

# 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

陈 婷, 杨春涛, 陈云梅, 张国华

(中国航天科工集团第二研究院 203 所, 北京 100854)

**摘要:** 通过对网络分析仪单端口 OSL 校准方法的研究, 分析了校准件的不完善——开路器、短路器校准位置的不明确及校准负载的不理想等对单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, 结合实验数据与仿真结果对算法加以验证。

**关键词:** 计量学; 矢量网络分析仪;  $S$  参数; 校准件; 测量不确定度

中图分类号: TB973

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2009)02-0177-06

## Uncertainty of VNA One-port $S$ -parameter Measurement due to Non-ideal Calibration Standards

CHEN Ting, YANG Chun-tao, CHEN Yun-mei, ZHANG Guo-hua

(203 Institute, Second Research Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The OSL method is widely used in one-port calibration of VNA. The uncertainty of the one-port  $S$ -parameter measurement due to the non-ideal calibration standards, which include the deviation of short circuit length or open circuit length, and the non-ideal calibration load is explored. As a result, the mathematic relationship between the deviation of non-ideal calibration standards and the calibration results is got. Experimental data and simulated results are given to verify the theory.

**Key words:** Metrology; Vector network analyzer(VNA);  $S$ -parameter; Calibration standard; Measurement uncertainty

## 1 引 言

对网络分析仪进行单端口校准可以修正单端口的 3 项系统误差, 即方向性、源匹配及反射跟踪频率响应。OSL 方法<sup>[1]</sup>是目前最普遍使用的单端口校准方法。在校准程序中 O (开路器/偏置短路器)、S (短路器) 及 L (匹配负载) 3 个校准件被认为是完全理想的, 即反射系数分别为  $\Gamma_S = -e^{-j2\beta l_1}$ ,  $\Gamma_O = -e^{-j2\beta l_2}$  及  $\Gamma_M = 0$  ( $l_1, l_2$  为偏置长度)。然而由于实际的校准件的不完善性或所用校准件与校准模型定义的不完全一致性, 校准件的反射系数会偏离理想

值, 这就将对校准结果引入不确定度。本文将分析由于校准件的不完善 (校准件的反射系数非理想值) 给测量结果引入的不确定度, 给出校准件的反射系数的偏差 ( $\delta\Gamma_O, \delta\Gamma_S, \delta\Gamma_M$ ) 与校准后测量结果的  $S$  参数的偏差 ( $\delta S$ ) 二者之间关系式的推导过程和结论。并结合实验数据与仿真结果说明推导的正确性。这里不考虑噪声、器件的非线性等因素的影响。

## 2 单端口误差模型

单端口误差模型的信号流程图如图 1 所示, 其中

收稿日期: 2006-08-24; 修回日期: 2007-10-15

作者简介: 陈婷(1981-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 中国航天科工集团第二研究院 203 所工程师, 主要从事无线电计量的研究工作。chenting0451@163.com

$E_D$  为方向性误差,  $E_S$  为源匹配误差,  $E_R$  为反射跟踪频响误差,  $S_{11m}$  为网络仪测量的  $S$  参数,  $S_{11}$  为被测件实际  $S$  参数。

由信号流程图理论可知:

$$S_{11m} = E_D + \frac{E_R S_{11}}{1 - E_S S_{11}} \quad (1)$$

校准时在测试端口分别接匹配负载( $S_{11} = 0$ )、短路器( $S_{11} = -1$ )和开路器( $S_{11} = 1$ )得到 3 个  $S_{11m}$  的测量值  $m_1, m_2, m_3$

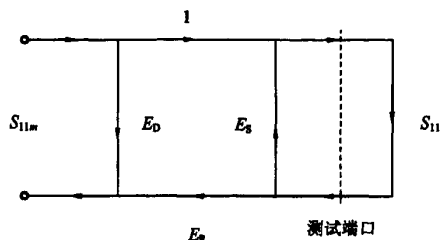


图 1 单端口误差网络信号流程图

$$m_1 = E_D \quad (2)$$

$$m_2 = E_D - \frac{E_R}{1 + E_S} \quad (3)$$

$$m_3 = E_D + \frac{E_R}{1 - E_S} \quad (4)$$

求解式(2)~(4)式可得到  $E_D, E_R$  及  $E_S$ , 修正后的单端口测量结果  $S_{11}$  为

$$S_{11} = \frac{S_{11m} - E_D}{E_S(S_{11m} - E_D) + E_R} \quad (5)$$

### 3 $\delta S$ 的理论推导

假设校准件 L(匹配负载)、O(开路器)和 S(短路器)的实际反射系数分别为  $\Gamma_M, \Gamma_O, \Gamma_S$ , 则校准件不完善引入的反射系数偏差  $\delta\Gamma_M, \delta\Gamma_O, \delta\Gamma_S$  将对修正后的端口  $S_{11}$  产生一个附加的值  $\delta S_{11}$ , 本节将分析  $\delta\Gamma_M, \delta\Gamma_O, \delta\Gamma_S$  对不同被测件  $\delta S_{11}$  的影响。从式(5)可以看出  $E_D, E_R, E_S$  对  $S_{11}$  有直接的影响, 首先要找出  $\delta S_{11}$  与  $\delta E_D, \delta E_R, \delta E_S$  之间的关系。假设  $\delta S_{11}$  不受未校准值  $S_{11m}$  的影响, 则对式(1)求全微分, 可得以  $S_{11m}, E_D, E_R, E_S$  为变量的全微分方程:

$$\begin{aligned} \delta S_{11m} = & \left( \frac{\partial S_{11m}}{\partial S_{11}} \right) \delta S_{11} + \left( \frac{\partial S_{11m}}{\partial E_D} \right) \delta E_D + \\ & \left( \frac{\partial S_{11m}}{\partial E_R} \right) \delta E_R + \left( \frac{\partial S_{11m}}{\partial E_S} \right) \delta E_S = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中各项系数如式(7)~(10)所示:

$$\frac{\partial S_{11m}}{\partial S_{11}} = \frac{E_R}{(1 - E_S S_{11})^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial S_{11m}}{\partial E_D} = 1 \quad (8)$$

$$\frac{\partial S_{11m}}{\partial E_R} = \frac{S_{11}}{1 - E_S S_{11}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial S_{11m}}{\partial E_S} = \frac{E_R S_{11}^2}{(1 - E_S S_{11})^2} \quad (10)$$

将式(7)~(10)代入式(6)中, 有:

$$\begin{aligned} \frac{E_R}{(1 - E_S S_{11})^2} \delta S_{11} = & -\delta E_D - \frac{S_{11}}{1 - E_S S_{11}} \delta E_R - \\ & \frac{E_R S_{11}^2}{(1 - E_S S_{11})^2} \delta E_S \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)给出了误差项的偏差与被测件  $S$  参数偏差的数学关系式, 要想得出校准件反射系数的偏差与  $S$  参数不确定度间的关系, 还要求出标准件反射系数的偏差  $\delta\Gamma_M, \delta\Gamma_O, \delta\Gamma_S$  与误差项偏差  $\delta E$  的关系。

当端口接匹配负载时, 有

$$m_{11}^M = E_D + \frac{E_R \Gamma_M}{1 - E_S \Gamma_M} \quad (12)$$

同理, 当端口接开路器和短路器时, 分别有

$$m_{11}^O = E_D + \frac{E_R \Gamma_O}{1 - E_S \Gamma_O} \quad (13)$$

$$m_{11}^S = E_D + \frac{E_R \Gamma_S}{1 - E_S \Gamma_S} \quad (14)$$

假设  $\delta E$  不受未校准  $S$  参数  $m_{11}$  的影响, 由式(12)~(14)可建立 3 个全微分方程, 其中  $E_R, E_D, E_S, \Gamma_M, \Gamma_O, \Gamma_S$  为变量。以式(12)为例, 求全微分, 可得:

$$\begin{aligned} \delta m_{11}^M = & \left( \frac{\partial m_{11}^M}{\partial \Gamma_M} \right) \delta \Gamma_M + \left( \frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_D} \right) \delta E_D + \\ & \left( \frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_R} \right) \delta E_R + \left( \frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_S} \right) \delta E_S = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中,

$$\frac{\partial m_{11}^M}{\partial \Gamma_M} = \frac{E_R}{(1 - E_S \Gamma_M)^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_D} = 1 \quad (17)$$

$$\frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_R} = \frac{\Gamma_M}{1 - E_S \Gamma_M} \quad (18)$$

$$\frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_S} = \frac{E_R \Gamma_M^2}{(1 - E_S \Gamma_M)^2} \quad (19)$$

同理对式(13)求全微分, 得到与式(15)~(19)类似的公式, 这里将  $\Gamma_M$  换成  $\Gamma_O$ ; 再对式(14)求全微分, 同样得到与式(15)~(19)类似的公式, 这里将  $\Gamma_M$  换成  $\Gamma_S$ 。

将式(15)及端口接开路器和短路器时的与其类似的全微分方程写成矩阵向量的形式:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_D} & \frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_R} & \frac{\partial m_{11}^M}{\partial E_S} \\ \frac{\partial m_{11}^K}{\partial E_D} & \frac{\partial m_{11}^K}{\partial E_R} & \frac{\partial m_{11}^K}{\partial E_S} \\ \frac{\partial m_{11}^L}{\partial E_D} & \frac{\partial m_{11}^L}{\partial E_R} & \frac{\partial m_{11}^L}{\partial E_S} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta E_D \\ \delta E_R \\ \delta E_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\partial m_{11}^M}{\partial M} \delta \Gamma_M \\ -\frac{\partial m_{11}^K}{\partial K} \delta \Gamma_S \\ -\frac{\partial m_{11}^L}{\partial L} \delta \Gamma_0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

由式(20),解出 $\delta E$ :

$$\delta E_D = -E_R \left[ \frac{\Gamma_S \Gamma_0}{(\Gamma_M - \Gamma_0)(\Gamma_M - \Gamma_S)} \delta \Gamma_M + \frac{\Gamma_M \Gamma_0}{(\Gamma_S - \Gamma_0)(\Gamma_S - \Gamma_M)} \delta \Gamma_S + \frac{\Gamma_S \Gamma_M}{(\Gamma_0 - \Gamma_M)(\Gamma_0 - \Gamma_S)} \delta \Gamma_0 \right] \quad (21)$$

$$\delta E_R = E_R \left[ \frac{\Gamma_S + \Gamma_0 - 2\Gamma_S \Gamma_0 E_S}{(\Gamma_M - \Gamma_0)(\Gamma_M - \Gamma_S)} \delta \Gamma_M + \frac{\Gamma_M + \Gamma_0 - 2\Gamma_M \Gamma_0 E_S}{(\Gamma_S - \Gamma_0)(\Gamma_S - \Gamma_M)} \delta \Gamma_S + \frac{\Gamma_S + \Gamma_M - 2\Gamma_S \Gamma_M E_S}{(\Gamma_0 - \Gamma_M)(\Gamma_0 - \Gamma_S)} \delta \Gamma_0 \right] \quad (22)$$

$$\delta E_S = -\frac{(1 - E_S \Gamma_0)(1 - E_S \Gamma_S)}{(\Gamma_M - \Gamma_0)(\Gamma_M - \Gamma_S)} \delta \Gamma_M - \frac{(1 - E_S \Gamma_M)(1 - E_S \Gamma_0)}{(\Gamma_S - \Gamma_0)(\Gamma_S - \Gamma_M)} \delta \Gamma_S - \frac{(1 - E_S \Gamma_S)(1 - E_S \Gamma_M)}{(\Gamma_0 - \Gamma_M)(\Gamma_0 - \Gamma_S)} \delta \Gamma_0 \quad (23)$$

式(21)、(22)、(23)给出了各个校准件反射系数偏差与单端口3项系统误差的偏差 $\delta E$ 之间的关系式。将这3个公式代入到式(11)中,即可得到校准件反射系数偏差与测得的S参数不确定度之间的关系。

假设3个校准件中有两个是理想的,先假设匹配负载不理想,其反射系数有一个偏差值 $\delta \Gamma_M$ ,则由以上分析可知, $\delta \Gamma_M$ 对 $\delta S_{11}$ 的影响为

$$\delta S_{11}(\delta \Gamma_M) = \left[ \frac{\Gamma_S \Gamma_0 (1 - E_S S_{11})^2}{(\Gamma_M - \Gamma_0)(\Gamma_M - \Gamma_S)} - \frac{(\Gamma_S + \Gamma_0 - 2\Gamma_0 \Gamma_S E_S) S_{11} (1 - E_S S_{11})}{(\Gamma_M - \Gamma_0)(\Gamma_M - \Gamma_S)} + \frac{S_{11}^2 (1 - E_S \Gamma_0)(1 - E_S \Gamma_S)}{(\Gamma_M - \Gamma_0)(\Gamma_M - \Gamma_S)} \right] \delta \Gamma_M \quad (24)$$

对于短路器(S)反射系数的不理想( $\delta \Gamma_S$ )给测量结果引入的不确定度表达式 $\delta S_{11}(\delta \Gamma_S)$ 与式(24)形式类似,只不过将式(24)中的 $\Gamma_M$ 换成 $\Gamma_S$ , $\Gamma_S$ 换成 $\Gamma_0$ , $\Gamma_0$ 换成 $\Gamma_M$ ;同理,开路器(O)反射系数的不

理想( $\delta \Gamma_0$ )给测量结果引入的不确定度表达式 $\delta S_{11}(\delta \Gamma_0)$ 也与式(24)形式类似,将式(24)中的 $\Gamma_M$ 换成 $\Gamma_0$ , $\Gamma_0$ 换成 $\Gamma_S$ , $\Gamma_S$ 换成 $\Gamma_M$ :

$$\delta S_{11}(\delta \Gamma_M) = \frac{S_{11}^2 - S_{11}(\Gamma_0 + \Gamma_S) + \Gamma_0 \Gamma_S}{(\Gamma_M - \Gamma_S)(\Gamma_M - \Gamma_0)} \delta \Gamma_M \quad (25)$$

$$\delta S_{11}(\delta \Gamma_S) = \frac{S_{11}^2 - S_{11}(\Gamma_0 + \Gamma_M) + \Gamma_0 \Gamma_M}{(\Gamma_S - \Gamma_M)(\Gamma_S - \Gamma_0)} \delta \Gamma_S \quad (26)$$

$$\delta S_{11}(\delta \Gamma_0) = \frac{S_{11}^2 - S_{11}(\Gamma_S + \Gamma_M) + \Gamma_S \Gamma_M}{(\Gamma_0 - \Gamma_M)(\Gamma_0 - \Gamma_S)} \delta \Gamma_0 \quad (27)$$

式(25)、(26)、(27)为单个校准件反射系数的不理想对测量结果产生的不确定度的表达式。从以上3个公式可以看出,在单端口OSL校准中,单个校准件的偏差对被测件的S参数产生不确定度 $\delta S$ 相当于该校准件的偏差乘上一个与被测件回波损耗有关的系数。所以,一方面, $\delta S$ 的值取决于校准件的反射系数偏差,另一方面被测件的回波损耗对 $\delta S$ 也有很大的影响。当测量大回波损耗的被测件(如匹配负载)时,由于 $S_{11}$ 很小,校准负载的不理想对被测件产生的不确定度主要取决于校准负载的偏差 $\delta \Gamma_M$ ,被测件的回波损耗越大,校准负载的反射系数的偏差对测量结果的影响越大,而开路器和短路器的反射系数偏差对大回波损耗被测件的测量结果影响相对较小。

## 4 实验及仿真

为了说明式(25)~(27)的正确性与普遍性,实验中分别用小反射与大反射的被测件在75~110 GHz的毫米波系统上实验验证。以计算 $\delta S_{11}(\delta \Gamma_M)$ 为例,从式(25)中可以看出,若要求出 $\delta S_{11}$ ,除需已知 $S_{11}$ 、 $\Gamma_M$ 、 $\Gamma_0$ 、 $\Gamma_S$ 的值外还需要已知 $\delta \Gamma_M$ 。这里 $S_{11}$ 为校准后单端口被测件的S参数,可由校准程序算出; $\Gamma_M$ 、 $\Gamma_0$ 、 $\Gamma_S$ 为代入校准程序的理想的反射系数,也为已知量; $\delta \Gamma_M$ 为负载的反射系数真值与理想值之间的偏差,这个值在实际中难以精确确定。所以实验中采用相对测量比对的方法加以验证,这里分别使用3个不同的负载作为校准负载,其中一个负载性能指标较高,在全频带上驻波比在1.01以下,以此作为标准,分别用另外两个负载的校准值计算的 $\delta S_{11}$ 与作为标准的负载进行对比,以此来验证算法的准确性。

在实验中需注意的一个问题是连接重复性对测量结果的影响,不良的连接重复性会淹没算法中的任何变化。由于只分析单个校准件的不确定度对测

量结果的影响,所以当—个校准标准被认为是不理想时,其它两个标准被认为是理想的。如考察校准负载对测量不确定度的影响时,使用不同负载校准时,就要求这几组与其配合使用的开路、短路校准获得的  $S$  参数是对应一致的,然而由于连接重复性的原因,这一点很难满足。

为了尽量减小这一因素的影响,采用实验与仿真相结合的方法。从网络分析仪上采得  $S$  参数数据,导入到 PC 机上编写的校准程序中,这样就可以在用不同校准负载校准时用同一组开路、短路及未校准的被测件  $S$  参数,从而可以完全考察单一校准件不确定度对测量结果的影响。

首先给出校准负载的不完善对校准结果产生的影响。实验使用了由网络分析仪 E8363B、毫米波控制器 N5260A 和毫米波测试模块组成的 3 mm 波导测试系统。用于校准的 O、S 校准件分别为 OML 公司生产的 0.1 英寸偏置短路器和 0.1 英寸 +1/4 波长偏置短路器;为了便于对比实验结果,选用 3 个不同的负载  $M_0$ 、 $M_1$ 、 $M_2$  分别作为负载校准标准。其中  $M_0$  性能指标最高,以  $M_0$  作为基准负载,测量  $M_1$ 、 $M_2$  的反射系数。图 2 是在  $M_0$  为基准时, $M_1$ 、 $M_2$  反

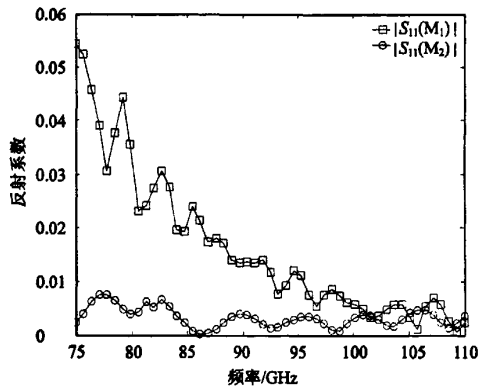


图 2 负载  $M_1$  和  $M_2$  的反射系数

射系数的模值。

负载  $M_1$  的反射系数相对较大,在低端反射系数达 0.055 (VSWR 为 1.12);负载  $M_2$  的反射系数相对较小,小于 0.01 (VSWR 小于 1.02)。分别用这 3 个负载作为校准负载配合同一组开路短路校准数据对网络分析仪校准,并分别用校准后的系统测量—终端接小反射负载的标准波导段(作为小反射被测件)和—终端接同样负载的失配波导段(作为大反射被测件)。测得的被测件反射系数分别如图 3 和图 7 所示。可见由于校准负载性能指标(反射系数)不同,被测件的测量结果也是不同的。比较而

言,对于小反射的被测件,校准负载的不理想对测量结果的影响较大。

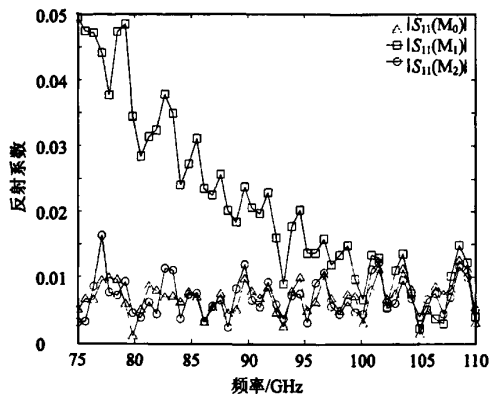


图 3 被测件为一标准波导段终端加一小反射负载,用不同负载校准后,测得被测件的反射系数

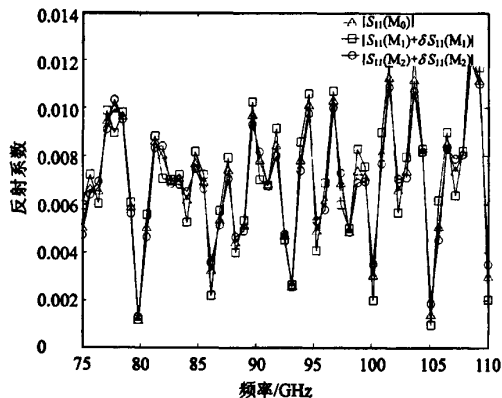


图 4 对于小反射被测件  $S'_{11} = S_{11} + \delta S_{11}$

图 5、6 及图 9、10 分别表示出对于小反射被测件和大反射被测件用  $M_1$  和  $M_2$  负载校准时  $\delta\Gamma_M$  与  $\delta S$  的关系。可见,无论对于大反射还是小反射的被

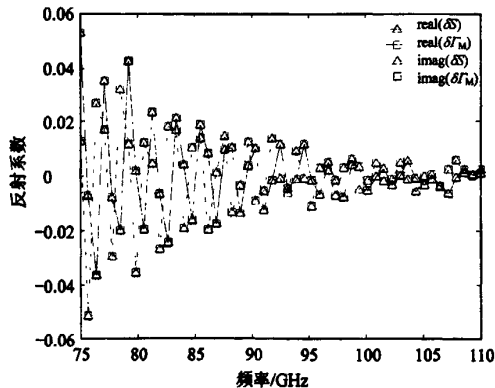


图 5 标准波导段终端加一小反射负载的  $\delta S$  与  $\delta\Gamma_{M1}$

测件,由于负载反射系数的偏差  $\delta\Gamma_M$  与其所导致的测量结果偏差  $\delta S$  是同阶的。将这一偏差  $\delta S$  加到测

量结果上,得到经过修正的  $S$  参数,设其为  $S'_{11} = S_{11} + \delta S_{11}$ ,如图 4、8 所示,将其分别与图 3、7 比较,可见,由  $\delta S_{11}$  修正后的  $S_{11}$  即  $S'_{11}$  用基准负载校准后测得的  $S$  参数有较高的一致性,3 条曲线基本重合。由此,证明了式(25)的正确性。

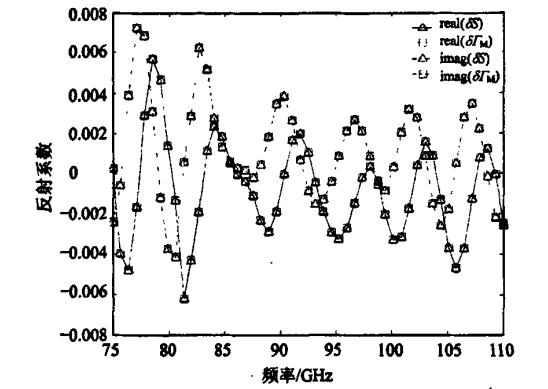


图 6 标准波导段终端加一小反射负载的  $\delta S$  与  $\delta \Gamma_{M_2}$

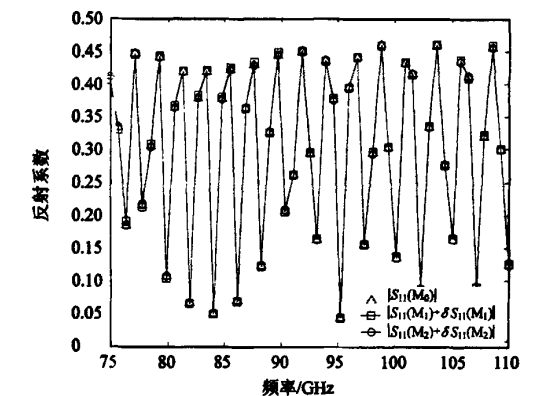


图 7 被测件为一失配波导段终端加一小反射负载,用不同负载校准后,测得被测件的反射系数

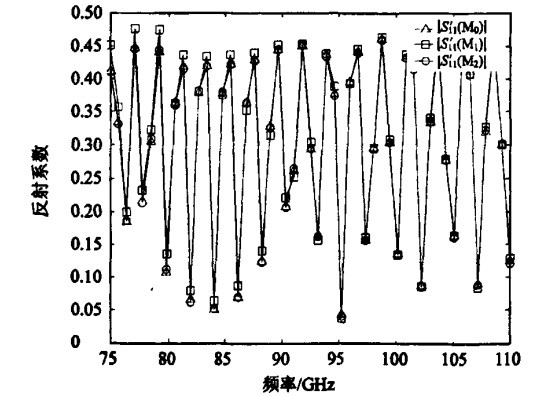


图 8 对于大反射被测件  $S'_{11} = S_{11} + \delta S_{11}$

下面考察短路、开路(偏置短路)反射系数的不

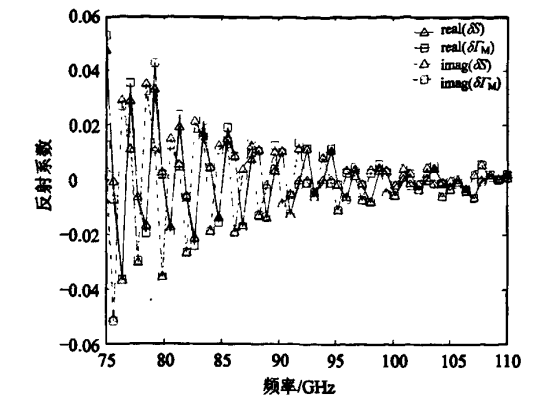


图 9 失配波导段终端加一小反射负载的  $\delta S$  与  $\delta \Gamma_{M_1}$

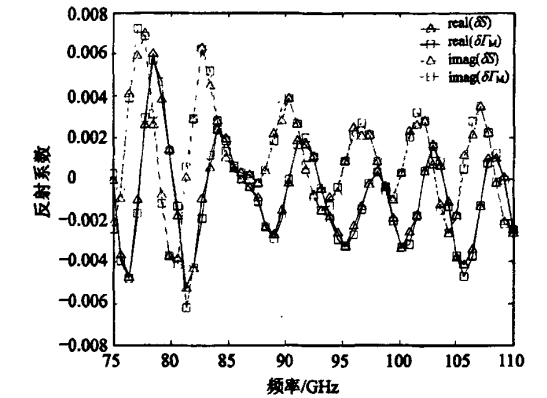


图 10 失配波导段终端加一小反射负载

准确对校准结果的影响。校准时使用性能指标高的  $M_0$  负载作为标准,并假设其为理想的,改变校准模型中短路面(或偏置短路面)的位置或反射系数的模值,由式(26)、(27)并结合仿真,结果见表 1、2。

表 1 短路校准件的反射系数与校准模型不一致引入的不确定度

短路长度 $\delta l/\mu\text{m}$	标准波导加 小反射负载 $ \delta S _{\text{max}}$	失配波导加 小反射负载 $ \delta S _{\text{max}}$	直接短路板 $ \delta(\arg S_{11}) /(^{\circ})$
1	0.000 0	0.001 4	0.212
2	0.000 0	0.002 8	0.424
3	0.000 0	0.004 3	0.636
4	0.000 1	0.005 7	0.848
5	0.000 1	0.007 2	1.059
10	0.000 3	0.014 7	2.110
20	0.000 6	0.030 5	3.687
30	0.000 9	0.047 6	6.212
40	0.001 2	0.066 2	8.183
50	0.001 5	0.086 5	10.080

表 2 开路校准件的反射系数与校准模型  
不一致引入的不确定度

开路反射 系数幅度 $ \delta\Gamma_o _{\max}$	标准波导加 小反射负载 $ \delta S _{\max}$	失配波导加 小反射负载 $ \delta S _{\max}$	直接短路板 $ \delta(\arg S_{11}) $ $/(^{\circ})$
0.01	0.000 1	0.003 1	0.477
0.02	0.000 1	0.006 2	0.971
0.03	0.000 2	0.009 3	1.483
0.04	0.000 3	0.012 5	2.013
0.05	0.000 4	0.015 7	2.563
0.10	0.000 8	0.032 4	5.637
0.20	0.001 8	0.071 7	13.889

校准使用的开路器和短路器分别为偏置长度为 2.54 mm 和 3.624 6 mm 的偏置短路标准。令短路器的实际偏置长度与校准模型有一定的偏差,或令开路器的实际反射系数与校准模型不完全一致,数值如表中所示。在测试端分别测量上述小反射被测件和大反射被测件的反射幅度,再测量一个直接短路板的相位。表 1 中给出了这些校准件的实际反射系数与校准模型不完全一致引入的偏差对校准后测量结果不确定度影响的阶数。可见,从幅值来看,对于小反射的被测件来说, $\delta\Gamma_s$  和  $\delta\Gamma_o$  对测量结果的影响很小,可以忽略;而对于大反射器件, $\delta\Gamma_s$  和  $\delta\Gamma_o$  将对测量结果引入很大的不确定度。从相位上来看,相位对于开、短路模型的准确度十分敏感,当

偏置短路的长度偏差在 50  $\mu\text{m}$  时,其相位就已发生 10° 的偏差。

5 结 论

本文从网络分析仪单端口误差模型出发,推导了 OSL 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。推导结果不仅适用于波导系统,同样适用于同轴系统。最后结合实验数据及仿真结果对这一结论加以分析验证。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 国防科工委科技与质量司. 无线电电子学计量[M]. 北京:原子能出版,2002, 189~190.

[2] 王宏珍,卜云平,马迎春. 浅析矢量网络仪测量误差和误差修正[J]. 实用测试技术,2001,9(5): 19~22.

[3] 刘岚,聂丹. 微波网络分析仪系统误差辨析及校准[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(2): 73~79.

[4] 梁军,刘旺,刘圣和. 网络分析仪误差模型及应用[J]. 计量技术,2002,(6): 3~6.

[5] Stumper U. Influence of TMSO Calibration Standards Uncertainties on VNA S-parameter Measurements[J], IEEE Trans on I M,2003,52(2): 311~315.

[6] Ken Wong. Uncertainty Analysis of the Weighted Least Squares VNA Calibration[A]. 64th ARFTG Conference [C]. 2005, 23~31.

## 微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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>