

矢量网络分析仪未知直通校准技术及应用*

王尊峰 杨保国 马景芳

(电子测试技术重点实验室 中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

摘要:随着现代电子信息技术的发展,如何提升各种微波非插入器部件的网络特性测量精度是长期以来工程师面临的挑战之一。矢量网络分析仪未知直通校准技术采用 SOLT 校准和 TRL 校准相结合的方法,实现了非插入器件直接在校准面进行高精度测量。简要对比了传统测试方法优缺点,给出未知直通校准模型、校准过程和具体技术应用。实验结果表明,该技术能够很好地解决未知直通部件 S 参数测量难题,可以去除传统方法中使用外加适配器引入的各项测量误差,并且不要求校准直通件特性已知,可有效提高测试精度并具有极大应用灵活性。

关键词:矢量网络分析仪;非插入器件;未知直通校准

中图分类号: TN62 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Unknown through calibration technique of VNA and its application

Wang Zunfeng Yang Baoguo Ma Jingfang

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory; The 41st
Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: With the development of modern electron and information technology, the problem of how to improve the measurement accuracy of S-parameters of non-insertion devices has become more and more important for microwave engineers. Unknown through calibration technique of VNA is forming by combination SOLT method and TRL method, by which non-insertion devices can be measured high-precisionly at calibration plane. After comparing the advantages and disadvantages of conventional method, the model, the calibration process and the application of unknown through technique are given. Experimental results show that the method can solve the problem effectively, can remove the measurement errors of external adapter even the real characters of the adapter being unknown, can improve the measuring accuracy with good flexibility.

Keywords: vector network analyzer(VNA); non-insertion devices; unknown through technique

1 引言

对于微波毫米波同轴部件来说,虽然多数连接器形式都有统一的标准,但不同类型的连接器组合在一个部件上同样会给测试技术形成巨大的挑战,甚至制造出来后无法精确测量和标定。从使用矢量网络分析仪测量的角度来看,一种标准同轴器件应拥有两个同制式连接器,其接头形式应分别是一阴一阳。比如具有阴阳接头的双端口 N 型、SMA 或者 3.5 mm 连接器的微波部件。这些标准器件的共同特点是在矢量网络分析仪直接校准后,可以直接插入测试系统的校准面(通常是测试电缆的阴阳接头)进

行测量,从而可以直接得到较高的测量精度。相对“标准器件”,则非插入器件是指在矢量网络分析仪或者测试系统直接校准后,无法直接插入测试电缆的阴阳校准面进行直接测量的同轴器件,比如双阴接头连接器、放大器等,一端是 SMA 另一端是 N 型接头的同轴连接器等^[1-4]。传统的矢量网络分析仪对被测件要求相对比较理想和严格,从传统意义上来讲,只有标准的阴阳双端口器件才是最理想的。非插入器件由于其“非插入”性,一直是困扰测试人员的技术难题。本文简要分析了传统测量方法的优缺点,并重点论述了未知直通校准技术及其如何应用这一技术解决测试难题。

收稿日期:2017-01

* 基金项目:国家自然科学基金应急管理项目(61640601)资助

2 传统非插入器件测量方法

对于传统的矢量网络分析仪,由于校准时需要阴阳接头配合才能进行校准,因此只有符合标准的一端是阴头、另一端是同样制式的阳头连接器的器件才能直接插入校准面进行直接测量,最常用的带有双阴、双阳连接器的部件、或者两端接头形式不一样的部件等都无法利用矢量网络分析仪直接插入测量。针对非插入器件测试难题,下面简要分析几种传统测试方法。

1)直接外加适配器法:如图1所示,忽略适配器影响,该方法对于引入适配器带来的失配、损耗和相位影响都无法去除,引入的抖动纹波较大。优点是操作简单,至今仍然被广泛使用。



图1 直接加入适配器法

2)等效适配器替换法:如图2所示,该方法是为了解决非插入测量难题,在SOLT校准中采用性能相近的适配器替换的方法完成直通校准的一种测试方法。当具有特性相近的适配器时,可以采用该方法^[5-7]。优点是可以直接利用校准件中的适配器进行替换校准。该测试方法的误差主要来源于适配器之间的损耗和失配特性的差异,特别是随着适配器的长时间磨损,测量误差会越来越大。虽然一些机械校准件会配备这类适配器,但遇到带有复合型连接器的被测件时仍然会无法解决。

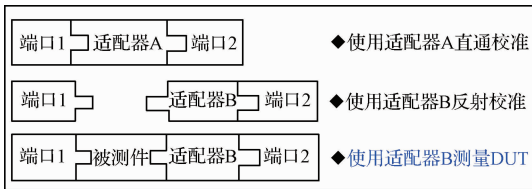


图2 等效适配器替换法示意

3)使用已知特性适配器的去嵌法:如图3所示,该方法使用数据已知的非插入直通件完成SOLT校准的方法。该方法实际执行起来比较困难,因为适配器本身就是一个非插入器件,特性的获取本来就是一个难题,而且对使用着的要求比较高,因此在应用上比较受限制。



图3 已知特性适配器的去嵌法示意

4)端口延伸法:该方法在SOLT校准完成后连接相应的适配器,通过端口延伸去除适配器的部分影响。该方法在精度要求不高时也是一种选择,它不能去除由于额外适配器带来的失配影响。

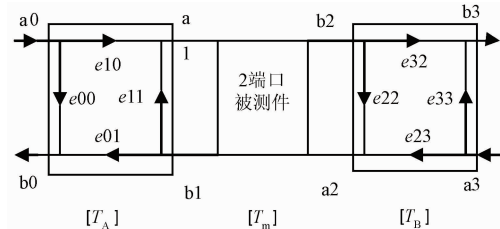
针对以上传统非插入器件测试方法的各种局限性,新的未知直通校准测试方法可以解决以上传统方法存在的不足。

3 未知直通校准技术和测试实例

3.1 模型简介

未知直通校准也称为互逆通路校准(SOLR),是基于8项误差模型和12项误差模型结合的一种解决非插入器件测量的新方法^[8]。它和TRL校准相似,也要求计算开关键,但和SOLT校准使用相同的反射校准件,校准步骤和SOLT很相似^[9-10]。

如图4所示, e_{00} 和 e_{33} 分别是端口1和2的方向性, e_{11} 和 e_{22} 分别是端口1和2匹配项, e_{10e01} 是端口1反射跟踪, e_{23e32} 是端口2反射跟踪, e_{10e32} 是端口1传输跟踪, e_{01e23} 是端口2传输跟踪。虽然未知直通校准表面看来是SOLT校准的变形应用,但是校准中的直通部分则应用了TRL校准类型中的误差模型,该模型中是8项误差而不是SOLT中的12项误差形式。正因为如此,在未知直通校准技术的应用上也有一些条件限制。



e_{00} : 方向性
 e_{11} : 端口1匹配
 e_{10e01} : 端口1反射跟踪
 e_{10e32} : 端口1传输跟踪
 e_{33} : 方向性
 e_{22} : 端口2匹配
 e_{23e32} : 端口2反射跟踪
 e_{01e23} : 端口2传输跟踪

$$[T_m] = \begin{pmatrix} 1 \\ e_{10e32} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} e_{10e11} - e_{00e11} & e_{00} \\ -e_{11} & 1 \end{bmatrix} [T_B] \begin{bmatrix} e_{32e23} - e_{22e33} & e_{22} \\ -e_{11} & 1 \end{bmatrix}$$

图4 未知直通校准8项误差模型

未知直通校准首先需要完成每个端口的反射误差项的获取,包括方向性、源匹配和反射跟踪,通过测量校准件中的开路器、短路器和负载能够完成6项反射误差项的确定。作为直通件的未知直通标准件必须是互易的,即 $S_{21} = S_{12}$,这样就可以把8项误差简化为7项误差,并且校准用未知直通件的电长度需在所测量的最高频率的四分之一波长之内,除此两项之外,直通件的连接器形式和长度都可以是任意的,并且对损耗的要求范围比较宽;还有一个条件是和TRL测量的要求是一样的,要求所用的矢量网络分析仪系统必需能够测量出每个端口的源匹配和负载匹配的差异性,这种差异性是由于主机内部的开关切换造成的,这种差异用于算出开关误差项,这是TRL校准中算法的一个部分,因此要求矢量网络分析仪必须是双端口四接收机(带有双参考接收机)。

3.2 未知直通校准过程

未知直通校准过程如图5所示。

1)在1端口测量开路器、短路器、负载(可测出 e_{00} , e_{11} , e_{10e01} 项);

2) 在 2 端口测量开路器、短路器、负载(可测出 e_{22} , e_{33} , $e_{32}e_{23}$ 项);

3) 在端口 1 和端口 2 测量测量非插入器件适配器(未知直通)(可测出 $e_{10}e_{32}$ 项),并计算出未知直通的时延;

4) 对未知直通的电延时进行确认。

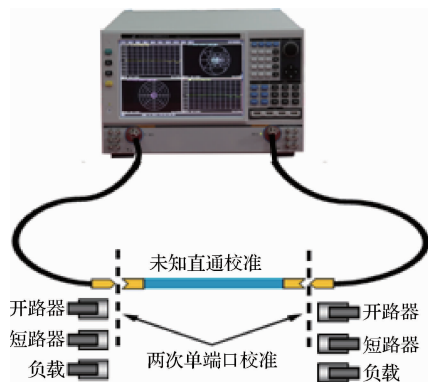


图 5 未知直通校准过程示意图

未知直通校准的过程和传统的 SOLT 校准非常相似,其中不同的是多出了一个步骤,需要用户或者测试者对直通件的延时进行估算确认。主机在校准后通过未知直通算法对直通件的延时值会给出具体估算值。这个值有时会是错误的,因为当测试频率带宽中的点数设置过少的情况下,会导致相邻频点的相位差超过 180° ,这时会发生测试相位曲线发生跳变,从而导致延时计算出错。在测量时,保证相邻测量点之间的相位差小于 180° 非常重要,否则会得到错误的相位和时延信息,如图 6 所示。在可能出现欠取样现象时,可以通过增加测量点数或者减小频率跨度进行设置,直到测量轨迹不再改变来确保两个相邻点之间的相位差小于 180° 。

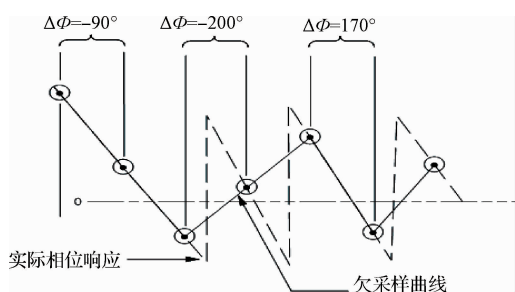


图 6 测量点数过少导致的群时延错误

对于大多数适配器来说都属于基本的传输线,可以根据直通线的物理长度和它的速率因子估算。群时延计算公式:时间=物理距离/(光速×速率因子)。例如,一个适配器的长度是 2 cm,其速率因子为 0.7。则其时延为 $2/(3 \times 10^{10} \times 0.7) = 95.2$ ps。

3.3 未知直通校准的测量试验

图 7 所示为各种双阳、双阴或者两端不同制式接头的非插入测试器件。虽然未知直通部件有几种传统的测试

方法(等效适配器替换法、去嵌法、端口延伸法等),但从实际应用范围来看,被使用较广的测量方法仍是 SOLT 校准后被测件直接外加适配器法。由于忽略了适配器的影响,这种方法显然会影响测试精度,但实际在很多连接器和电缆等无源部件生产场所仍在广泛应用,虽然是无奈之举。而本文介绍的校准测量法则能够快捷而精确地解决这类测试难题,下面是实际测试试验。

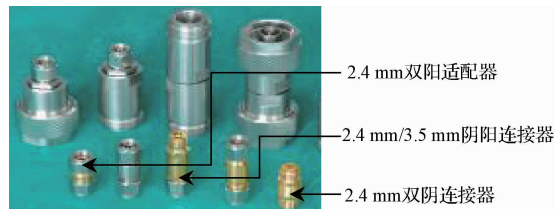


图 7 各种非插入类型的同轴连接器 DUT

图 8 所示为对以上图 7 中所示的 2.4 mm 同轴双阴连接器采用两种不同测试方法的 S21 测试结果。曲线 1 是矢量网络分析仪 SOLT 校准后采用被测件直接加图 7 中双阳适配器测试的测试曲线。测试仪器采用 AV3654 矢量网络分析仪、AV31123 2.4 mm 校准件以及精密测试电缆 1 对(阴阳接头各 1 根)。可以看到如果采用传统的加适配器的方法,加入适配器后测量结果中就引入了新的误差,包括适配器的插损误差和新的失配误差,该测试方法对于小插损器件的影响较大,不但使测试结果插损比实际偏大(偏大 0.2 dB),而且会引起纹波, S21 测试曲线上 40 GHz 范围内纹波峰峰值大于 0.1 dB,比较明显。

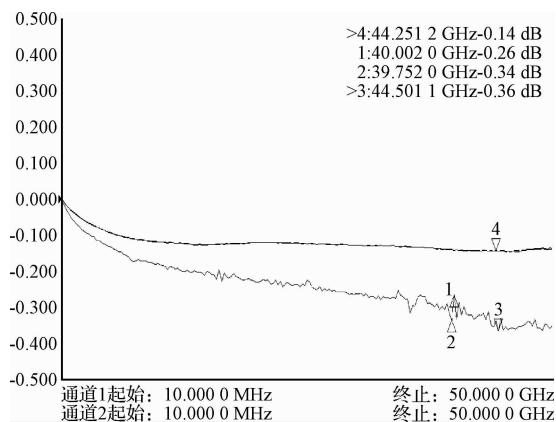


图 8 2.4 mm 同轴双阴连接器两种测试方法曲线试验比较

如图 8 中曲线 2 是采用未知直通校准测量法的测试结果。校准过程使用同一校准件,校准和测量时使用两根阴阳头电缆,直通件使用 2.4 mm 双阴适配器(可以使用被测件本身),由于校准面和测量面是相同,全双端口校准修正了系统的传输频响、反射频响、方向性、端口匹配等 12 项系统误差,测试结果在 10 MHz~50 GHz 范围内插损最大值 0.15 dB,和测试曲线 1 相比,不但实现了直接测量,去除了方法 1 中外加适配器的影响,而且去除了失配

影响,得到光滑的测试曲线,明显提高了测试精度,而且整个测试步骤和传统 SOLT 校准很相似。从测试试验比较中可以看到未知直通校准方法给非插入器件测试带来的巨大创新和拥有的优势。

3.4 未知直通件衰减量的影响

校准中,作为未知通路件的要求并不多,特性不必已知。除上述的互易性等要求外,另外一条需要注意的就是直通件的衰减量不要太大,不要超出 20 dB。

为了评估直通件衰减量对校准测试的影响,如图 9 所示。试验中分别使用 3 次不同衰减值的未知直通件校准后(校准电缆:阴阳头各一根;校准方式:未知直通),都测量一个 0 长度直通的结果,为了方便观察,把 3 条测试曲线的参考值设置偏移开来。图中最上面的测试曲线,校准中使用的是零衰减直通;图中间测试曲线是使用一个 20 dB 衰减器作为直通件校准后的测量结果;从图中看出,中间测试曲线的迹线噪声指标只是稍微有点降低;图中最下面的那条曲线是校准时使用了 40 dB 衰减器作为直通件的测量结果。从图中可以清晰看到,随着直通件衰减量增加,迹线噪声会增大,但同时也可以看到测量的响应曲线(以 0 dB 为中心参考)中心值是非常平直的。当然,这里使用的测量中频带宽是 1 kHz,如果把中频带宽进一步设小(比如使用 10 Hz 或者 30 Hz),也会明显起到减小迹线噪声的作用。

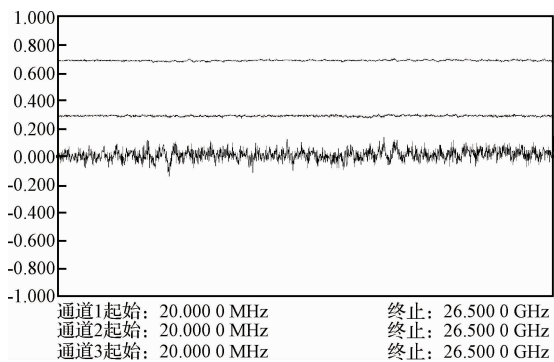


图 9 直通件衰减量对测量精度的影响

4 未知直通算法校准技术应用

4.1 具有不同制式接头的部件测试应用

两端带有不同形式接头的被测件的 S 参数测量一直是技术难题,比如:一端 3.5 mm 接头,另一端 2.4 mm 接头的微波部件,或者甚至一端同轴、另一端波导接口的部件。对于这一测试难题,未知直通校准测量法可以很好地解决这一测试难题。如图 10 所示为使用未知直通校准测量法测量图 7 中 3.5 mm/2.4 mm 双阴转接器的测试结果,矢量网络分析仪的一端接的是 2.4 mm 测试电缆,一端是 3.5 mm 电缆,反射校准时两端口分别使用 3.5 mm 和 2.4 mm 的校准件,传输校准时使用的是同类型 3.5 mm/2.4 mm 的适配器,整个校准过程和普通的

SOLT 校准同样非常相似,校准步骤也基本一样多。被测件本身就可以作为被测件,从校准到测量一次连接就可完成。

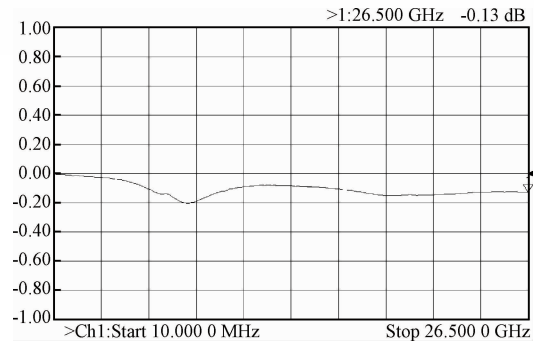


图 10 3.5 mm/2.4 mm 转接器测试结果

4.2 大尺寸部件测试中电缆变形误差问题

在如图 11 所示的例子中,矢量网络分析仪使用的是—对柔性测试同轴电缆。可以看到,当进行校准时,电缆是直接相连的。但当连接被测件时,则电缆就必需被从原来校准时的位置移开,由于电缆的变形就会引入测量误差。当被测件的物理尺寸较长时,特别是测试频率又比较高时,电缆变形引入的测量误差将是非常大的。电缆的幅相稳定性越低,引入的误差就会更加显著。

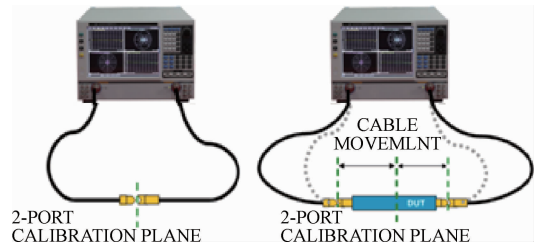


图 11 大尺寸器件测试带来的电缆变形

很多低损耗器件往往只有零点几个 dB 或者更少损耗指标。对这些低损耗器件来讲,因为这种测试误差在部件检测中往往会把合格的部件误判为次品或者不合格品。使用未知直通校准技术可以很好地解决大尺寸部件上述测试问题的具体应用中。图 11 中,在未知直通校准的直通步骤中,使用一个与被测件物理长度一样的直通件,就可以巧妙地解决由于测试电缆移动引起的误差。在测试中,还有一个更好的方法,就是把被测件直接作为校准时的直通件使用,条件是被测件是互易器件而且损耗少于 40 dB。如果一个直通件的长度和被测件相同,只有当被测件插入连接进行测量时,电缆才会有很少量的移动。如果直接把被测件本身当做被测件,那么在校准完后就能够直接对被测件进行测量,那么由于电缆相对于校准时的移动量就是零,从而省去了测试电缆校准后断开以及再重新连接的过程。

4.3 波导测试方面的应用

未知直通校准还可以应用于解决两端具有不同类型

波导接口器件的测试难题,比如一边是矩形波导,另一端是圆形波导的部件,或者两端是不同尺寸的矩形波导,如图12所示的一端是BJ260波导口,另一端是BJ320波导口的渐变波导,采用未知直通校准法测量可以方便解决这一传统测试难题。校准过程两个校准端面分别使用BJ260和BJ320的波导校准件完成反射校准,直通校准直接使用被测件本身即可。这里需要注意的是需要在两种波导的频率交叠范围内进行校准和测量,因为在两种波导的非交叠带信号跌落的幅度比较大,因而会造成直通校准因衰减较大而无法进行。

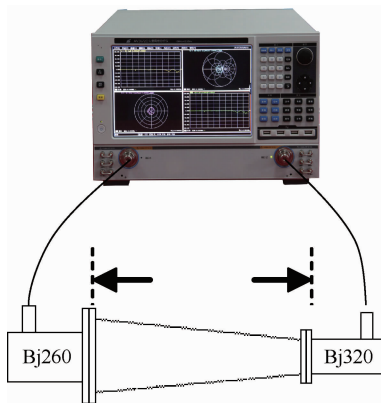


图12 锥形渐变波导测试

5 结论

本文从应用的角度介绍了微波测试领域非插入器件测试存在的困难,并简要对传统解决方案的优缺点进行了分析,在此基础上,重点阐述了未知直通校准方法的模型、原理和测试过程,对实际使用中的注意事项进行了详细说明,并通过实测试验给出了测试曲线。未知直通校准测试技术在解决传统非插入测试方面具有巨大的技术优势,不但精度高、而且操作步骤简捷,和传统SOLT校准相比并没有增加测试步骤。该技术的应用普及将会对提升S参数测试精度、解决业界一直存在的非插入测试难题起发挥关键作用。

参考文献

- [1] 吴雪华,王庆洲,唐宗魁. 提高非插入式微波器件测量精度的研究[J]. 国外电子测量技术, 2007, 26(7): 58-60.
- [2] 苟元潇,林茂六,傅佳辉. 67 GHz 宽带谐波相位参考及其定标技术[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1488-1496.
- [3] 朱杰,张祥坤,蔡永俊. 矢量网与滑轨联合控制合成孔径成像系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(7): 75-78.
- [4] 孙金龙,林茂六,吴芝路. 射频器件时域非线性行为建模综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1565-1573.
- [5] 尤嘉,宣银良. 矢量网络分析仪校准和验证的常见误区[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(4): 1-6.
- [6] 魏连成. 如何进行非插入式器件的测量[J]. 国外电子测量技术, 2007, 26(2): 57-59.
- [7] 郝绍杰,韩晓东. 矢量网络分析仪硬件性能对测量结果的分析[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1): 28-32.
- [8] 赵伟,赵永久,袁春花,等. 一种基于10项误差模型的二端口矢量网络分析仪校准方法[J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2469-2472.
- [9] 赵伟,赵永久,秦红波,等. 利用引入开关补偿误差的8项误差模型校准二端口矢量网络分析仪[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(5): 661-664.
- [10] 郝绍杰,韩晓东. 校准件不完善导致的矢量网络分析仪剩余误差分析[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(6): 54-56.

作者简介

王尊峰,1971年出生,工学学士,高级工程师,主要研究方向为微波毫米波测试技术。
E-mail:alps2059@sina.com