

加速微波自动网络分析仪 误差模型处理的编程方法

邱正安 教授 山东大学电子工程系 250100

摘要：本文提出了一种新的加速微波自动网络分析仪(8410C)误差模型处理的编程方法。在编程过程中，用误差模型的显式矩阵表示法代替传统的信号流图表示法。与原有的处理程序相比，该方法使程序代码总量减少约25%，运算速度提高约20%，不仅提高了微波网络分析仪的测量速度，也改善了测量精度。

关键词：网络分析仪 误差模型 矩阵表示法

一、引言

微波自动网络分析仪(8410C)在计算机的控制下能自动改变测试频率，选择测试参数，并能根据在校准过程中确定下来的系统误差对测得数据进行修正，给出精度较高的S--参数。

在自动网络分析仪扫频测量的过程中，在每个规定的频率点上虽然不能像固定点频测量那样用阻抗匹配器之类的调整装置将某些误差参数消除，但可预先用若干标准器件(例如，短路器、开路器、匹配器等)对系统进行校准，得出足够数目的关系式，再利用程序解出所包含的那些主要系统误差的复数值，从而计算出精度较高的S--参数。由于原有的计算程序是根据传统的信号流图表示式编写的，误差参数都是隐含在表示式当中的，因此计算程序非常繁琐冗长。本文根据误差模型的显式矩阵表示法进行编程，简捷方便，减小了编程工作量，加快了运算速度，也提高了精度。

二、误差模型的显式矩阵表示式

文献[3.4]给出的误差模型如图(1a)、(1b)所示，每个模型包括六项误差。整个S--参数测试模型称为十二项误差模型。

图中参数的下标‘₁₁’表示方向性误差，下标‘₀₁’表示反射测量频率跟踪误差，下标‘₁₁’表示源反射误差，下标‘₂₂’表示负载端反射误差，下标‘₂₁’表示测试通道和参考通道之间的频率跟踪误差，下标‘₃₀’表示通道之间的泄漏误差。

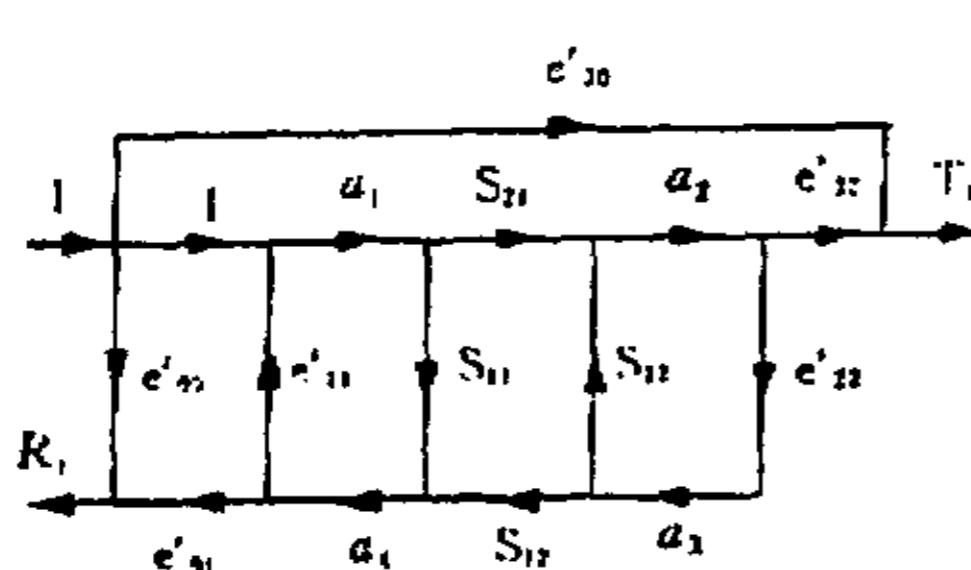


图1(a) 测 S_{11} , S_{12} 的误差模型

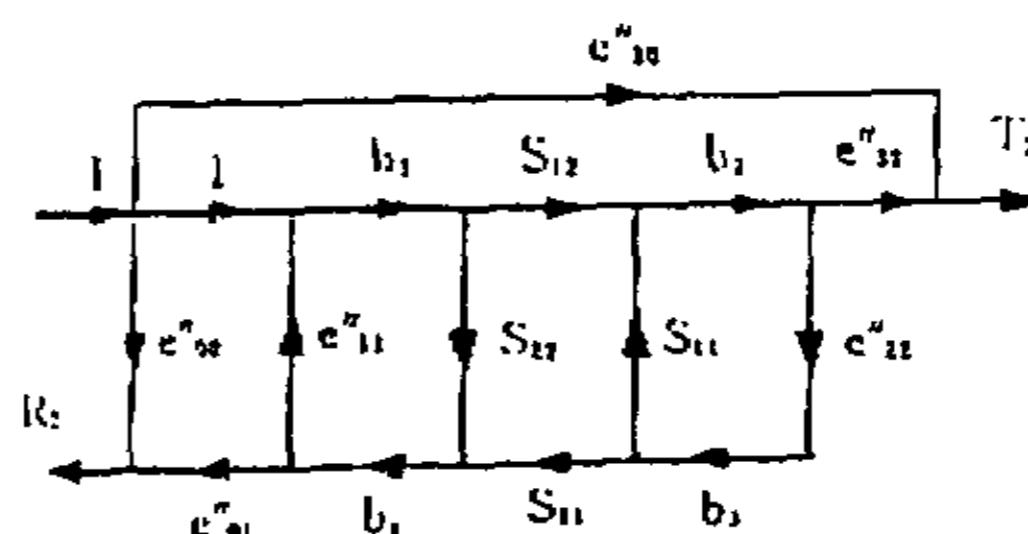


图1(b) 测 S_{21} , S_{22} 的误差模型

以图1(a)为例给出误差模型的矩阵表示法。整个模型可视为由被测网络和两个误差网络组成。误差参数也可作为散射参数处理。根据散射矩阵的定义，这两个误差网络的散射矩阵表达式分别为：

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e'_{00} & e'_{01} \\ 1 & e'_{01} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$\begin{bmatrix} a_3 \\ T_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e'_{22} & 0 \\ e'_{32} & e'_{30} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1b)$$

被测网络的散射矩阵为：

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + e'_{11}a_4 \\ e'_{22}a_2 \end{bmatrix} \quad (1c)$$

同样可得到图(1b)所示误差模型的三个散射矩阵表达式：

$$\begin{bmatrix} R_2 \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e''_{00} & e''_{01} \\ 1 & e''_{01} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\begin{bmatrix} b_3 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e''_{22} & 0 \\ e''_{32} & e''_{30} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\begin{bmatrix} b_2 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e''_{22}b_2 \\ 1 + e''_{11}b_4 \end{bmatrix} \quad (2c)$$

由式(1c)、(2c)可以得到考虑到两个模型后，被测网络散射参数的矩阵表达式：

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 & b_2 \\ a_2 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + e'_{11}a_4 & e''_{22}b_2 \\ e'_{22} & 1 + e''_{11}b_4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

由上式立即可以得到S--参数的显式表达式如下：

$$S_{11} = \frac{a_4(1 + e''_{11}b_4) - e'_{22}a_2b_2}{D_1} \quad (4a)$$

$$S_{12} = \frac{b_2(1 + e'_{11}a_4) - e'_{22}a_4b_2}{D_1} \quad (4b)$$

$$S_{21} = \frac{a_2(1 + e''_{11}b_4) - e'_{22}a_2b_4}{D_1} \quad (4c)$$

$$S_{22} = \frac{b_4(1 + e'_{11}a_4) - e''_{22}a_4b_2}{D_1} \quad (4d)$$

其中 $D_1 = (1 + e'_{11}a_4)(1 + e''_{22}b_4) - a_2b_2e'_{22}e''_{22}$

这个模型包括所有的误差参数，适合于任意微波网络的测量。当被测网络不包括铁氧体等各向异性材料时， $e'_{11} = e''_{11}$ 、 $e'_{22} = e''_{22}$ ，S—参数显式解为：

$$S_{11} = \frac{a_4(1+e''_{11}b_4) - e'_{11}a_2b_2}{D_2} \quad (5a)$$

$$S_{12} = \frac{b_2}{D_2} \quad (5b)$$

$$S_{21} = \frac{a_2}{D_2} \quad (5c)$$

$$S_{22} = \frac{b_4(1+e'_{11}a_4)}{D_2} \quad (5d)$$

其中 $D_2 = (1+e'_{11}a_4)(1+e''_{11}b_4) - e'_{11}e''_{11}a_2b_2$

有些测试系统，一次只能测 S_{11} 、 S_{21} ，要测 S_{22} 、 S_{12} 时需要人工将被测器件反向，此时误差参数满足 $e'_{00} = e''_{00} = e_{00}$ ； $e'_{01} = e''_{01} = e_{01}$ ； $e'_{11} = e''_{11} = e_{11}$ ； $e'_{22} = e''_{22} = e_{22}$ 。

$e'_{32} = e''_{32} = e_{32}$ ； $e'_{31} = e''_{31} = e_{31}$ 将这些参数代入(4a—4d)式得到 S—参数的简化表达式为

$$S_{11} = \frac{a_4(1+e_{11}b_4) - e_{22}a_2b_2}{D_3} \quad (6a)$$

$$S_{12} = \frac{b_2(1+e_{11}a_4) - e_{22}a_4b_2}{D_3} \quad (6b)$$

$$S_{21} = \frac{a_2(1+e_{11}b_4) - e_{22}a_2b_4}{D_3} \quad (6c)$$

$$S_{22} = \frac{b_4(1+e_{11}a_4) - e_{22}a_4b_2}{D_3} \quad (6d)$$

其中 $D_3 = (1+e_{11}a_4)(1+e_{11}b_4) - e''e''a_2b_2$ ，以上结果与文献[5,6]采用信号流图法导出的结果完全符合。

三、校准步骤及计算公式：

使用三个标准器件，利用两个模型分别测试六次，可以完全确定误差模型中的十二个误差参数。三个标准器件为全匹配标准负载(或滑动负载)，短路器和电长度不同的另一短路(开路)

器。由图(1a)、(1b)可以得到确定 $e'_{00} - e'_{22}$ 的六个标准公式。

(1)、接匹配负载($a_4 = 0$)测反射, 由(1a)式得到 $M_1 = e'_{00}$

(2)、无传输连接($a_2 = a_3 = 0$)测传输, 由(1b)式得到 $M_2 = e'_{30}$

(3)、接短路($a_4/a_1 = -1$)测反射, 由(1a)式得到 $M_3 = e'_{00} - \frac{e'_{01}}{1 + e'_{11}}$

(4)、接不同电场度的短路(开路)器, 设它的反射系数为 Γ_s ($\Gamma_s = a_4/a_1$) 测反射, 由(1a)式得

$$\text{到 } M_4 = e'_{00} + \frac{e'_{01}\Gamma_s}{1 - e'_{11}\Gamma_s}$$

(5)、直接连接($a_1 = a_2, a_3 = a_4$)测反射, 由(1a)式 得到 $M_5 = e'_{00} + \frac{e'_{01}e'_{22}}{1 - e'_{11}e'_{22}}$

(6)、直接连接($a_1 = a_2, a_3 = a_4$)测传输, 由(1b)式得到 $M_6 = e'_{30} + \frac{e'_{32}}{1 + e'_{11}e'_{22}}$

其中 $M_1 - M_6$ 为与 R_1, R_2, T_1, T_2 对应得测得值, 由此可以解出 $e'_{00} - e'_{32}$ 六个误差参数。

$$e'_{01} = M_1, \quad e'_{30} = M_2$$

$$e'_{01} = \frac{(1 + \Gamma_s)(M_1 - M_3)(M_1 - M_4)}{\Gamma_s(M_3 - M_4)}, \quad e'_{11} = \frac{\Gamma_s(M_1 - M_3)(M_1 - M_4)}{\Gamma_s(M_3 - M_4)}$$

$$e'_{22} = \frac{(1 + \Gamma_s)(M_3 - M_4) + (M_3 - M_1)}{[\Gamma_s(M_1 - M_3) - (M_1 - M_4)](M_3 - M_4)}, \quad e'_{32} = \frac{(M_1 - M_4)(M_6 - M_2)}{M_3 - M_4}$$

$$e''_{00} = N_1, \quad e''_{30} = N_2$$

$$e''_{01} = \frac{(1 + \Gamma_s)(N_1 - N_3)(N_1 - N_4)}{\Gamma_s(N_3 - N_4)}, \quad e''_{11} = \frac{\Gamma_s(N_1 - N_3) + (N_1 - N_4)}{\Gamma_s(N_3 - N_4)}$$

$$e''_{22} = \frac{\Gamma_s(N_3 - N_4) + (N_3 - N_1)}{[\Gamma_s(N_1 - N_3) + (N_1 - N_4)](N_3 - N_4)}, \quad e''_{32} = \frac{(N_1 - N_4)(N_6 - N_2)}{N_3 - N_4}$$

其中 N_1 — N_6 是测得值, 这些结果和文献[3,6]是一致的。测试系统一般满足某些条件, 利用这些条件可以简化误差模型。例如, 两个通道之间的泄漏预测式通道相比一般小于-90dBm, 因此 e'_{30}, e''_{30} 的影响可以忽略不计。最后介人备测期间, 利用两个误差模型分别测反射和传输, 可以得到四个测得值 $M_{r1}, M_{r2}, M_{s1}, M_{s2}$ 。由(1a)、(1b)、(2a)和(2b)式可以得到它们与误差参数的关系式, 并由此解得:

$$a_4 = \frac{M_{r1} - e'_{00}}{e'_{01}}, b_4 = \frac{M_{r2} - e''_{00}}{e''_{01}}, a_2 = \frac{M_{s1} - e'_{30}}{e'_{32}}, b_2 = \frac{M_{s2} - e''_{30}}{e''_{32}}$$

将 a_4, b_4, a_2, b_2 和十二项误差参数代入(3)、(5)或(6)(视测试系统而定), 可以求得精确的 S—参数。

四、结论

采用误差模型的显式矩阵表示法对微波自动网络分析仪的各项测量进行编程, 程序包括 HP8745A、HP8743B 和 HP8746B 三个测试单元模块, 维持原有的测试步骤和点数。与原有的测试程序模块相比, 该方法编程简单明快, 提高了运算速度和测试精度, 同时这些测试程序也适用于十项误差模型, 八项误差模型和四项误差模型校正。

五、参考文献

- [1] Hackbore R.A., "An automatic network analyzer system," *Microwave Journal*, 1966.5, pp45-52.
- [2] Adam S.F., "A precision automatic microwave measurement system," *IEEE Trans. on IM*, no.4, vol.17, 1968.12, pp.308-313.
- [3] Eland B.P., "Developing accuracy specification for automatic network analyzer system," *HP Journal*, no.6, 1970.2, pp.16-19.
- [4] Rehmmark S., "On the calibration process of automatic network analyzer system," *IEEE Trans. on MTT*, no.4, vol.22, 1974.4, pp.475-478.
- [5] Gelnovatch V.G., "A computer program for the direct calibration of two port reflectometers for automatic microwave measurements," *IEEE Trans. on MTT*, no.1, vol.24, 1976.1, pp.45-46.
- [6] 陈世贤编著, "微波测量," 国防工业出版社, 1981。

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量测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悉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悉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>