准方法测量电缆插入损耗时, 其值为回波损耗值的一半。

### 1.3 单端口校准方法的不确定度评估

在实际中, 如图 2 所示, 需要考虑匹配不理想时, 由电缆每个端口的反射而引入的参数  $S_{11}, S_{22}$ ; 这时矢网端口 1 的反射系数

$$M = S_{11} + \frac{\Gamma_s S_{21} S_{12}}{1 - \Gamma_s S_{22}} \quad (4)$$

电缆为互易器件, 并且认为短路器性能理想, 则

$$M = S_{11} - \frac{S_{21}^2}{1 + S_{22}} \quad (5)$$

$$|S_{21}| \approx \sqrt{|(S_{11} - M)(1 + S_{22})|} \quad (6)$$

从式(6)可以看出电缆两个端口的反射均影响了插入损耗的测量结果, 为评估电缆反射的影响<sup>[3]</sup>, 我们应用 GUM 的方法进行不确定度分析, 忽略相位进行标量计算, 式(6)中代入  $|M| = |S_{21}^2|$ , 则合成标准不确定度为

$$\begin{aligned} u_{S_{21}}^2 &= \left[ \frac{\partial S_{21}}{\partial S_{11}} u_{S_{11}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial S_{21}}{\partial S_{22}} u_{S_{22}} \right]^2 \\ &\approx \left[ \frac{1 + S_{22}}{2S_{21}} u_{S_{11}} \right]^2 + \left[ \frac{S_{11} - S_{21}^2}{2S_{21}} u_{S_{22}} \right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

当包含因子  $k=2$  时, 扩展不确定度为

$$U_{S_{21}} = 2u_{S_{21}} \quad (8)$$

将测量值或电缆指标值代入式(7), 方可得到不同状态下电缆单端口校准方法的插入损耗的测量不确定度。其值可为我们分析测量的分散性提供依据。

单端口校准方法在电缆一端连接一个短路器, 同样可以对电缆的幅度和相位稳定性指标进行核验, 这里不仔细讨论了。

## 2 两端口校准测量矢网柔性电缆方法

### 2.1 两端口校准方法的原理

两端口校准的测量方法原理实际是应用了未知直通(Unknown Thru)校准方法, 它是一种比较通用且好用的校准方法。不管使用的是什么类型的校准套件, 最好的校准方法几乎总是 SOLR 或者称为未知直通校

准<sup>[4]</sup>，除非待测器件是一个可插入器件，也就是说具有同种类型的阳性接头和阴性接头。

首先，对于低损耗器件的系统设置而言，最好使用中等 IF 带宽和多次扫描取平均功能来减少迹线噪声，因为即使少量的迹线噪声也会有重大影响<sup>[5]</sup>。一般认为将 IF 带宽调至很窄的数值会减少噪声，但这样做会增加扫描时间，而很慢的扫描会导致系统校准不稳定，这是由于在较长扫描时间中可能出现的系统漂移引起的。所以最好使用中等 IF 带宽，并适当应用多次扫描取平均功能<sup>[6]</sup>。

## 2.2 两端口校准测量电缆的具体方法

如图 3 所示，它应用的是一种未知直通校准方法，校准完成后可以同时同时对电缆回波损耗及插入损耗的测量。首先在矢量网络分析仪的校准向导中正确选择被测件(DUT)两端的接口类型，其次在定义校准时，改变校准方法与校准标准时选择未知直通的校准方式，即可进行未知直通的校准。依据校准向导第一步，对端口 1 做一个单端口的校准(其中不接入任何的电缆)；第二步，对端口 2 做一个单端口的校准(其中不接入任何的电缆)；第三步，在端口 1 与端口 2 之间接入未知直通。这个未知直通可以就是被测电缆本身，这时校准向导提示会对该未知直通进行测量，确定出该未知直通的电时延，其值通过矢网前面板显示出来，存储校准结果，校准结束。这里既可使用机械校准件也可使用电子校准件进行校准。当未知直通选择为被测电缆本身时不用变换连接，选择测量  $S_{11}$ ， $S_{22}$ ， $S_{21}$ ， $S_{12}$  来直接确定电缆的回波损耗与插入损耗，并将其值与给定的指标做比较来判断其是否合格。

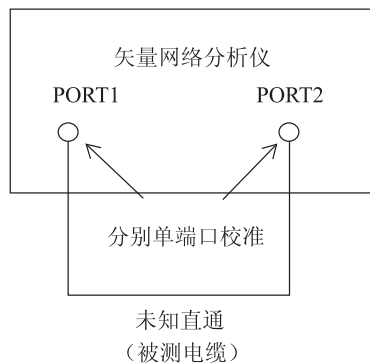


图 3 两端口校准方法框图

## 2.3 未知直通校准的特殊要求

这里对未知直通校准的一些特殊要求与注意事项进行说明：

1) 作为未知直通的校准标准其性能必须是互易的，

即  $S_{21} = S_{12}$ ；

2) 作为未知直通的校准标准其差损应该小于 40 dB；

3) 作为未知直通的校准标准其相位响应必须在四分之一波长内；

4) 矢网的每个测试端口的(方向性、源匹配、反射跟踪)系统误差能够被完全描述(对于两端口矢网共 6 项误差)；

5) 矢网的信号通道开关误差能够被量化<sup>[7]</sup>。

## 2.4 两端口校准方法的不确定度评估

由于两端口未知直通的校准方法其误差模型较为复杂，涉及的 S 参数多，所以其插入损耗的测量不确定度计算公式相当复杂<sup>[8]</sup>，这里不做详细介绍了。现在一些仪器公司(例如：Agilent 公司)网站上都可以下载相应的不确定度计算软件，代入使用状态，即可计算出两端口校准或其他应用状态下的测量不确定度数值。较直接建立模型计算，该计算软件更方便简洁。

## 3 单端口校准及两端口校准测量方法的比较

### 3.1 两种校准方法的补充

单端口校准测量矢网柔性电缆的方法易操作，步骤简单，能够快速判断电缆回波损耗、插入损耗以及幅度、相位稳定性指标是否满足要求。但这种方法的准确性取决于校准盒中的宽带负载以及短路器的性能，而且电缆两个端口的匹配性能也直接影响其测量准确度<sup>[9]</sup>。特别是在低频部分，单端口校准方法测量插入损耗的测量不确定度较大，会使测量结果超出指标要求而造成误判，所以这里提出两种在使用单端口校准方法测插损时改进测量准确度的方法。第一种：在电缆端接入短路器 Short，并且加入时域门来改善插损测量结果。第二种：在测试的单端口(如 PORT1)接入宽带负载，将其数值 Data 赋给 Memory，然后接入短路器 Short 后，应用矢网 Data-Memory 的功能进行计算，将此时接入短路器的插损值(Data)减去接入负载时的插损值(Memory)，这样就去除了纹波对插损值测量的影响，使测得的柔性电缆的插损值更准确。

而两端口校准测量方法是基于未知直通校准的方法。当不能使用零长度校准(Flush Thru)或使用一个零长度校准会导致测量损伤时，可以选用未知直通的校准方法，它实际上是一个精炼的 SOLT(Short-open-load-thru)校准方法，又被称为 SOLR(Short-open-load-reciprocal-thru)校准方法。使用未知直通的校准方法可以改善因测试时需对电缆进行移动而对校准以及测量结果造成的影响，并改善转接头对测量结果的影响。这种方

法不仅可应用于测量矢网柔性电缆,还可应用于非插入器件、机械连接复杂的情况以及多端口器件测量等,是一个实际应用很广的校准方法<sup>[1]</sup>。

### 3.2 两种校准方法测量结果实例

分别使用单端口校准方法及两端口校准方法对 Agilent 公司矢网柔性电缆 85133F 进行插入损耗测量,将其测量结果应用 Matlab 软件画图比较,如图 4 所示,其中电缆 85133F 插入损耗的指标要求为小于等于  $(0.1 + 0.38\sqrt{f} + 0.017f)$  dB,可以计算得出两组值均满足电缆指标要求。由此可以看出两种方法均能满足柔性电缆计量的要求,我们可以根据实际情况来选择方法。

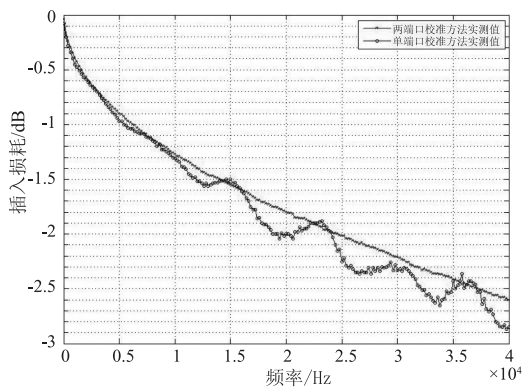


图4 单端口校准及两端口校准插入损耗实测值比较

### 3.3 两种校准方法的优缺点

在实际应用中,单端口校准方法与两端口校准方法各有优缺点,分别能够满足不同场合的应用。

单端口校准方法在工程上由于校准步骤简单、使用起来比较简便,只用进行一个端口的校准就可以进行包括反射、传输及幅度、相位稳定性等的测量,因此具有一定优势。该方法比较适合被测件反射相对较小而插损较大的情况,例如测量衰减器就可应用该方法。工程上有时会遇到被测电缆的两端不便接入矢网的两个测试端口而无法进行两端口校准的情况,例如埋入地下 200 m 长的电缆,这时应用单端口校准方法可以很好地对此类电缆进行测试。但其测量精度受电缆自身端口匹配以及校准件中负载、短路器特性的影响,与两端口校准方法相比成为其缺点,但可以通过采用加入时域门的方法以及数据处理去除纹波的影响来增加单端口校准的测量精度。

两端口校准方法为基于未知直通校准的方法。未知直通校准方法与单端口校准方法相比增加了校准操作步骤,使校准过程复杂度有所提高,但这种校准方法由于不要求通路标准件已知,因此在应用中大大提高了校准的灵活性,而且通过使用大量的通路器件可以极大简化

复杂的校准任务。但该方法作为未知直通的校准标准其插损应小于 40 dB,否则噪声效应会降低测量的准确性,因此不适合在测衰减器时直接使用衰减量大的衰减器作为未知直通。但应用该校准方法选用被测电缆(一般插损只有几个 dB)作为未知直通来测其插入损耗,完全能够满足以上要求,且应用该方法测量矢网电缆可以避免转接头对测量结果的影响,并且两端口的校准可使矢量误差得到更好修正,匹配特性也更好,这是其优势所在。两端口未知直通的校准方法还有许多适合使用的情况,比如非插入式同轴校准、在片校准、固定端口校准、开关路径校准等。在这些情况下,选择好通路标准件就可以极大地简化复杂的校准任务。

综上所述,在对矢网柔性电缆进行测试计量时,单端口校准方法、两端口校准方法均可满足测试要求。单端口校准方法操作简单、校准连接次数少,对于不能同时接入矢网两个端口的电缆是一种很好的解决方法。两端口校准方法,校准结果更精确,对矢量误差的修正更好,能改善其匹配特性,从而使测量结果更准确,但相比单端口校准增加了校准步骤与操作程序。

## 4 结束语

以上两种校准方法各有优点,我们可以根据实际情况以及测试条件来选择合适的校准方法测量矢网柔性电缆等被测件。本研究为判定矢网柔性电缆是否满足技术指标的要求提出了测量方法的指导,从而保证测试工程师使用性能满足指标要求的电缆,使应用矢量网络分析仪测量得到的数据更加准确、可靠。

### 参考文献

- [1] Joel P. Dunsmore. 微波器件测量手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [2] 刘冬冬. 矢量网络分析仪校准项目探讨[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(3): 52-53.
- [3] Ken Wong. Uncertainty Analysis of the Weighted Least Squares VNA Calibration[C]//64th ARIFG Conference, 2005: 23-31.
- [4] 王琦. 现代矢量网络分析仪的校准与测量[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(2): 31-34.
- [5] 汤世贤. 微波测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [6] 王志田. 无线电电子学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [7] 李健一, 刘冬冬. 基于网络分析仪的不可插入器件测试方法研究[J]. 计量与测试技术, 2010, 37(5): 40-41.
- [8] 陈婷, 杨春涛, 陈云梅, 张国华. 校准件不完善对矢量网络分析仪单端口 S 参数测量引入的不确定度[J]. 计量学报, 2009, 30(2): 177-182.
- [9] 谷歆海. 网络分析仪的工作原理及在测量领域的应用[J]. 测控技术, 2008, 34(7): 15-18.