

射頻元件電氣特性量測及網路分析儀 校正技術簡介

電子所 陳昌昇

一、前言

本文主旨在說明射頻通訊電子元件在電氣特性量測時所需考慮的觀點，藉此引出網路分析儀在高頻量測的重要性。而以網路分析儀實行量測工作之前，尚須考慮量測環境與校正程序對於量測結果的影響；並對此做進一步的探討。文中亦對一般常用之全雙埠校正法做一定性上的說明，以此彰顯校正技術與量測之密切關係。

二、淺談射頻元件電氣特性量測

當電子電路的操作頻率愈來愈高，電子元件的電氣特性就愈難掌握。一般在 VHF(very high frequency, 30~300MHz)以下的電路，其元件尺寸或整體電路尺寸與操作頻率所對應的波長相比約為一比十，即相當於遠小於一波長；且操作電壓都在十伏特左右甚至更低；則可視電路走線(Trace)上的電壓位準(Voltage level)為同時或即時性的。也就是說，在某一定時刻下，電路走線上各點的電壓是相同的。

而在這種狀況下，通常電路元件兩端的電壓也是相同的。此種電路即稱為集總式電路(Lumped circuit)。其電阻、電容、電感等一般常用的電路元件就由元件上頭或資訊表上所標示的特性值來決定。此時只要一個較精細的萬用電表就可以近乎準確地量得元件特性。然而當電路的操作頻率愈來愈高，使得元件尺寸或整體電路尺寸與操作頻率所對應的波長相比大於一比十；則在一定時間下，電路走線上或電路元件兩端的電壓變化不可被忽略時，此時的電路即為分散式(distributed circuit)電路。此電壓變化乃因電路走線上的電感與電容值，或是元件的寄生效應甚至材料特性等，隨操作頻率增加而被突顯出來。因此一條走線不再是一個單純的連接線，元件也不再由一個單純的理想值所決定；而得由許許多多的等效電路來表示。此時便無法用電表量得一個單純的值，而須以較高頻的電磁特性或傳輸線理論(transmission line theory)來加以分析。

三、網路分析儀

分散式電路的特性，除了以電路法則分析外，尚須多考慮類似光學的反射與穿透的觀念；也就是以電磁波能量傳輸的觀點來進行電路或元件的特性量測與分析。一般最常用的量測儀器即為網路分析儀。它是視待測物 (Device Under Test, DUT) 為一整個網路系統，藉由量測其不同頻率下的功率反射係數 (reflected coefficient) 與穿透係數 (transmitted coefficient) 來分析待測物特性。目前一般常用的網路分析儀皆為向量式網路分析儀 (Vector Network Analyzer, VNA)，其與早期的純量網路分析儀相比之特性上差異，為前者可以完整地量測到各個參數的大小值與相位值。

網路分析儀有許多的品牌規格以供給使用單位不同目的需求選擇；本單位常用的有兩台，分別為：以研究為主的 HP-8510C 如(圖一)，以經濟上及作業效率為訴求的 HP-8753E。如(圖二)，在此做簡略的展示，以供讀者參考。



圖一、HP-8510C 網路分析儀



圖二、HP-8753E 網路分析儀

四、量測環境與校正的關係

網路分析儀並不是開機之後接上待測電路或元件就可以直接進行量測。為了能有效的進行量測工作，網路分析儀的量測環境設定與校正程序是非常重要的而且不可或缺。由於實際的量測環境常常並不是單純的僅有網路分析儀，即使如此，量測環境還要依據使用者的需求做不同的頻段或輸出功率等設定才能完整建立。當量測平台除了網路分析儀之外，又接了許多的同軸傳輸線 (Coaxial Cable) 以及不同型式的接頭 (Connector) 或探針 (Probe)，甚至於專為特定待測元件而設計的測試夾具 (test fixture)；則校正工作更是量測之首。如 (圖三) 所示為本單位量測環境之一，由圖中可以看出待測物是置放於量測平台上。從待測物到網路分析儀之間還需要傳輸線、轉接頭、探針等元件連接。而這些元件所產生的效應並不是使用者所想要量取的，因而必須以校正程序扣除，使能真正量得待測物的特性。因

此本文將著重於介紹一般常用的網路分析儀校正方法。



圖三、網路分析儀搭配微探針量測平台之量測環境

當進行一般校正工作時，除了網路分析儀之外，還需要針對不同的接頭或探針等量測元件去搭配不同型態的校正治具(calibration kit)進行校正程序，以符合實際量測環境的需求。如(圖四)所示為本單位常用之校正治具之一。

五、校正的意義

當量測環境決定之後，接著便要實行校正的程序。校正，簡而言之就是歸零的意思。校正的目的即是將儀器從開機後的初始狀態調整到使用者所定義的實際量測環境；也就是要除

去待測物之外的誤差。當吾人從網路分析儀上多接了一條傳輸線到待測物，則要真正地量測到待測物特性的話，就要使用校正程序去扣除傳輸線的特性。由於考慮實際的量測環境而多加上的元件，一般會產生一些功率損耗(Loss)，時間延遲(time delay)或相位偏移(Phase shift)，以及其他如接點不連續面而造成的高階雜散模(High order mode)，阻抗不匹配的反射效應等等。這些為了建構並實行量測所加入的誤差必需在校正時加以扣除。其方法便是對這些誤差量的特性以數學模型表示，並藉由量測參考用的校正治具將數學模型中所有的誤差參數進行計算求解，而得到所需校準的誤差值；此即為校正的理論基礎。其中的校正治具是指：當進行校正程序時所需賴以量測並計算誤差參數的基準電路元件；通常包括開路基準(Open standard)、短路基準(Short standard)、負載或匹配基準(Load standard, Match)以及穿透或線基準(Thru standard, Lines)等元件。

校正本身還由許多種不同的數學模型決定校正程序；常見的校正法有：單埠校正法(1-port calibration)、全雙埠校正法(Full two-port calibration)、穿透-反射-線方法(Thru-Reflect-Line, 簡稱為TRL校正法)、線-反射-匹配(Line-Reflect-Match, 簡稱為LRM校正法)...等方法。當然還有其他為特殊目

的而發展的校正方法或研究中的新方法；而由於篇幅的限制，在此僅簡單介紹一種常用的校正方法-全雙埠校正法以供讀者參考。

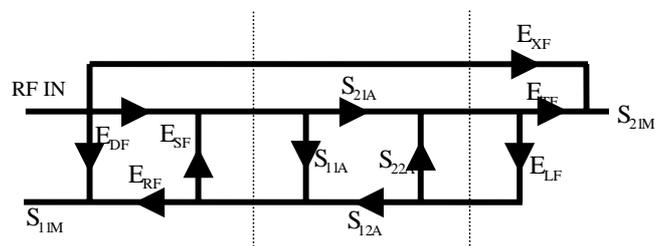


圖四、HP-85056A 網路分析儀校正治具

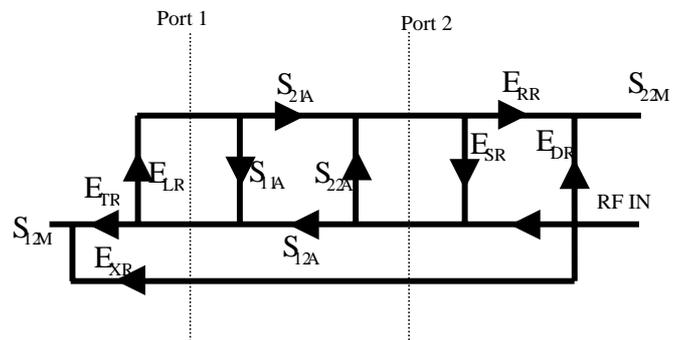
六、全雙埠校正法

全雙埠校正法由於在進行校正程序時需要分別量測短路，開路，負載以及穿透四種校正器，因此一般又可簡稱為 SOLT(Short-Open-Load-Thru)校正法。此外，網路分析儀乃是將所有儀器之外的電路元件視為一個雙埠網路，即使現今已有可支援多埠量測的網路分析儀，其基本的校正原理是一樣的。SOLT 校正法的雙埠網路數學誤差模型中將所有能被考慮的誤差定義成十二個誤差係數，其中分別為：指向性誤差(Directivity, E_d)，信號源匹配誤差(Source Match, E_s)，反射路徑

誤差(Reflection Tracking, E_r)，負載匹配誤差(Load Match, E_l)，傳輸匹配誤差(Transmission Match, E_t)以及隔離誤差(Isolation, E_i)。而六種誤差項中，每個又分別有順向(Forward)與反向(Reverse)兩種，因此共有十二個誤差係數。此 SOLT 校正法的順向及反向誤差模型分別如(圖五)及(圖六)所示。



圖五、SOLT 校正法之順向誤差模型



圖六、SOLT 校正法之反向誤差模型

此誤差模型可以由梅森法則(Mason's Rule)來建立這十二個誤差參數所形成之聯立方程式。要求解這些參數則需要十二個已知條件，此時即需要藉由量測標準待測電路來得到這些資訊。而標準待測電路即為前述的校正治具。(圖七)為本單位以微探針(Micro-probe)為量測接頭，在標準微帶線電路基板上實行 SOLT 校正時對四種治具的量測情形。

七、驗證校正結果

SOLT 雖然只用四個標準校正治具，卻可以提供 12 個資訊。事實上，就理想的雙埠網路而言，雙埠開網路，短路網路，負載或穿透的特性為：

$$S_{\text{Open}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad S_{\text{Short}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$S_{\text{Load}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad S_{\text{Thru}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

其中開路網路與短路網路只提供了四個條件，因此這四個參考電路總共提供了 12 項資訊。換言之，只要這四組校正治具有上述理想特性時，則幾乎可達到零誤差的校正。然而實際上的校正治具是無法這樣完美的，也就是說，實際的校正治具本身就帶有些許誤差；如此一來，所求得的校正參數便不能精確且完整地表現所有的誤差。然而這樣的誤差只要小到可以容忍的範圍內，便算是成功的校正。但何謂可容忍的範圍？這就討論到驗證校正的可信度了。就一般常見的實驗室校正而言，當校正完後，再重新分別接上這四組標準電路進行量測，以確認校正的可信度。若校正結果是可信的，則：

- (1)、當接上開路基準時，則可在 S_{11} 或 S_{22} 的史密斯圖右端看到接近一個小點或一段很短的線段。
- (2)、當接上短路基準時，則可在 S_{11} 或 S_{22} 的史密斯圖左端看到接近一個小點

或一段很短的線段。

(3)、當接上負載基準時，則可在 S_{11} 或 S_{22} 的史密斯圖中心看到接近一個小點或一段很短的線段。

(4)、當接上穿透基準時，則可在 S_{11} 或 S_{22} 的史密斯圖中心看到接近一個小點或一段很短的線段；並且可在 S_{21} 或 S_{12} 的史密斯圖右端看到接近一個小點或一段很短的線段。

若四個校正治具有分別有上述的特性，表示校正的工作也告一段落，便可以安心地進行後續的量測工作了。然而事實上，隨著時間的進行，量測環境會慢慢的改變。如空氣中的溫濕度，壓力，或其他雜訊，振動干擾，以及接頭或探針因重複使用而磨損……等等。這些因素都會慢慢的使校正參數失效，因此最好的量測是在量測完一個階段或一定時間之後，再將標準校正治具拿來做一次驗證；如果特性已經超過可忍受的範圍，則需重新校正，以確保量測的可信度。

八、結語

在量測高頻元件的電氣特性時，網路分析儀幾乎是不可或缺的儀器。而當以網路分析儀為量測儀器時，使用者必須特別注意量測環境的校正工作。此種校正與儀器本身的校正並不相同；而是指對實際待測物之外，不必要的連接裝置或元件所產生之效應與以扣除的動作。因此，能否準確的扣除這些不必要的特性以精準量測實

際待測物行為，乃是校正的出發點與最終目的。由於射頻元件種類繁多，應用範圍與領域也愈來愈廣；各種型式之量測平台也隨之愈形複雜，因而針對不同的環境也有不同的校正理論與方法，對其他校正方法有興趣的讀者可以參考參考文獻中的相關訊息。

參考文獻

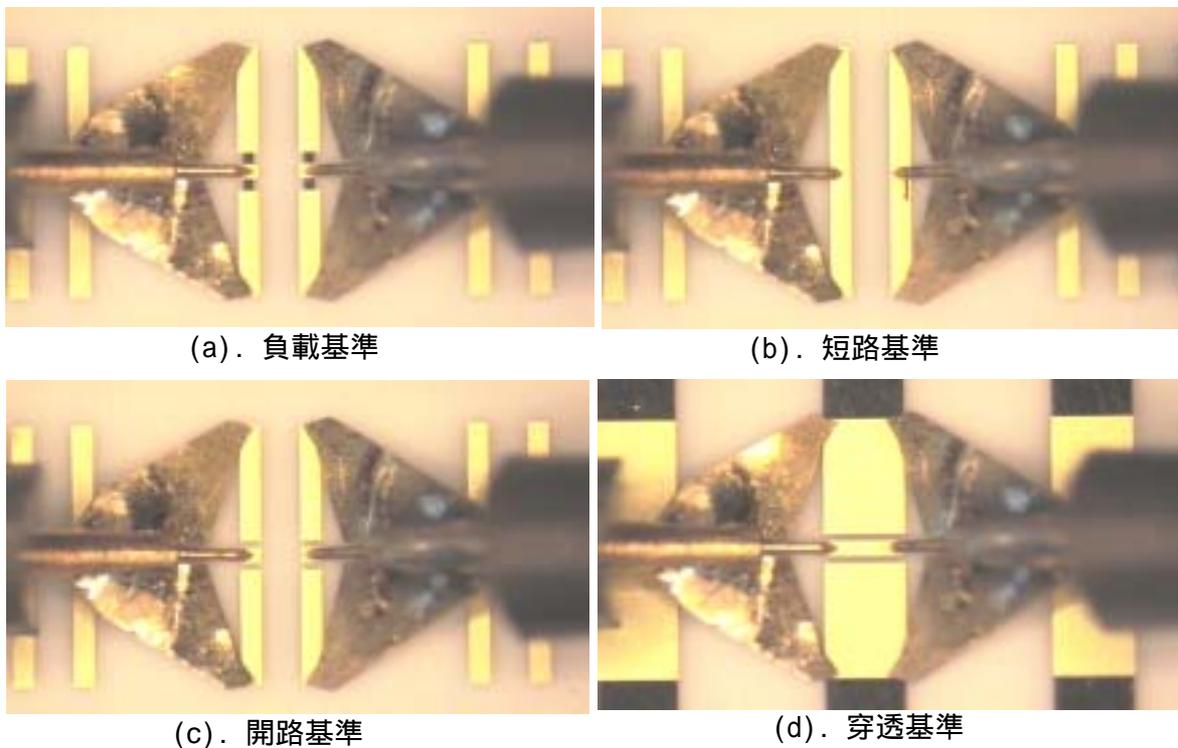
1. 陳榕煌，向量網路方析儀量測校正方法之研究與實踐，碩士論文。
2. Cascade Microtech ®, Microwave Wafer Probe Calibration Constants Instruction Manual.
3. Okamura, W.M. etc., A comprehensive millimeter-wave calibration development and verification approach, Microwave

Symposium Digest. 2000 IEEE MTT-S International , V. 3, 2000, P.1477 -1480 vol.3.

4. Szendrenyi, B.B., Design of components for a 7-16 precision calibration kit using the high frequency structure simulator, ARFTG Conference Digest, 1998. Computer-Aided Design and Test for High-Speed Electronics. 52nd , 1998, P.101 -105 Yon-Lin Kok, etc., A calibration procedure for W-band on-wafer testing , Microwave Symposium Digest, 1997., IEEE MTT-S International , V.3 , 1997, P.1663 -1666 vol.3.

作者簡介：

陳昌昇，任職於工研院電子所先進構裝技術中心/構裝設計技術組 副工程師，畢業於海洋大學電機工程研究所電波組。



圖七、實行 SOLT 校正法時量測各校正治具之情形

射频和天线设计培训课程推荐

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;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),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,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,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>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>