

网络分析仪不同校准面自校准不确定度分析

张翠翠 王 益 魏 竹 王建忠

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川绵阳 621900)

摘 要 由于网络分析仪端口延伸线具有衰减性, 使网络分析仪的动态范围降低, 影响散射参数的测量结果, 本文分析带有延伸线的网络分析仪 SOLT 校准算法, 测量得到网络分析仪校准后剩余误差, 得到网络分析不同校准面自校准后不确定度, 并得到相关结论。

关键词 SOLT 校准 剩余误差 不确定度 不同校准面

Analyses on the Uncertainty of Calibrated VNA With Different Calibration Surface

ZHANG Cui-cui WANG Yi WEI Zhu WANG Jian-zhong

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900)

Abstract Because of the attenuation of extended line the network analyzer, the network analyzer dynamic range reduces, that has an influence on the measurement of scattering parameters. This paper make an analyses on the SOLT calibration algorithm of network analyzer with extension line, get the residual error of the calibrated network analyzer, and also get the uncertainty of calibrated VNA with different calibration surface, finally make some related conclusions.

Keywords SOLT calibration Residual error Uncertainty Different Calibration surface

1 引 言

网络分析仪是一种高性能的智能化测量仪器, 用于测量有源或无源、可逆或不可逆的双口和单口网络的复散射参数, 同时能对测量结果进行误差修正, 并换算出其它网络参数, 使网络分析仪能够对微波网络参数进行全面精确的测量。

高功率微波 (HPM) 等现场测量, 通常需要利用网络分析仪对 HPM 信号测量系统进行散射参数校准, 但往往由于现场条件不像在校准实验室, 可将被测件直接连接在网络分析仪的端口上进行测量, 通常需要将网络分析仪的校准面通过电缆或者转接头进行一次或多次延伸, 再进行网络分析仪的自校准。此时, 完成校准面延伸的延伸线的散射参数将可能对被测件散射参数的测量结果造成影响。本文基于传统 SOLT 校准算法入手, 分析了引入延伸线后的 SOLT 校准算法,

并得到网络分析仪剩余误差分析方法, 结合讨论不同校准面自校准后网络分析仪不确定度分析评定, 得到网络分析仪校准面延伸对散射参数测量影响的相关结论。

2 带有延伸线网络分析仪自校准分析

2.1 网络分析仪自校准概述

矢量网络分析仪(VNA)用于器件 S 参数测量时, 由于 VNA 和被测件的输入端口之间一般存在连接线或者转换接头等, 使得理想网络分析仪的测试平面和被测件的待测平面之间出现一个误差网络, 因此在网络分析仪测量之前必须通过相应的测试校准这些误差项的影响, 该过程就是网络分析仪的校准过程。网络分析校准方法分为单端口校准和双端口校准, 单端口校准一般采用 SOL (short-open-load) 算法, 双端口校准算法有

SOLT(short-open-load-thru)、TRL (thru-reflection-line) 等多种算法, 其中 SOLT 算法能够修正 12 项误差, 一般应用于同轴系统的校准, 准确度较高, TRL 校准方法能修正 8 项误差, 一般适用于波导及微带系统, 准确度也很高, 本文所涉及网络分析仪不同校准面的分析基于 SOLT 校准开展。

二端口网络有 4 个 S 参数^[1-3], 需要用反射和传输测量系统将它们同时测出, 这时可以用图 1 的误差模型, 即传统基于 SOLT 校准的 12 项误差模型表示。图中虚线之间部分为待测的双端口网络, 其 S 参数为 S_{11X} , S_{22X} , S_{12X} 和 S_{21X} , 其脚标“X”表示所谓“真实值”, 即校正值。图 1 中的 S_{11M} , S_{22M} , S_{12M} 和 S_{21M} 为被测网络的测量值。图 1 (a) 是正向测量 S_{11X} 和 S_{21X} 时的误差模型, 图 1 (b) 是反向测量 S_{12X} 和 S_{22X} 时的误差模型。

其 12 项误差为: 有效方向性误差 E_{DF} 和 E_{DR} , 隔离度误差 E_{XF} 和 E_{XR} , 等效源失配误差 E_{SF} 和 E_{SR} , 等效匹配负载失配误差 E_{LF} 和 E_{LR} , 传输跟踪误差 E_{TF} 和 E_{TR} , 反射跟踪误差 E_{RF} 和 E_{RR} 。其中: E_{DF} 为测试通道定向耦合器的有限方向性;

E_{RF} 为定向耦合器、接收器的频率跟踪误差; E_{SF} 为等效源失配误差。各误差项的“F”表示正向测量、“R”表示反向测量, 正反向各有 6 项误差。

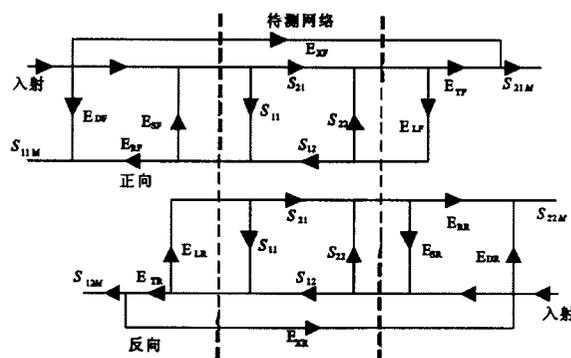


图 1 网络分析仪前向反向 12 项误差模型

根据 12 项误差模型, 由 Mason 法则, 可以得出被测网络包含 12 个误差在内的测量值的解析表达式

$$S_{11M} = E_{DF} + \frac{E_{RF}S_{11X}(1 - E_{LF}S_{22X}) + E_{RF}S_{12X}E_{LF}S_{21X}}{1 - E_{SF}S_{11X} - E_{LF}S_{22X} + E_{SF}S_{11X}E_{LF}S_{22X} - E_{SF}S_{12X}E_{LF}S_{21X}} \quad (1)$$

$$S_{21M} = E_{XF} + \frac{E_{TF}S_{21X}}{1 - E_{SF}S_{11X} - E_{LF}S_{22X} + E_{SF}S_{11X}E_{LF}S_{22X} - E_{SF}S_{12X}E_{LF}S_{21X}} \quad (2)$$

$$S_{22M} = E_{DR} + \frac{E_{RR}S_{11X}(1 - E_{LR}S_{22X}) + E_{LR}S_{12X}E_{RR}S_{21X}}{1 - E_{LR}S_{11X} - E_{SR}S_{22X} + E_{SR}S_{11X}E_{LR}S_{22X} - E_{SR}S_{12X}E_{LR}S_{21X}} \quad (3)$$

$$S_{21M} = E_{XR} + \frac{E_{TR}S_{21X}}{1 - E_{LR}S_{11X} - E_{SR}S_{22X} + E_{SR}S_{11X}E_{LR}S_{22X} - E_{SR}S_{12X}E_{LR}S_{21X}} \quad (4)$$

通过 SOLT 法, 即开路器、断路器、匹配器、直通法, 可以得到 12 项误差和校准值。开率理想校准件特性的情况下, SOLT 校准方法设理想的断路器反射为 -1, 理想的开路器反射为 1, 理

想的匹配负载反射为 0, 直通时反射为 0 传输为 1, 由此可以得到 12 项误差值, 校准值的求解过程就是校准过程。校准值与测量值之间的关系用 12 项误差项表示如式 (5) ~ (8) 所示

$$S_{11X} = \frac{\left[\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \left(1 + \frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} E_{SR} \right) - \left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} \right]}{D} \quad (5)$$

$$S_{22X} = \frac{\left[\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \left(1 + \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} E_{SF} \right) - \left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LR} \right]}{D} \quad (6)$$

$$S_{21X} = \frac{\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left[1 + \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} (E_{SR} - E_{LF}) \right]}{D} \quad (7)$$

$$S_{12X} = \frac{\left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) \left[1 + \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} (E_{SF} - E_{LR}) \right]}{D} \quad (8)$$

其中

$$D = \left(1 + \frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} E_{SF} \right) \left(1 + \frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} E_{SR} \right) - \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) \left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) E_{LF} E_{LR}$$

2.2 带延伸线的网络分析仪自校准分析

实际测试过程中, 由于测量的需求在网络分析仪的端口加有一段延伸线, 以网络分析的 1 端口带有延伸线进行分析, 延伸线的散射参数网络为 S, 带有延伸线的网络分析仪自校准分析仪误差图如图 2 所示。图中虚线之间部分为待测的双端口网络, 其 S 参数为 S_{11X} 、 S_{22X} 、 S_{12X} 和 S_{21X} , 图 1

中的 S_{11M} 、 S_{22M} 、 S_{12M} 和 S_{21M} 为被测网络的测量值。图 2 (a) 是正向测量 S_{11X} 和 S_{21X} 时的误差模型, 图 2 (b) 是反向测量 S_{12X} 和 S_{22X} 时的误差模型。图 2 中各误差项的第二个脚标“F”表示正向测量、“R”表示反向测量, 正反向各有 6 项误差, 共 12 项误差。

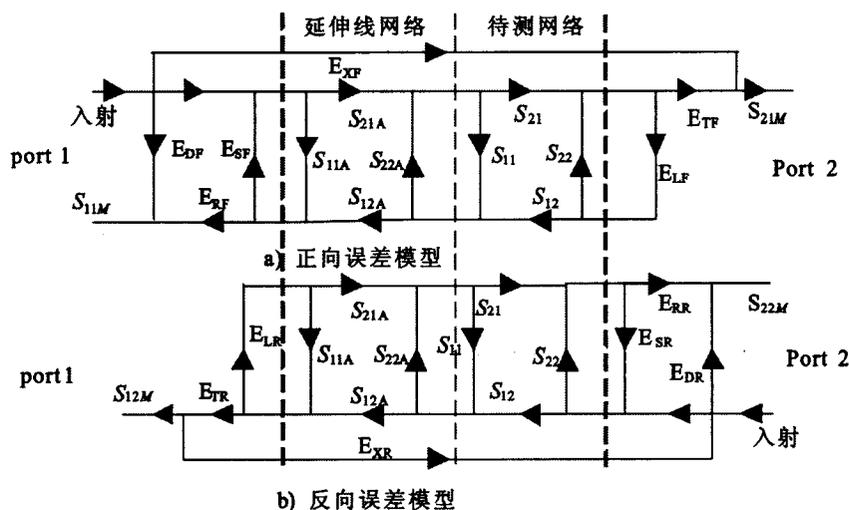


图 2 带有延伸线的网络分析仪前向后向 12 项误差模型

根据 Mason 公式, 得出带有延伸线的被测网络包含 12 个误差在内的测量值的解析表达式

$$S_{11M} = E_{DF} + E_{RF} \frac{(E_{LF} \det(S_X) + S_{11X}) \det(S_A) + S_{11A} (1 - E_{LF} S_{22X})}{1 - E_{LF} S_{22X} - S_{22A} (E_{LF} \det(S_X) + S_{11X}) - E_{SF} [(E_{LF} \det(S_X) + S_{11X}) \det(S_A) + S_{11A} (1 - E_{LF} S_{22X})]} \quad (9)$$

$$S_{11M} = E_{DR} + E_{RR} \frac{(E_{LR} \det(S_A) + S_{22A}) \det(S_X) + S_{22X} (1 - E_{LR} S_{11A})}{1 - E_{SR} S_{22X} - S_{22A} (E_{SR} \det(S_X) + S_{11X}) - E_{LR} [(E_{SR} \det(S_X) + S_{11X}) \det(S_A) + S_{11A} (1 - E_{SR} S_{22X})]} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S_{21M} = & E_{XF} + S_{21A} S_{21X} E_{TF} / (1 - E_{SF} S_{11A} - S_{11X} S_{22A} - S_{22X} E_{LF} \\ & - E_{SF} S_{21A} S_{11X} S_{12A} - E_{SF} S_{21A} S_{21X} E_{LF} S_{12X} S_{12A} - \\ & S_{22A} S_{21X} E_{LF} S_{12X} + S_{22A} S_{11A} E_{SF} S_{11X} + E_{SF} S_{11A} S_{11X} S_{22A} \\ & + S_{11X} S_{22A} S_{22X} E_{LF} + E_{SF} S_{11A} S_{11X} S_{22A} S_{12X} E_{LF} \\ & + E_{SF} S_{21A} S_{11X} S_{12A} S_{22X} E_{LF} - E_{SF} S_{11A} S_{11X} S_{22A} S_{22X} E_{LF}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S_{12M} = & E_{XR} + S_{12A} S_{12X} E_{TR} / (1 - E_{LR} S_{11A} - S_{11X} S_{22A} - S_{22X} E_{SR} \\ & - E_{LR} S_{21A} S_{11X} S_{12A} - E_{LR} S_{21A} S_{12X} E_{SR} S_{12X} S_{12A} - \\ & S_{22A} S_{21X} E_{SR} S_{12X} + S_{22A} S_{11A} E_{LR} S_{11X} + E_{SR} S_{11A} S_{22X} S_{22A} + \\ & S_{11A} S_{22X} E_{LR} E_{SR} + E_{LR} S_{21A} S_{11X} S_{12A} S_{22X} E_{SR} + \\ & E_{LR} S_{11A} S_{22A} S_{21X} S_{12X} E_{SR} - E_{LR} S_{11A} S_{11X} S_{22A} S_{22X} E_{SR}) \end{aligned} \quad (12)$$

其中：

$$S_A = \begin{bmatrix} S_{11A} & S_{12A} \\ S_{21A} & S_{22A} \end{bmatrix}, \quad \det(S_A) = S_{21A} S_{12A} - S_{11A} S_{22A}, \quad \det(S_X) = S_{21X} S_{12X} - S_{11X} S_{22X}$$

通过上述方程反算得到被测量的“真实值”，即校正值 S_{11X} 、 S_{22X} 、 S_{12X} 和 S_{21X} 的表达式：

$$S_{11X} = \frac{\left[\frac{S_{11M} - E'_{DF}}{E'_{RF}} \left(1 + \frac{S_{22M} - E'_{DR}}{E'_{RR}} E'_{SR} \right) - \left(\frac{S_{21M} - E'_{XF}}{E'_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E'_{XR}}{E'_{TR}} \right) E'_{LF} \right]}{D'} \quad (13)$$

$$S_{22X} = \frac{\left[\frac{S_{22M} - E'_{DR}}{E'_{RR}} \left(1 + \frac{S_{11M} - E'_{DF}}{E'_{RF}} E'_{SF} \right) - \left(\frac{S_{21M} - E'_{XF}}{E'_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E'_{XR}}{E'_{TR}} \right) E'_{LR} \right]}{D'} \quad (14)$$

$$S_{21X} = \frac{\left(\frac{S_{21M} - E'_{XF}}{E'_{TF}} \right) \left[1 + \frac{S_{11M} - E'_{DF}}{E'_{RF}} (E'_{SR} - E'_{LF}) \right]}{D'} \quad (15)$$

$$S_{12X} = \frac{\left(\frac{S_{12M} - E'_{XR}}{E'_{TR}} \right) \left[1 + \frac{S_{11M} - E'_{DF}}{E'_{RF}} (E'_{SF} - E'_{LR}) \right]}{D'} \quad (16)$$

其中：

$$D' = \left(1 + \frac{S'_{11M} - E'_{DF}}{E'_{RF}} E'_{SF}\right) \left(1 + \frac{S'_{22M} - E'_{DR}}{E'_{RR}} E'_{SR}\right) - \left(\frac{S'_{12M} - E'_{XR}}{E'_{TR}}\right) \left(\frac{S'_{21M} - E'_{XF}}{E'_{TF}}\right) E'_{LF} E'_{LR}$$

$$E'_{XF} = E_{XF}, E'_{DR} = E_{DR}, E'_{XR} = E_{XR}, E'_{RR} = E_{RR}, E'_{SR} = E_{SR}$$

$$E'_{DF} = E_{DF} + S_{11A} E_{RF} / (1 - S_{11A} E_{SF}), E'_{RF} = E_{RF} S_{12A} S_{21A},$$

$$E'_{SF} = 1 - (1 - S_{22A} - E_{SF} \det(S_A) - E_{SF} S_{11A}) (1 - E_{SF} S_{11A}),$$

$$E'_{LF} = [E_{LF} S_{22A} + E_{SF} S_{11A} + E_{LF} E_{SF} \det(S_A)] / E'_{SF},$$

$$E'_{TF} = E_{TF} S_{21A}, E'_{TR} = E_{TR} S_{12A}, E'_{LR} = E_{LR} \det(S_A) + S_{22A}$$

与前面所述，通过 SOLT 法得到带有延伸线的网络分析仪的 12 项新误差，从而得到校准值 S_{11X} 、 S_{22X} 、 S_{12X} 和 S_{21X} 。

3 带有延伸线网络分析仪不同自校准面对测量结果影响分析

当延伸线较为理想时^[4]，可以把延伸线引入的误差作为网络分析仪的内部 12 项误差，通过在延伸线端口进行 SOLT 校准，消除延伸线的影响。在 HPM 等外场试验过程中，常常需要使用较长的电缆作为延伸线用于信号的测量。

实验过程中，以步进衰减器模拟长电缆，衰减器的衰减量改变模拟不同损耗的延伸线。在衰减器端口进行 SOLT 校准。实验使用 N5244A 网络分析仪、校准件为 85054B，使用安捷伦 (0~11) dB 及 (0~110)dB 组合步进衰减器作为延伸线，并在延伸线端口完成校准，被测件为 10dB 固定衰减器。随着步进衰减器的衰减量增加，校准后固定衰减器一端口（连接延伸线的端口）反射系数测量值变化如图 3 所示，校准后固定衰减器的 S_{12} 变化如图 4 所示。

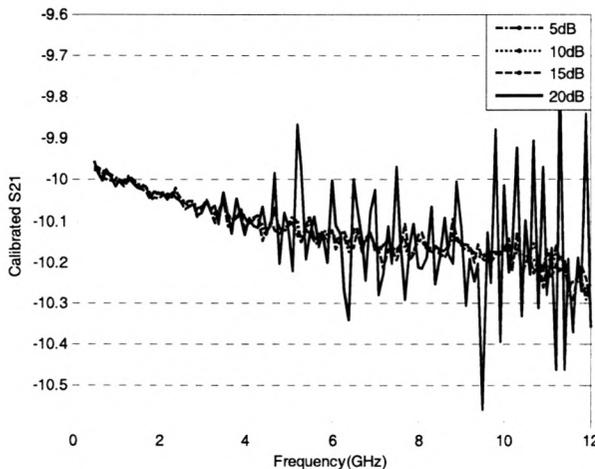


图 3 固定衰减器 S21 测量值随着延伸线衰减量变化

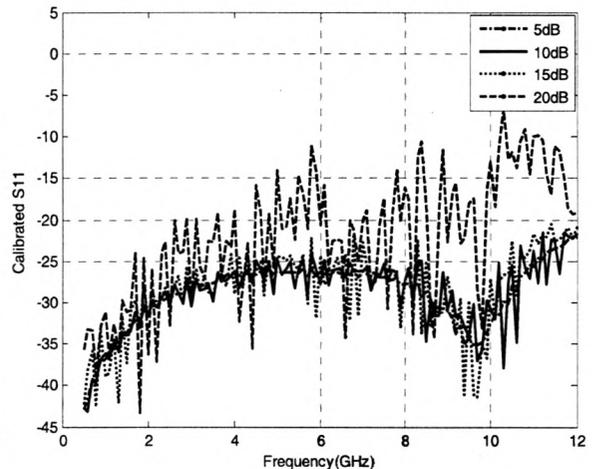


图 4 固定衰减器 S11 测量值随着延伸线衰减量变化

从 S_{11} 图变化可知, 随着延伸线衰减量增加, 端口反射增加, 并且随着频率升高, 反射系数变大; 从 S_{21} 图变化可知, 当延伸线衰减量小于 15dB 时, 当测量 10dB 的固定衰减器时, 网络分析仪的动态范围虽然有所降低, S_{21} 受延伸线变化影响较小, 当延伸线衰减量较大时, 严重降低网络分析仪的动态范围, S_{21} 受延伸线影响变化较大, 并且在高频段, 受影响变化较为明显。因此实验测量过程中使用的长电缆由于具有较大的衰减, 严重降低网络分析仪的动态范围, 影响测量结果的精确度。

网络分析仪虽然在测量被测件之前进行全二端口校准, 但是网络分析仪内部的系统误差是不可能完全消除的, 系统存在剩余误差^[5-9]。拟从带有延伸线网络分析仪校准后剩余误差角度分析评定延伸线引入的不确定度分析对测量结果的影响。

3 剩余误差及不确定度分析

3.1 网络分析仪自校准后剩余误差分析

剩余误差是指网络分析仪进行 12 项误差校准后虽然得到正反方向的误差, 但是由于开口、短路和匹配负载校准件的设计上存在一定的缺陷, 其真实的 S 参数和理想值存在一定的误差, 因此, 并没有完全修正网络分析仪的各项误差, 使得剩余误差存在。根据欧洲国家计量院协会 Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysis 文献^[10,11], 在网络分析仪不确定的分析评定中, 由于剩余误差项中的剩余方向性误差和

剩余匹配误差对校准不确定的影响较大, 因此在确定度评定的过程中只考虑该两项剩余误差。

剩余方向性误差和剩余失配误差的测量采用“Ripple”技术来实现, 测量原理框如图 5 所示。

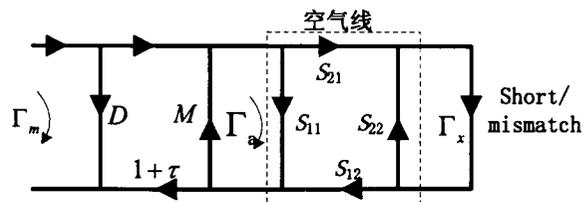


图 5 剩余方向性误差和剩余失配误差测量原理框图

根据图 5 原理框图, 得到端口测量反射系数 Γ_m 与空气线端口反射系数 Γ_a 之间关系如式 17 所示, 一般认为剩余方向性误差 D , 剩余失配误差 M , 以及反射跟踪误差 τ 较小, 因此可以根据泰勒级数展开得到如下关系。

$$\begin{aligned} \Gamma_m &= D + (1+\tau) \Gamma_a / (1 - M\Gamma_a) \\ &= D - (1+\tau) \Gamma_a + M (1+\tau) \Gamma_a^2 \end{aligned} \quad (17)$$

当精密空气线一端与失配负载连接 (反射系数为 0.1~0.2), 并且精密空气线另一端口连接已经完成校准的网络分析仪此时端口测量得到的反射系数为

$$\Gamma_m = D - (1+\tau) \Gamma_x e^{-j2\omega l/v} + M (1+\tau) \Gamma_x^2 e^{-j4\omega l/v} \quad (18)$$

因为失配负载的反射系数为 0.1~0.2, 因此可以不考虑 Γ_x^2 所在项带来的影响, 同时不考虑不考虑剩余跟踪误差 τ , 即 $(1+\tau)=1$ 则此时可知:

$D \gg \Gamma_x$, 则此时端口反射系数测量结果的波动幅值的一半为 D , 即剩余方向性误差;

$D \ll \Gamma_x$, 则此时端口反射系数测量结果的波动幅值的一半为 Γ_x , 此时测量结果为失配负载的端口反射系数。

实际测量过程中, 校准后的网络分析仪端口依次连接精密空气线 (性能良好) 和不匹配负载 (一般选择其反射系数在 0.1~0.2 之间), 此时

测得端口的反射 (线性) 随频率呈现波动状态, 剩余方向性误差 D 即为波动幅值的一半 (0.5* (上包络值-下包络值))。端口反射系数测量值的波动数量与精密空气线的长度有关, 一般 300mm 的精密空气线波动的周期为 500MHz, 100mm 的精密空气线波动周期为 1500MHz, 精密空气线的长度决定着剩余误差分析的频率下限, 一般若分析 1GHz 以下频段的剩余方向性误差最好选用 300mm 的精密空气线。当频段比较宽时, 可采用多频段的方式分析, 分别采用不同长度的精密空气线进行测量。

剩余失配误差测量与剩余方向性误差测量方向相同，只是用短路校准件替换剩余方向性误差测量中的失配负载。当精密空气线一端口连接短路负载，精密空气线另一端口连接已经完成校

准的网络分析仪时，此时端口测量得到的反射系数如式(19)所示。

假设不考虑精密空气线的传输损耗，并且短路校准的端口反射为-1，则得到

$$\Gamma_m = D - (1+\tau) e^{-j2\omega l/v} + M (1+\tau) e^{-j4\omega l/v} \quad (19)$$

从而得到 $\Gamma_{m,max}$ 为 $D - (1+\tau)(1-M)$ ， $\Gamma_{m,min}$ 为 $D - (1+\tau)(1+M)$ ，若不考虑剩余跟踪误差 τ ，即 $(1+\tau)=1$ ，则得到 $M = (\Gamma_{m,max} - \Gamma_{m,min})/2$ ，即剩余匹配误差 M 为此时测量结果波动幅值的一半。剩余匹配误差 M 的测量和剩余方向性误差 D

的测量方法类似，其端口校准后依次连接精密空气线和短路器，此时端口反射系数的测量值亦成波动状态，剩余匹配误差 M 即为波动幅值的一半。

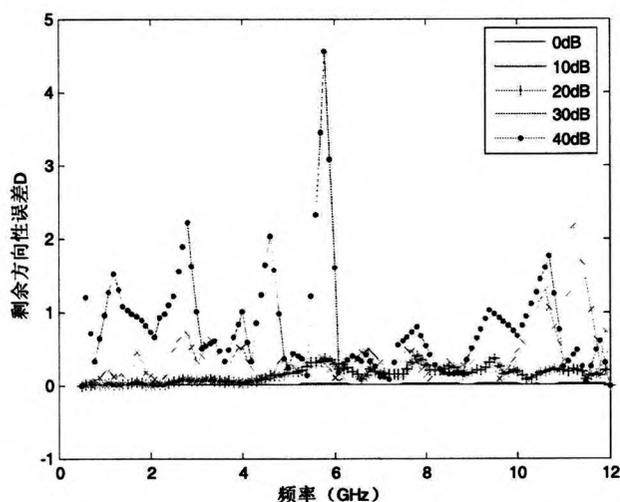


图6 剩余方向性误差随延伸线衰减量变化

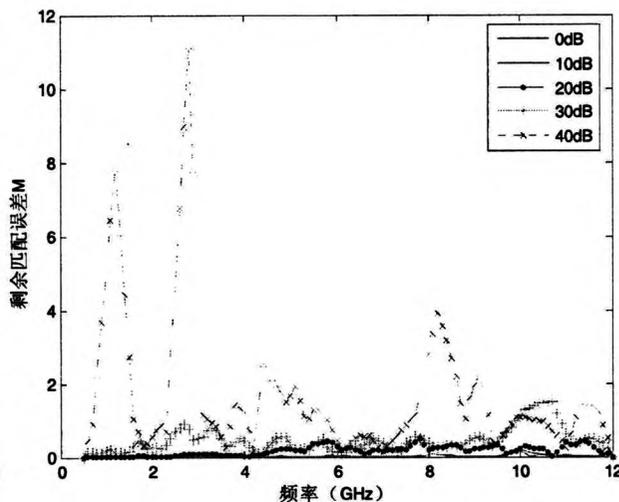


图7 剩余匹配误差随延伸线衰减量变化

实验过程中，改变网络分析仪端口的延伸线衰减量，得到网络分析仪端口延伸线从 0dB 变化至 40dB 过程中，各不同延伸端口剩余匹配误差和剩余方向性误差变化如图 6 所示。剩余方向性误差随着延伸线衰减量的变化如图 7 所示，从图中可以看出，随着延伸线衰减量的增大，网络分析仪自校准后的剩余方向性误差变大，当网络分析仪延伸线的衰减量大于 20dB 时，剩余方向性误差急剧增大，从一个方面导致网络分析仪的自校准后不确定度增大。剩余匹配误差随着延伸线衰减量的变化如图 7 所示，从图中可以看出，随着延伸线衰减量的增大，网络分析仪自校准后的剩余匹配误差变大，当网络分析仪延伸线的衰减量大于 20dB 时，剩余匹配误差急剧增大，进一步导致网络分析仪的自校准后不确定度增大。

3.2 网络分析仪不同校准面自校准后不确定分析

1) 网络分析仪不同校准面自校准后反射参数不确定度分析

基于 Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysis 文献进行二端口反射参数和传输参数不确定度进行分析。二端口网络分析仪校准后的端口反射系数不确定度合成见式(20)

$$U_{VRC} = D + T\Gamma + M\Gamma^2 + R_{VRC} + S_{21}^2\Gamma_L \quad (20)$$

式中， Γ ——测试端口校准后测量得到的反射系数； D ——剩余方向性误差； M ——剩余源端口匹配误差； T ——剩余跟踪误差和非线性的估计值； R_{VRC} ——随机不确定度； S_{21} ——校准后测量得到的传输系数； Γ_L ——另一端口剩余匹配误差（一般较小为 0.01~0.02）。

基于上述实验进行端口反射剩余误差分析, 剩余方向性误差 D 测量使用 300mm 的 18N50 精密空气线(空气线一头为 N 型接头另一头为 7mm 接头), 连接 Maury2611E 型号 7mm 接头的失配

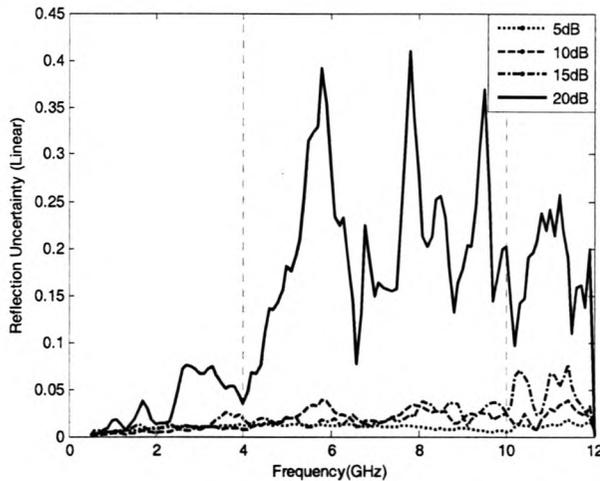


图 8 反射参数不确定度随延伸线衰减量变化

延伸线端口反射系数的不确定 U_{VRC} 随着延伸线衰减量变化如图 8 所示。从图中可以看出, 当延伸线衰减量小于 5dB 时, U_{VRC} 较小约为 0.025 左右; 当延伸线衰减量 (10dB、15dB 时) 不断增大时, U_{VRC} 不断变大, 尤其是当延伸线衰减量大于 15dB 时, 剩余误差 U_{VRC} 急剧增加, 测量结果不确定度较大。

2) 网络分析仪不同校准面自校准后传输参数不确定度分析

基于 Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysis 文献, 二端口网络分析仪校准后的端口反射系数不确定度合成公式

$$U_{TM} = L + M_{TM} + I + R_{dB} \quad (21)$$

式中, L ——测量系统的线性偏差; M_{TM} ——由于失配导致的计算误差项; I ——串扰误差测量值; R_{dB} 代表随机不确定度。

M_{TM} 是由于失配导致的计算误差项, 计算公式如下

$$M_{TM} = 20 \log_{10} \frac{1 + |MS_{11}| + |\Gamma_L S_{22}| + |MS_{11} \Gamma_L S_{22}| + |MS_{21} \Gamma_L S_{12}|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (22)$$

负载, 其端口驻波为 1.5, 测得端口反射系数, 得到剩余方向性误差。剩余匹配误差 M 测量使用 18N50 精密空气线和 85050C 型号的 7mm 短路校准件进行测量。

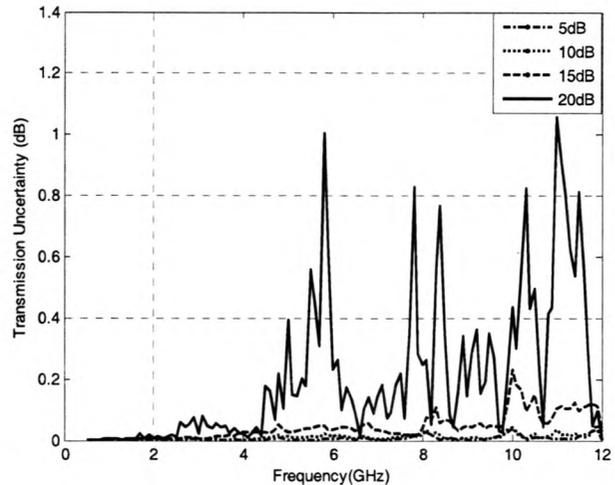


图 9 传输参数不确定度随延伸线衰减量变化

基于上述实验, 延伸线传输参数的不确定 U_{TM} 随着延伸线衰减量变化如图 9 所示。从图中可以看出, 当延伸线衰减量小于 5dB 时, U_{TM} 较小约为 (0.05~0.1)dB 左右; 当延伸线衰减量 (10dB、15dB 时) 不断增大时, U_{TM} 不断变大, 尤其是当延伸线衰减量大于 15dB 时, 剩余误差 U_{TM} 急剧增加, 测量结果不确定度较大, 并且随着频率的增大 U_{TM} 随之增加。

4 结束语

上述实验分析了延伸线端口反射系数的不确定 U_{VRC} 和延伸线传输参数的不确定 U_{TM} 随着延伸线衰减量变化。综上所述, 延伸线端口反射系数和延伸线传输参数的不确定都随着延伸线衰减量的增加而增加, 通过实验得到网络分析仪校准面延伸线的相关结论。

1) 网络分析仪延伸线衰减量小于 10dB 时, 延伸线端口反射系数的不确定 U_{VRC} 小于 0.05, 延伸线传输参数的不确定 U_{TM} 小于 0.1dB, 测量结果较准确, 当网络分析仪延伸线衰减量大于 20dB 时, 网络分析仪的动态范围急剧下降, 测量结果不确定度较大, 测量结果准确度较低;

2) 带有延伸线的网络分析仪测量不确定度和网络分析仪的参数设置密切相关。测量不确定度随着中频带宽的增大而增大;随着网络分析仪端口输入功率的降低,网络分析仪的动态范围下降,测量不确定亦增大。在测量条件的允许的条件下,尽量选择 100Hz~1kHz 左右的中频带宽。

网络分析仪延伸面改变实际是由于延伸线衰减量的存在,使网络分析仪的动态范围下降,表现为校准后测量不确定度的增加。以性能较为良好某型号电缆为例,电缆长度为 60m 时,其衰减量为 10dB 左右,在实际测量中需慎重考虑延伸线的长度,优化网络分析仪各参数设置,尽量提高网络分析的动态范围,保证测量结果的正确性。

参考文献

- [1] 矢量网络分析仪误差模型及校正理论研究[D].侯政嘉.电子科技大学硕士学位论文,2005,3.
- [2] 矢量网络分析仪校准误差分析[J].陈涛.微波学报,2010,8: 592-594.
- [3] 矢量网络分析仪的广义二端口校正方法[J].秦红波,赵伟,任获荣等.华中科技大学学报,2010,12:32-35.
- [4] 矢量网络分析仪的端口延伸和去嵌入功能的研究[J].段飞,赵学强,曹志英.科技信息,2011,11 :495-843.
- [5] Determination of the Complex Residual Error Parameters of a Calibrated One-Port Vector Network Analyzer. Gerd Wübbeler, Clemens Elster, Thomas Reichel IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 58, NO. 9, SEPTEMBER 2009 3238-3244.
- [6] Determination of complex residual error parameters of a calibrated vector network analyzer, G. Wübbeler, C. Elster, T. Reichel, and R. Judaschke, Proc. 69th ARFTG Conf, Jun. 2007.
- [7] Method for measuring the residual system directivity and/or the residual system port impedance match of a system-calibrated vector network analyser .T. Reichel and H. Jäger, Eur. Patent 1 483 593 B1, Jun. 21.2006.
- [8] N. M. Ridler and M. J. Salter , “An approach to the treatment of uncertainty in complex S-parameter measurements”, Metrologia, vol. 39, pp. 295-302, 2002.
- [9] Residual error models for the SOLT and SOLR VNA calibration algorithms [J]. J. Stenarson and K. Yhland . ARFTG Conference,2007 6 8-8 June 2007 .
- [10]P. Persson, “An algorithm for the evaluation of the residual directivity ‘ripple’ trace,” ANAMET, Middlesex, U.K., ANAMET Report 034,May 2002.
- [11]Guidelines for the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA),May 2000, EA—European Cooperation Accreditation. EA-10/12.

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(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>