

HD 波导校准套件使用说明书

一、 概述

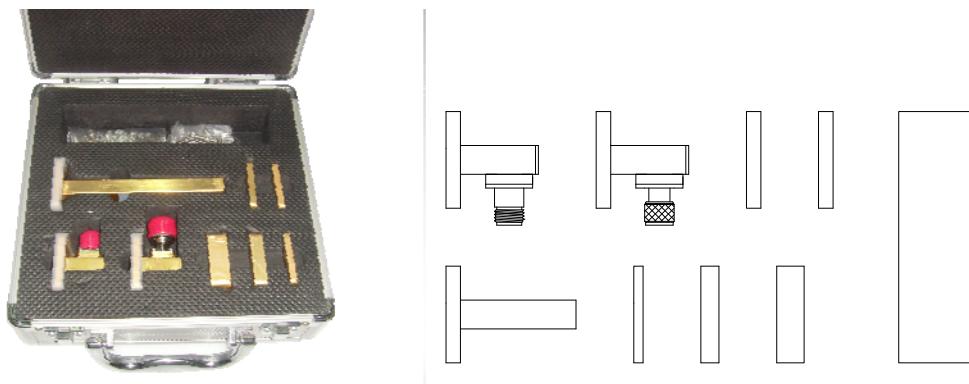
西安恒达微波技术开发公司

该标准套件主要用于矢量网络分析仪的波导校准。工作步骤参考工作于 40 MHz~ 40 GHz 的 Anritsu 37369A 型矢量网络分析仪。

该波导校准套件箱包含了 VNA 测量波导件时 12 项误差修正所需要的所有精密波导校元件，保证测量结果的精确可信。

二、 HD 波导校准套件箱

2.1、该波导校准套件提供的校准所需的精密元器件和相应的工具下图 所示。



2.2、【每套精密波导校准件包含元件清单】:

序号	产品名称	主要参数	数量
1	波导同轴转换	J、K各一只	2
2	波导小反射匹配负载	VSWR≤1.03	1
3	波导短路器(固定)	VSWR≥60	2
4	1/4λ 精密波导段	L=1/4 波长	1
5	1/8λ 精密波导段	L=1/8 波长	1
6	3/8λ 精密波导段	L=3/8 波长	1
7	铝合金包装箱		1
8	连接螺钉		1 套

三、校准原理

3.1 校准技术的选择

现在的许多矢量网络分析仪(VNA)都具有极强的处理能力和灵活性并且提供了更多的校准方法供用户选择，主要有：SOLT（短路—开路—负载—直通）、TRL（直通—反射—传输线）方法。SOLT 校准操作方便、能够提供优异的精度和可重复性。这种校准方法要求使用短路、开路和负载标准校准件，测量准确度跟标准件的精度密切相关，一般只适合于同轴环境测量。在要求高精度且可用标准校准件与被测件的连接类型不同的情况下，一般采用 TRL (Thru, Reflect, Line)校准，TRL 校准是准确度比 SOLT 校准更精确的校准方式，尤其适合于非同轴环境测量，其标准件不需要像 SOLT 标准件那样进行完整或精确的定义，校准的精度只是跟 TRL 标准件的质量，重复性部分相关，而不是完全由标准件决定，制造和表征三个 TRL 标准件比制造和表征四个 SOLT 标准件更容易。故用于非同轴的波导校准只能采用比 SOLT 校准准确的多的 TRL 校准技术。

3.2 用 TRL 方法校准 12 项误差模型

通常测量系统可以简化为图 2 所示的 3 个网络相级联，其包含 12 项系统误差模型所对应的信号流图如 3 所示，其中被测件的正向有 6 项，反向有 6 项。图 3 显示了正向误差项：E11 (方向)、E22 (源匹配)、ER (负载匹配)、E12 (反射跟踪)、ET (传输跟踪) 和 EX (串扰)。R，A，B 分别代表网络分析仪参考端口，A 通道及 B 通道的信号，RFin 是信号源的输出。假设校准网络 A 是互易的，则有 $E12 = E21$ 。

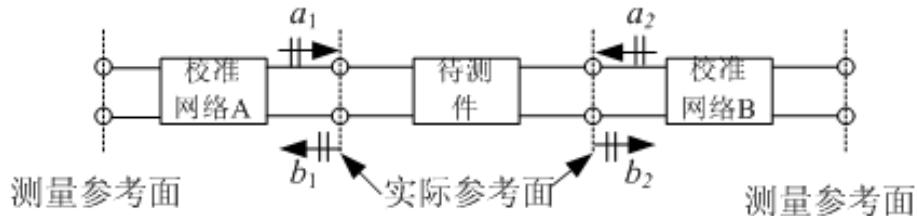


图 2 两端口网络 S 参量测试系统框图

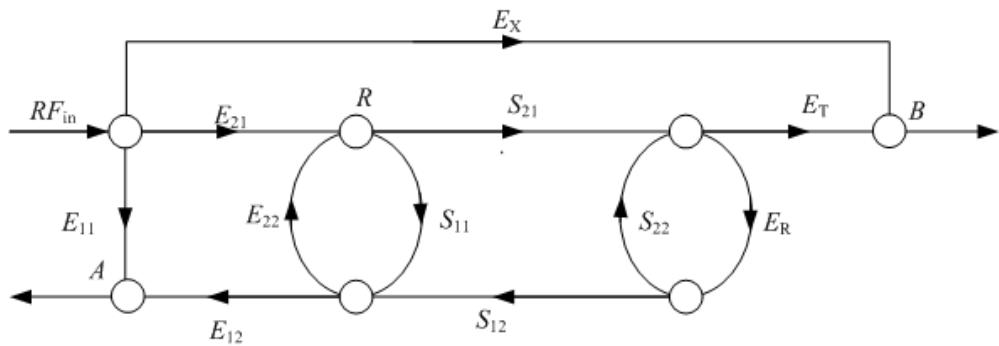


图 3 使用 12 项误差模型描述 S 参量测试系统的系统误差。(此处为正向误差，反向误差的模型与之类似)

当采用直通-反射-传输线校准方法时，三种连接方式所对应的信号流图分别如图4 (a) 、 (b) 、 (c) 所示，对于直通状态是指将两测试端口直接接通，故 $S_{11}=S_{22}=0$ ， $S_{21}=S_{12}=1$ ，则

$$R_T = \frac{E_{12}}{1 - E_{22}E_R} \quad (1)$$

$$A_T = E_{11} + \frac{E_{12}^2}{1 - E_{22}E_R} E_R \quad (2)$$

$$B_T = E_X + E_T \frac{E_{12}^2}{1 - E_{22}E_R} \quad (3)$$

对于反射状态，是指将两端口都接同样的大反射负载（如短路），设两者的反射系数都为 Γ ，且两端口之间无直接传输信号，故 $S_{11}=S_{22}=\Gamma$ ， $S_{21}=S_{12}=0$ ，则

$$R_R = \frac{E_{12}}{1 - E_{22}\Gamma} \quad (4)$$

$$A_R = E_{11} + \frac{E_{12}^2\Gamma}{1 - E_{22}\Gamma} \quad (5)$$

$$B_R = E_X \quad (6)$$

对于传输线状态，即在两端口之间接一根特性阻抗与校准网络相同的电长度为 l 的标准空气线段，故 $S_{11}=S_{22}=0$ ， $S_{21}=S_{12}=e^{-i\beta l}$ ，则

$$R_L = \frac{E_{12}}{1 - E_{22}E_R e^{-j2\beta l}} \quad (7)$$

$$A_L = E_{11} + \frac{E_{12}^2 E_R e^{-i\beta l}}{1 - E_{22}E_R e^{-i\beta l}} \quad (8)$$

$$B_L = E_X + E_T e^{-j2\beta l} \frac{E_{12}^2}{1 - E_{22}E_R e^{-j2\beta l}} \quad (9)$$

根据以上校准过程中得到的 9 个方程，可以解出 E_{11} （方向）、 E_{22} （源匹配）、 E_R （负载匹配）、 E_{12} （反射跟踪）、 E_T （发射跟踪）和 E_X （串扰）以及反射系数 Γ 以及传输线参数 $e^{-i\beta l}$ 。

同样反向误差模型的相应误差参数也可通过同样的方法确定。

现代自动网络分析仪的扫频测量系统会在所设定的测量频带内，采样不同频点所对应的误差模型参数并作存贮，通过相应的程序自动计算出待测元件的准确 S 参量。

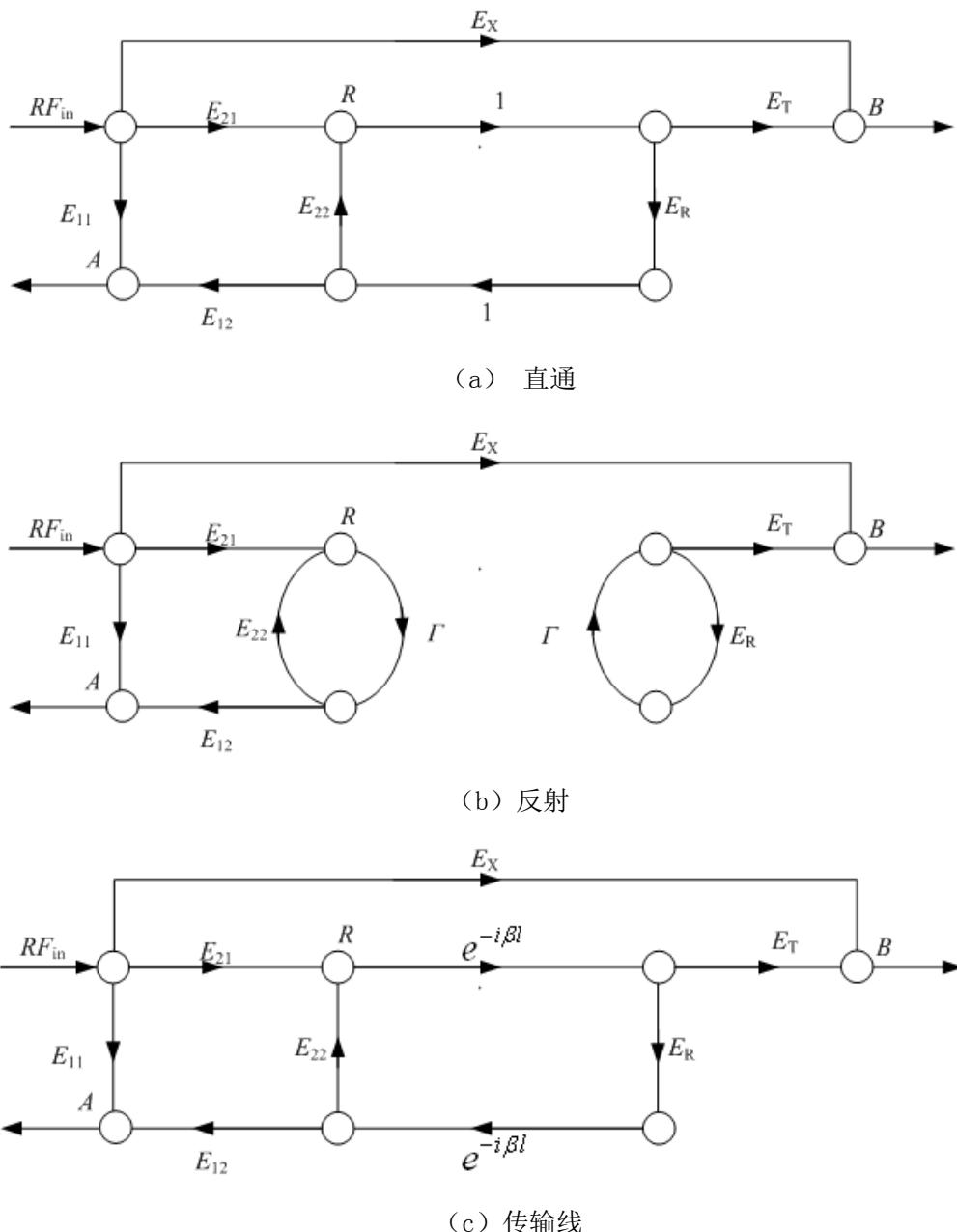


图 4 直通-反射-传输线校准方法的信号流图

四、校准步骤

采用 Anritsu 使用指南中提供的短路偏置校准程序来完成 TRL 校准，短路偏置校准是波校准的标准技术，其使用偏置短路和直接短路来对波导测量系统的固有误差进行区分。这些误差包括由连接器引起的误差以及诸如射频 (RF) 泄露、中频 (IF) 泄露和元件相互耦合所导致的系统固有误差。

具体校准步骤：

第一步：

按下面板上 “Begin Cal” 键。

第二步：

在菜单 C11 中选择 “CHANGE CAL METHOD AND LINE TYPE” 。

MENU C11
BEGIN CALIBRATION
KEEP EXISTING CAL DATA
REPEAT PREVIOUS CAL
AUTOCAL
CAL METHOD
Xxxxxxx
TRANSMISSION LINE TYPE:
Xxxxxxx
CHANGE CAL METHOD AND LINE TYPE
NEXT CAL STEP
PRESS <ENTER> TO SELECT

第三步：

当菜单 C11A 出现时，按照下面的说明移动游标：

- OFFSET SHORT, 然后按下“Enter”，选择短路偏置作为校准方法。
- WAVEGUIDE,然后按下“Enter”，屏幕上将会开出现菜单 C5。
- NEXT CAL STEP, 然后按下“Enter”，屏幕显示将回到菜单 C11。

MENU C11A
CHANGE CAL METHOD AND
LINE TYPE
NEXT CAL STEP
CAL METHOD
STANDARD(NOT USED FOR WAVEGUID)
OFFSET SHORT
LRL/LRM
TRANSMISSION LINE TYPE
COAXIAL
WAVE GUIDE
MICROSTRIP
PRESS <ENTER> TO SELECT

MENU C5
SELCT CALIBRATION TYPE
FULL 12-TERM
1 PATH
2 PORT
TRANSMISSION FREQUENCY RESPONSE
REFLECTION ONLY
PRESS <ENTER> TO SELECT

第四步：

当菜单 C11 重新出现时，确认 OFFSET SHORT 校准方法和 WAVEGUIDE 传输线类型已经正确选择。选择 NEXT CAL STEP 并按下“Enter”继续。

第五步：

菜单 C5 出现后，可以选择校准类型，比如将游标指向 FULL 12-TERM 并且按下“Enter”键确认。

第六步：

菜单 C5D 出现将使您能够选择校准是否包括测量通道之间的泄露误差项。对一个常规的校准，您需要选择这些误差项。因此，将游标移至 INCLUDE ISOLATION (STANDARD) 并且按下“Enter”键确认。

MENU C5D
SELCT USE OF ISOLATION IN CALIBRATION
INCLUDE ISOLATION (STANDARD)
EXCLUDE ISOLATION
PRESS <ENTER> TO SELECT

第七步：

菜单 C1 将使您能够选择在校准过程中测试中的频点数。例如可以选择 NORMAL(1601 POINTS MAXIMUM)。

MENU C1
SELCT CALIBRATION DATA POINTS
NORMAL (1601 POINTS MAXIMUM)
C.W.(POINT)
N-DISCRETE FREQUENCIES(2 TO 1601 POINTS)
TIME DOMAIN (HARMONIC)
PRESS <ENTER> TO SELECT

第八步：

接下来的菜单 C2 使您能够选择校准的起止频率。例如，可将游标指向 START，在键盘上按下 40，并且按下 MHz 键，同样你可将游标指向 STOP，选择终止频率为 20 GHz。设定测量频段后，选择 NEXT CAL STEP，并且按下“Enter”键确认。

MENU C2
FREQ RANGE OF CALIBRATION
START
0.0400000000GHz
START
20.00000000GHz
201 DATA PTS
0.99800000 GHz
STEP SIZE

MAXIMUM NUMBER OF DATA POINTS
1601 MAX PTS
801 MAX PTS
401 MAX PTS
201 MAX PTS
101 MAX PTS
51 MAX PTS
NEXT CAL STEP
PRESS <ENTER> TO SELECT

第九步：

当菜单 C3B 出现时，如果您想修改以蓝色字母显示的任何参数的话，可将游标移至该参数上并按下“Enter”键确认，例如想修改波导参数可以将游标移至 WAVEGUIDE PARAMETERS 并按下“Enter”键确认。

MENU C3B
CONFIRM CALIBRATION PARAMETERS
LOAD TYPE BRAODBAND
THROUGH LINE PARAMETERS
WAVEGUIDE PARAMETERS:
XXXXXXX
TEST SIGNALS
START CAL
PRESS <ENTER> TO SELECT

第十步：

当菜单 C15 出现后，将游标移至两个待选项并且按下“Enter”键确认，两个待选项如下所示：

- USE INSTALLEDWAVEGUIDE KIT : 选择此项后将使用以蓝色显示的 IDENTIFIER, CUTOFF FREQ, SHORT1, SHOTR2。
- USE DEFINED: 选择此项将出现菜单 C15A，这将使您能够自定义波导参数。在您定义好波导参数后，将回到菜单 C3B。

MENU C15
SELECT WAVEGUIDE KIT TO USE
-INSTALLED KIT-
IDENTIFIER
XXXX
CUTOFF FREQ
XX.XXXXXXXXXX GHz
SHORT 1
XX.XXXX mm
SHORT 2
XX.XXXX mm

USE INSTALLAEDWAVEGUIDE KIT
USE DEFINED

MENU C15A
ENTER WAVEGUIDE PARAMETERS
WAVEGUID CUTOFF FREQ
XX.XXXXXXXXXX GHz
OFFSET LENGTH SHORT 1
XX.XXXX mm
OFFSET LENGTH SHORT 2
XX.XXXX mm
PRESS <ENTER> WHEN COMPLETE

第十一步：

按照仪器的提示分别接入适当的隔离器、宽带负载、短路器和直通线以继续校准过程。

Anritsu (安利) 简化操作步骤

第一步：网络分析仪开机后，点击 **Begin Cal** 按键；

第二步：选择 **CHANGE CAL METHOD AND LINE TYPE** 中的 **LRL/LRM** 方式和 **WAVEGUIDE** 方式（按 **ENTER** 选择后 **LRL/LRM** 和 **WAVEGUIDE** 颜色变红）；

第三步：按 **ENTER** 确定 **NEXT CAL STEP**，后再按 **ENTER** 选择 **EXCLUDE ISOLATION**；

第四步：按 **ENTER** 确认 **NORMAL (1601 POINTS MAX/MUM)**，再输入 **START ** GHz**, **STOP ** GHz** 及按 **ENTER** 确认 **401 MAX PTS**；

第五步：按 **ENTER** 确认后，选择确认 **LRL/LRM PARAMTERS**，随后再按 **ENTER** 确认 **ONE BAND** 和 **MIDDLE OF LINE/ (REF)** 两种状态；

第六步：在 **DEVICE 1 LINE 1 (REF)** 中输入 **0 mm**，而在 **DEVICE 2 LINE/MATCH** 中输入所对应校准件 **1/4** 波长直通校准的长度（见附表）；

第七步：完成第六步后，按 **ENTER** 选择 **NEXT CAL STEP** 来确认 **REFLECTION OF FSET LENGTH** 中为 **0 mm**，和按 **ENTER** 确认 **LESS THAN Z0**。

第八步：完成第七步后，按下 **NEXT CAL STEP** 选项，选择 **WAVEGUIDE CUTOFF FREQ** 并输入波导校准件的截止频率（见附表），然后选择 **START CAL**；

第九步：将 **PORT 1** 和 **PORT 2** 的端口直通连接，点击测试；

第十步：将 **PORT 1** 和 **PORT 2** 的端口之间连接 **1/4** 波长的直通校准件，并点击测试；

第十一步：将 **PORT 1** 连接短路片，点击测试；

第十二步：将 **PORT 2** 连接短路片，点击测试，即完成校准。

参数附表

波导类型	频率范围	截止频率	1/4 波长长度 (mm)
BJ32	2.6~3.95	2.077904	30.429
BJ40	3.3~4.9	2.57693	24.079
BJ48	3.95~5.85	3.152537	20.498
BJ58	4.90~7.05	3.711682	16.307
BJ70	5.85~8.2	4.301415	13.691
BJ84	7.05~10.0	5.259834	11.354
BJ100	8.2~12.4	6.557305	9.703
BJ120	10.0~15.0	7.868776	7.899
BJ140	12.4~18.0	9.487942	6.426
BJ180	15.0~22.0	11.57529	5.309
BJ220	18.0~26.5	14.05137	4.445
BJ260	22.0~34.0	17.351	3.602
BJ320	26.5~40.0	21.05337	2.997

安捷伦系列波导校准操作

第一步、网络分析仪开机后，设置好相应的频率、扫描时间等参数，点击 **Calibration**;

第二步、选择 **Calibration Wizard** 选择→ **UNGUIDED Calibration(Response,1-port,2-port); use Mechanical Standards** → **Next**;

第三步、在弹出对话框 **Cal Type Selection** 下选择 **TRL** 并点击右下方 **View>SelectCal Kit** 在此状态对话框中 **Choose Class type** 下选择 **TRL Classes** 选择对应的“校准件类型”(例如: **32K11644A K-bannd Waveguide SOLT/TRL Calibration Kit**) 点击 **OK** → **Next**;

第四步、**TRL Reference Plane** 选择 **THRU Standard ,TRL Impedance** 选择 **LINE Standard** → **Next**;

第五步、在 Port1 电缆端口连接校准件波导同轴转换器，并用波导短路板短路波导端口，点击对话框中 Port1 下的 **SHORT**;

第六步、在 Port2 电缆端口连接校准件波导同轴转换器，并用波导短路板短路波导端口，点击对话框中 Port2 下的 **SHORT**;

第七步、在两波导同轴转换器间接入 $\lambda/4$ 波导校准件，选择对话框中 Port1 下的 **LINE** 选择 **K-Band $\lambda/4$ wavelength line** **OK**;

第八步、选择当前对话框下的 **THRU**→ **Next**→ **Finish**;

第九步、在工具栏 **Window** 下点击 **Meas Setups** → **Setup B** 即可得到 S11,S21,S12,S22 参数的测试状态，完成校准。

参数附表

型号	国家标准	频率范围	TE10 截止频率 Fc(GHz)	$\lambda/4$ 波长长度 (mm)
X11644A	BJ100	8.2—12.4	6.555	9.78
P11644A	BJ140	12.4--18	9.485	6.51
K11644A	BJ220	18.0—26.5	14.047	4.5
R11644A	BJ320	26.5--40	21.071	3.03

Wiltron 54161A 仪表操作

第一步：按下仪表开关键，仪表自检通过，按 **select** 键确认；

第二步：在 **channel** 选项下选择一个通道 (**Display on/off** 中按下 **1** 或 **2**)；

第三步：按下 **frequency** 键，在屏幕显示中设置 **start** 和 **stop GHZ**，并按下 **enter** 键确认；

第四步：按下 **offset/resolution** 设置合适的参考分辨率 (一般设置为 **5dB/div**)；

第五步：在选择好相对应的通道下按 **menu** 键三下，选择要进行测试检波通道：**A / B / R**；

第六步：同样在选择好相对应的通道下按 **menu** 键一下，即可选择所测试参数类型，如：**RETURN LOSS**、**VSWR**、**POWER** 等参数；

第七步：开始校准，按下 **calibration** 键，选择 **start cal** 并按 **select** 键确认，根据提示 **connect open to test port** (测试端口连接开路器)，执行 **step1** 校准，并按 **select** 键，随后 **step2** 校准为 **remove open and connect short to test port** (测试端口去掉开路器连接短路器)，按 **select** 键确认，即完成了校准。仪表提示连接

测试设备，按 **select** 显示之前 **CORSOR** 数据；

注意：(1) 测试时可移动光标旋钮来进行读值，或是在 **CORSOR** 界面下按下 **select** 键选择其中 **maximum**、**minimum** 或其它；

(2) 仪表在正常使用时，尽量不要设置 **averaging** 和 **smoothing**，如要开启时可将其参数设置为最低，即 `average over =2sweeps,smoothing=1`，否则仪表扫描周期延长，不易观察测试结果。

五、检验工具箱

校准件是对 VNA 进行校准的。校准后的性能怎么样？测量精度达到了要求的校准目标

了吗？确认校准是否有效的最好方法是测量一个精确且熟知的器件并确认其性能参数。

检验箱就是检验校准效果的检验工具。检验箱由反射和传输检验件组成。检验件有已经

经过精确测量过的性能参数。VNA 系统经过校准过后，通过测量检验件的数据与检验件原有

数据进行比较，可以判定 VNA 系统经过校准后的效果。

虽然 VNA 提供了相当准确的复杂数据，但也只能是某种程度上的精确。故需要定期的对

校准数据和 VNA 系统性能进行检验。

对校准数据的检验可以发现诸如校准元件的不当连接，不当旋转或者测试端口超出了
范围等等问题。

HD 已开发了许多精确的波导检验工具箱：用于各种规格的 (BJ-3 到 BJ-900) 波导系统。

对于非标波导也可以提供校准箱和检验箱。

每一个工具箱都包括 20 dB 和 50 dB 的衰减器，直波导以及一个标准反射负载。每个检验工具箱所有的元件的特性参数都已在特定的频率上标定，这些数据存储在检验工具箱的

软盘里或随机的纸质报告中。

检验元件先用校准过的 VNA 测量，然后再将测量数据与存储在软盘里的数据进行对比，

如果吻合的相当好，则表明系统工作正常，测得的数据准确可信。

对于检验器件，因其特性参数已经标定，故不要经常使用，否则会使其特性与标称值

不符。

六、参考资料：

为矢量网络分析选择适当的校准技术

与以往的矢量网络分析仪(VNA)相比,现在的许多仪器提供了更多的校准方法供用户选择。

更多的选择固然好,但同时也带来了更多的混乱。幸运的是,一些关键的比较点可以快

速缩小选择范围,并确定最适当的校准技术。本文将讨论常用的网络分析仪校准技术及其相

对精度,重点是可靠的测量实践和其他能够改善精度的因素。

校准类型

现在的网络分析仪都具有极强的处理能力和灵活性,针对特定应用的许多校准方法也随之涌现出来。例如,针对特定应用的校准类型有混频器/变频器校准(用于频率偏置器件)、

噪声系数校准和夹具内测量等。下面以全面的1端口和2端口矢量校准为讨论的重点,并回顾网络分析仪中针对所有误差源的矢量校准方法。这些方法与那些不考虑所有误差项的方法

(例如响应校准)相比,精确度要高得多。讨论校准精度时,将讨论范围限定在一些常用的校准类型,大多数现代校准方法来源于这些常用的校准类型。常用的校准技术有三种:SOLT

(短路—开路—负载一直通)、TRL(直通—反射—线路)和ECal(电子校准)模块。

在每一种校准技术中,通常又针对特定的测量要求(如宽带频率或晶圆上探测)分成不同的校准方法。表1中总结了这些常用的校准技术及其各自的主要优势。

网络分析仪中的系统误差

图1总结了典型网络分析仪中的系统误差来源。主要包括六类系统误差:方向性误差、隔离误差、源失配误差、负载失配误差、反射跟踪误差和传输跟踪误差。

精确的相位测量和幅度测量功能使得VNA能够精确地计算所有的误差来源。方向性误差会影响反射测量的精度。隔离误差会影响传输测量的精度。源失配误差和负载失配误差影响反射跟踪。

反射测量和传输测量的精度。且与被测件和分析仪测量端口阻抗之间的失配有关。

反射跟踪误差和传输跟踪误差与分析仪的参考接收机和测量接收机的频率响应差异有关,分别影响反射测量精度和传输测量精度。

SOLT校准

大多数网络分析仪用户最先熟悉的校准方法是SOLT。SOLT校准能够提供优异的精度和

可重复性。这种校准方法要求使用短路、开路和负载标准校准件。如果被测件上有

雌雄连接

器, 还需要分别为雌雄连接提供对应的标准件, 连接两个测量平面, 形成直通连接。

SOLT 校准方法使用 12 项误差修正模型, 其中被测件的正向有 6 项, 反向有 6 项。图 2

显示了正向误差项: ED (方向)、ES (源匹配)、EL (负载匹配)、ERF (反射跟踪)、ETF

(传输跟踪) 和 EX (串扰)。操作正确的话, SOLT 可以测量百分之一分贝数量级的功率和

毫度级相位。常用的校准套件中都包含 SOLT 标准校准件。这些校准件包括各种连接器类型,

并且价格相对便宜, 小心使用的话可以用很多年。

有的 SOLT 校准套件包含滑动负载, 因此可改变路径的线路长度, 同时保持恒定的负载

阻抗 (通常为 50Ω 或 75Ω)。滑动负载在高频时尤为重要, 因为在这种情况下很难实施良

好的固定负载。线路长度的变化会直接成比例地改变电长度, 导致测量路径中发生相移。通

过在校准过程中使用几种不同长度的线路和相应的相移, 可以更精确地测量网络分析仪的方

向性 (图 3)。

双向直通 SOL 通常称为 “未知直通” 。这种方法允许在遵守一些基本原则的条件下,

在校准过程中使用电缆、电路板线轨或 Ecal 模块作为直通路径。当处理非插入式设备 (具有同性或不兼容的连接器, 在校准期间需要使用适配器才能建立直通连接) 时, 未知直通尤

为有用。该适配器会给校准带来一个误差。未知直通因为无需使用精密的或经过校准的适配

器, 并且可以最大限度地减少校准期间的电缆移动, 所以非常有用。它通常比其他需要去除

适配器的方法更方便、更精确。

以 SOLT 为基础的其他校准技术还包括对一个标准校准件进行偏置。对于波导和其他高频应用来说, 这个 “偏置 SOLT” 的方法非常有效。例如, 一个偏置负载可以被

认为是一个混合标准件, 其中包含两个不同长度的已知偏置 (发射线路) 和一个负载元件。

“Quick SOLT” 或 QSOLT 用于多端口应用中 (网络分析仪上的测量端口多于 2

个)。这种方法有时被称为 N 端口解决方案，其中 N 代表端口的数量。校准的步骤数与端口

数量成正比。QSOLT 使用需要校准步骤较少的数学算法，通过一组最少的连接全面解析 N 端口误差模型。

大多数 SOLT 校准以手动方式执行，并且执行起来相对容易。安捷伦网络分析仪提供(逐

步)引导式校准，可减少人为误差，提高可重复性。然而，正确的校准技术必须通过实践的

检验。同大多数测量技术一样，SOLT 校准也需要通过实践的检验，以保证能够提供最大的

性能。

TRL 校准

TRL 校准极为精确，在大多数情况下，精确度甚至超过 SOLT 校准。然而绝大多数校准

套件中都不包含 TRL 标准件。在要求高精度并且可用的标准校准件与被测件的连接类型不同

的情况下，一般采用 TRL 校准。使用测试夹具进行测量或使用探头进行晶圆上的测量，通常

都属于这种情况。因此，某些情况下需要构建和表征与被测件配置介质类型相同的标准件。

制造和表征三个 TRL 标准件比制造和表征四个 SOLT 标准件更容易。

TRL 校准还有另一个重要优势：标准件不需要像 SOLT 标准件那样进行完整或精确的

定义。虽然 SOLT 标准件是完全按照标准的定义进行表征和储存，而 TRL 标准件只建立模型

而不进行完整表征，但是 TRL 校准的精度与 TRL 标准件的质量和可重复性成正比。物理中断

(例如传输线路弯曲和同轴结构中的焊缝) 将会降低 TRL 校准的精度。接口必须保持清洁并

允许可重复的连接。

利用 Ecal (电子校准) 模块

为确保温度稳定，Ecal 模块在一个加热的板上使用一组固态阻抗标准件。在网络分析

仪校准期间，Ecal 模块在关闭修正功能的情况下测量这些固态阻抗标准件，然后将这些原

始(未修正的)测量结果与 ECal 模块内部闪存中保存的阻抗标准件预期性能值进行比较。

网络分析仪读取阻抗状态值，并用这些值与测量值进行比较，再使用比较之后得到的差值计

算校准系数(或误差项)。

要想最大限度地减少校准过程中的人为误差，ECal 是一个极好的选择。ECal 模块必须

通过 USB 连接到网络分析仪上才能使用。Ecal 模块经过预热后，工程师将会把它连接到网络分析仪的测试端口上，并在校准菜单中选中 Ecal。该模块会自动感知端口连接并开始其

校准过程。这个过程（通常用时不到 30 秒）具有高度的可重复性，并且正确执行时可获得

比其他许多手动校准技术更高的精度。

与其他方法不同，Ecal 模块非常灵活，可使用不同的连接器通过执行某些 VNA 提供的

用户表征功能进行重新表征。Ecal 模块附带有同轴连接器，当连接同轴波导适配器之后，

Ecal 模块可执行用户表征，从而能够作为波导模块使用。

校准技术及技术间的折中

用户在决定采用哪种校准技术时，往往会被比较它们的精度和易用性。精度最高、技术水

平要求最低的校准方法当然是最理想的。但遗憾地是，我们往往需要在这两个因素之间做一个折中。

表 2 充分利用了安捷伦的研究结果，把本文中讨论的校准技术汇集到一起，对它们所要

求的技术水平及可重复性、成本和精度做了比较。结果分成低(L)、中(M)、高(H)三个档次。

因为 2 端口校准是最常见的应用，所以一般情况下，表 2 中提供的是 2 端口校准的 SOLT

值。相反，1 端口 SOL 校准不要求直通，所以不包括直通标准件所引起的任何测量不确定度，

因此通常会更精确一些。因为 TRL 校准不适用于 1 端口测量，所以此处只提供 2 端口 TRL

及其衍生校准的数据。