

Keysight Technologies

認識向量網路分析的
基本原理

應用說明



簡介

網路分析是指設計工程師和製造商，對複雜系統所用元件和電路的電氣效能進行量測的過程。當這些系統傳送具有資訊內容的信號時，我們最關心的是，如何以最高效率和最小失真，將信號從一處傳遞到另一處。向量網路分析藉由量測元件對頻率掃描和功率掃描測試信號的振幅與相位的影響，來精確分析元件特性。

本應用說明將回顧向量網路分析的基本原理，討論的內容包括可量測的通用參數，並解釋散射參數（S 參數）的概念。本文並探討一些射頻基本知識，如傳輸線和史密斯圖（Smith Chart）。

是德科技提供多元的純量網路分析儀和向量網路分析儀，可在 DC 至 110 GHz 範圍內評估元件特性。這些儀器還配備各種選項，以簡化實驗室和生產環境中的測試。

通訊系統之量測要求

任何通訊系統都必須考慮信號失真的影響。我們通常只考慮非線性效應引起的失真（例如，當所應用的載波信號引起交互調變失真時），但純粹的線性系統也可能導入信號失真。由於線性系統可能改變信號各個頻譜分量的振幅或相位關係，因而也可能改變所傳遞之信號的時間波形。

現在，我們來仔細研究線性特性和非線性特性的差別。

線性元件使得輸入信號產生振幅和相位變化（參見圖 1），在輸入端出現的任何正弦曲線，也將以相同頻率出現在輸出端，而不會形成新信號。無論是主動或是被動非線性元件，都可能使輸入信號的頻率偏離原來的位位置，或增加其它頻率分量，如諧波信號或寄生信號。過大的輸入信號，通常會迫使線性元件進入壓縮或飽和狀態，進而引起非線性工作。

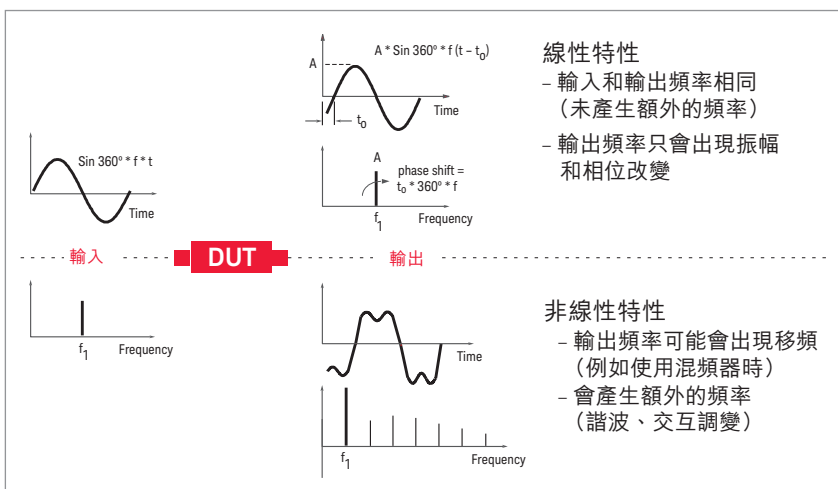


圖 1：線性特性和非線性特性的比較

為了進行線性無失真的傳輸，待測物（DUT）在所要求的整個頻寬內，其振幅響應必須是平坦的，而相位響應則須呈線性。舉例而言，我們來研究經過帶通濾波器時，含有豐富高頻分量的方波信號。該帶通濾波器以很小的衰減，讓選定的頻率通過，而通道之外的頻率，則有不同程度的衰減作用。

即使濾波器具有線性相位效能，方波的頻外分量也將受到衰減，使得本例中的輸出信號在本質上更具正弦屬性（參見圖 2）。

如果在某一濾波器中透過相同的方波輸入信號，僅造成第 3 次諧波的相位倒置，而維持諧波振幅不變，則輸出波形將更呈現出脈衝特性（參見圖 3）。一般來說，這種情況僅適用於本例中的濾波器，輸出波形將依據振幅和相位的非線性情況，呈現出任意形式的失真。

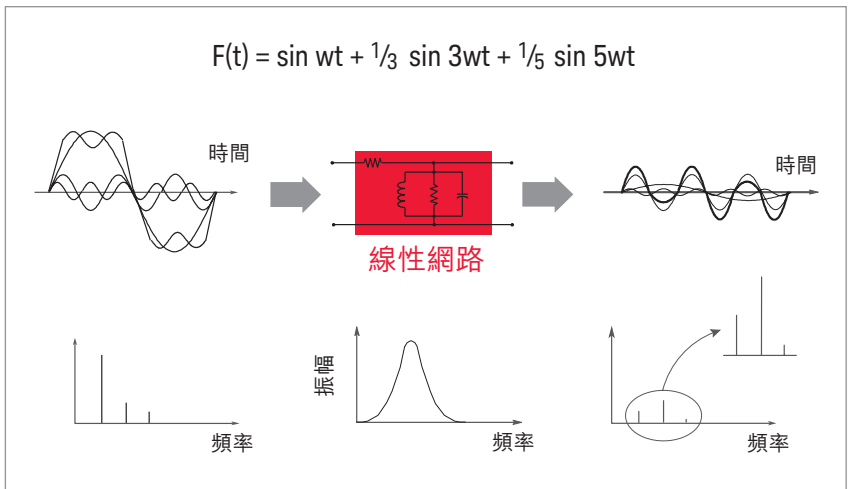


圖 2：振幅隨頻率的變化

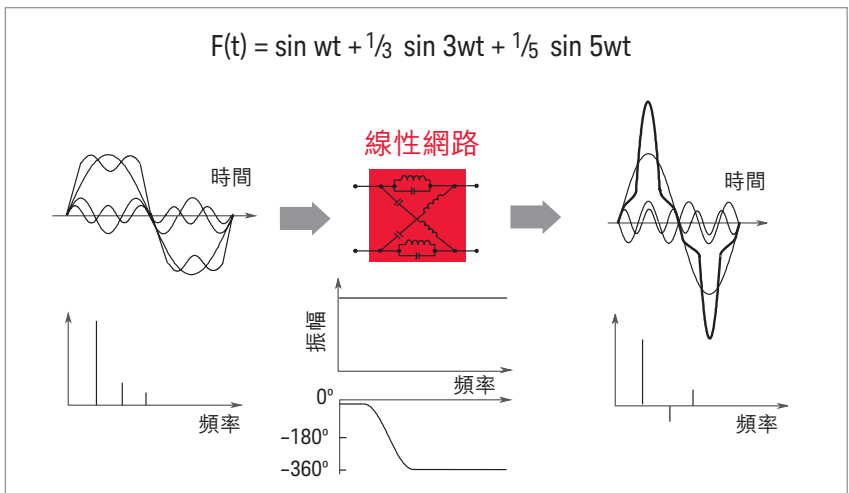


圖 3：相位隨頻率的變化

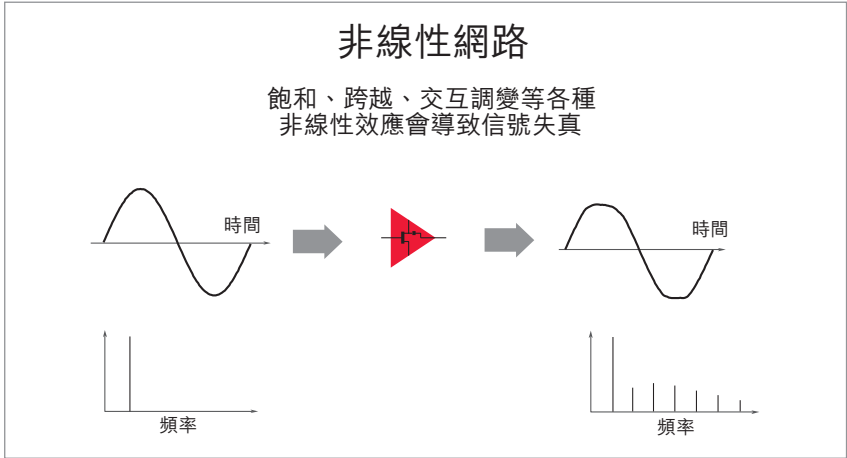


圖 4：非線性引發失真

非線性元件也會導入失真（參見圖 4）。例如，當放大器被過度激發，由於放大器趨於飽和，將導致輸出信號限幅。輸出信號不再是一個純正的正弦信號，在輸入頻率的各個倍頻位置均存在諧波。被動元件在高功率位準上也可能呈現非線性特性。使用具有電磁電感器的 LC 濾波器是最佳範例。磁性材料常常呈現出高度非線性的滯磁效應。

高效率傳送功率是通訊系統的另一個基本問題。為了高效率地傳送、發射或接收射頻功率，傳輸線、天線和放大器等元件都須呈現與信號源的優異阻抗匹配。當兩個連接元件之間的輸入與輸出阻抗之實部和虛部都達不到理想狀態，便出現阻抗不匹配。

向量量測的重要性

對各個分量的振幅和相位進行量測的重要性，源於以下幾個因素。首先，為了全面分析線性網路的特性，並確保無失真傳輸，工程師必須進行這兩種量測。其次，為了設計高效率匹配網路，工程師必須量測複阻抗。最後，開發電腦輔助工程（CAE）電路模擬程式模型的工程師，需要振幅和相位資料來進行精確類比。

為了執行傅氏逆變換，時域特性分析也需要振幅和相位資訊。藉由消除固有量測系統誤差的影響來提高量測準確度的向量誤差修正，同樣也需要振幅和相位資料，來建立有效誤差模型。即便是純量量測（如回返損耗），為了獲得高準確度，相位量測能力也十分重要。（請參閱是德科技應用說明《對網路分析儀量測套用錯誤修正功能》，1287-3）。

入射功率和反射功率的基本概念

最基本的網路分析是量測沿著傳輸線行進的入射波、反射波和傳輸波。利用光波長作為類比，當光投射到一個透明的透鏡上時（入射能量），一部分光從透鏡表面反射，但大部分光繼續通過透鏡（傳輸能量）（參見圖 5）。若透鏡具有鏡面，則大部分光將被反射，只有極少量或完全沒有光通過透鏡。

雖然射頻信號和微波信號的波長不相同，但原理是一樣的。網路分析儀能精確量測入射能量、反射能量和傳輸能量。例如，在傳輸線上發送的能量，沿傳輸線反射回發射源的能量（由於阻抗不匹配）以及順利地傳送至終端裝置（如天線）的能量。

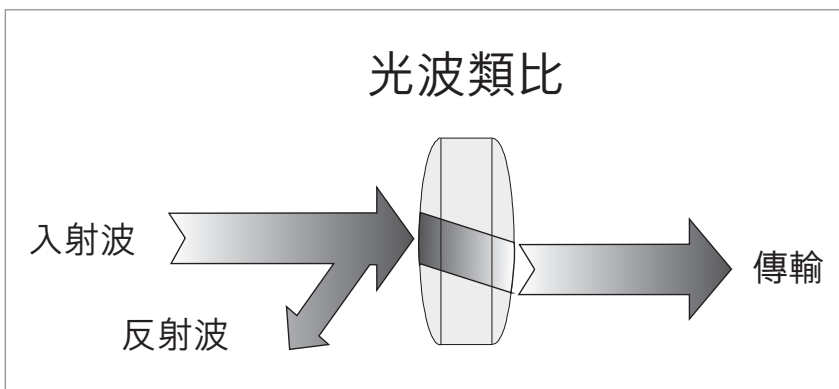


圖 5：光波與高頻元件特性的類比

史密斯圖

對元件進行特性分析時所出現的反射大小，取決於入射信號「所看到的」阻抗。由於任何阻抗都能用實部和虛部（ $R + jX$ 或 $G + jB$ ）表示，故可以將它們繪製在所謂複阻抗平面的直線網路上，遺憾的是，開路（一種常見的射頻阻抗）在實軸上表現為無限大，因而無法表示出來。

極座標圖由於包括了整個阻抗平面，因而具有重要使用價值。然而，它並不直接繪出阻抗曲線，而是以向量形式顯示出複反射係數。向量的振幅為與顯示器中心的距離，而相位則顯示為向量相對於從中心到右邊沿水準直線的角度。極座標圖的缺點是，不能直接從顯示讀取阻抗值。

由於複阻抗與反射係數兩者之間有相對應的關係，故複阻抗平面的正實半部分，可以映射到極座標顯示上，結果便形成了史密斯圖。所有電抗值和從 0 到無限大的所有正電阻值，均落在史密斯圖內（參見圖 6）。

在史密斯圖上，恒定電阻的軌跡表現為圓，而恒定電抗的軌跡表現為圓弧。史密斯圖上的阻抗，是指對所考察的元件或系統的特性阻抗進行歸一化後的阻抗。對射頻和微波系統來說，特性阻抗通常是 50 Ω，而對廣播和有線電視系統而言，特性阻抗則為 75 Ω。理想的終端位於史密斯圖的中心。

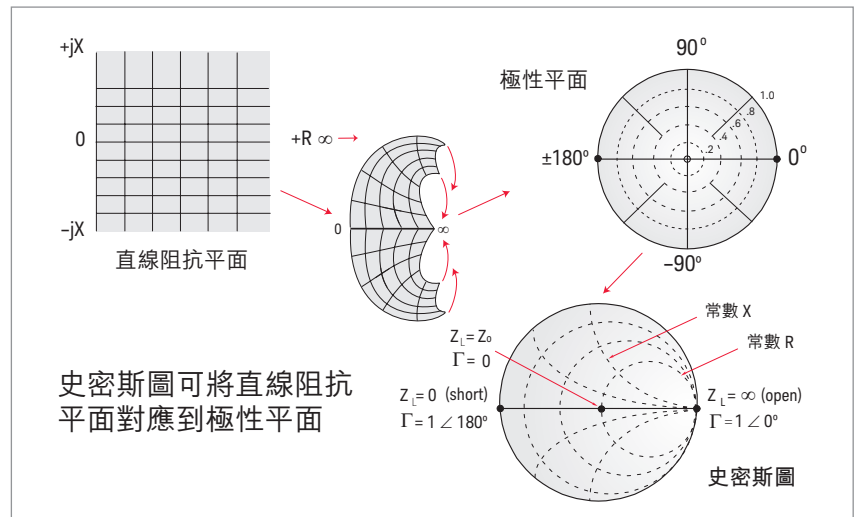


圖 6：史密斯圖

功率傳送條件

給定的來源電阻為 R_s 而且負載電阻為 R_L 時，為了將最大功率傳送到負載，在兩個元件的連接處，必須滿足理想的匹配條件。 $R_L = R_s$ 時，無論激發是直流電壓源還是射頻正弦波源，均能實現這一條件（參見圖 7）。

如果來源阻抗不是純電阻，那麼，只有當負載阻抗與來源阻抗呈現複數共軛時，才能產生最大功率傳送。對阻抗虛部取相反符號，可滿足這個條件。例如，若 $R_s^* = 0.6 + j0.3$ ，則複數共軛為 $R_s = 0.6 - j0.3$ 。

在較高頻率上使用傳輸線的主要原因之一，是為了實現高效率的功率傳送。在很低的頻率（波長非常長）處，簡單的導線便適用於傳導功率。導線的電阻相當小，對低頻信號的影響也很小。無論在導線上何處進行量測，電壓和電流均相同。

在較高頻率上，波長與高頻電路中導體的長度相當或者更小，而功率傳輸可視為以行波方式實施。當傳輸線的終端負載等於其特性阻抗時，便可將最大功率傳送至負載。當終端負載與特性阻抗不相等時，則未被負載吸收的部分信號，將被反射回信號源。

若傳輸線的終端負載等於其特性阻抗，就不會有反射信號，因為所傳輸的功率均被負載吸收（參見圖 8）。觀察射頻信號波封隨傳輸線距離的變化，並未發現駐波，這是因為沒有反射，能量只在一個方向上流動。

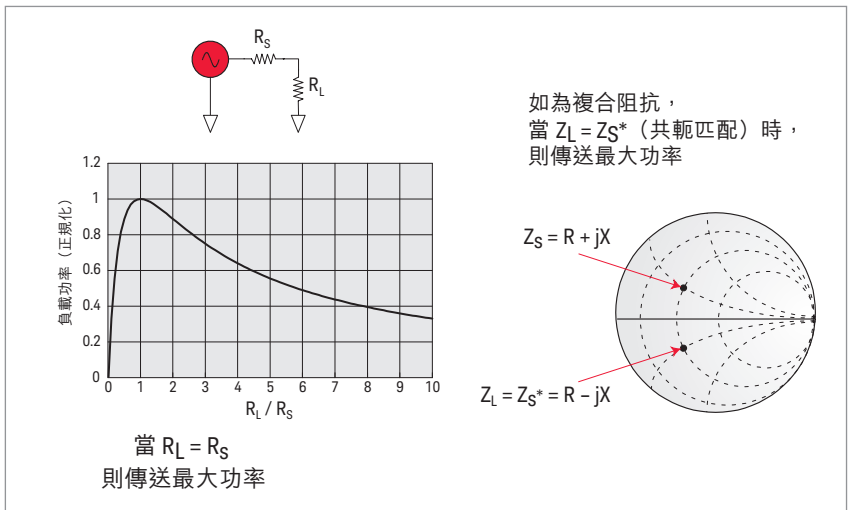


圖 7：功率傳送

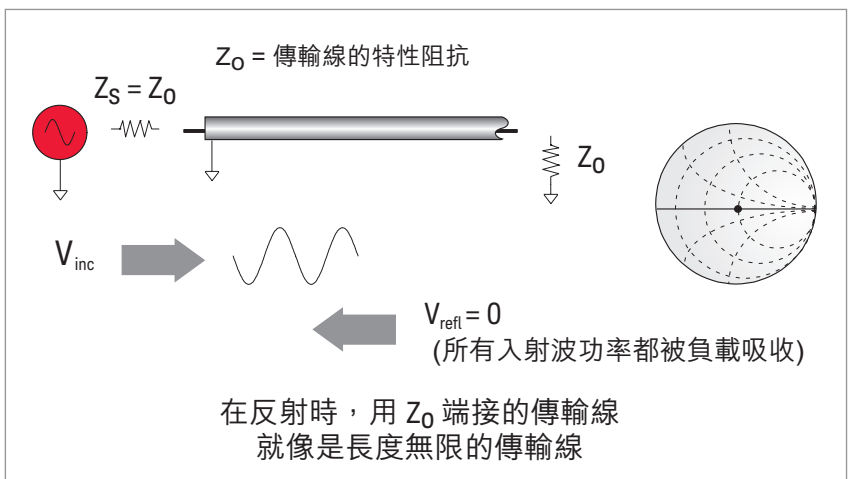


圖 8：用 Z_0 端接的傳輸線

當傳輸線終端短路時（短路不能維持電壓，因而耗散功率為零），反射波沿傳輸線返回到信號源（參見圖 9）。反射電壓波的大小必然等於入射電壓波；而相位在負載平面處則與入射波相差 180° 。反射波與入射波的大小相等，但以反方向行進。

若傳輸線的終端開路（開路不能維持電流），反射電流波的相位將與入射電流波相差 180° ，而反射電壓波則在負載平面上與入射電壓波同相，如此可保證在開路處的電流為 0。反射電流波和入射電流波的大小相等、但按相反方向行進。對於短路和開路兩種情況，在傳輸線上都會建立駐波。電壓谷值將為 0，而電壓峰值將為入射電壓位準的 2 倍。

若傳輸線以 25Ω 的電阻器端接，導致介於全吸收和全反射之間的狀態，則部分入射功率被吸收，部分入射功率被反射。反射電壓波的振幅將是入射波振幅的 $1/3$ ，而且兩種波在負載平面處的相位相差 180° 。駐波的谷值不再為 0，而峰值則小於短路和開路情況的峰值。峰值和谷值之比將是 2:1。

確定射頻阻抗的傳統方法是利用射頻探棒 / 檢波器、一段開槽傳輸線和一個 VSWR（電壓駐波比）測試儀來量測 VSWR。當探棒沿傳輸線移動時，測試儀便記下峰值和谷值的相對位置和數值。根據這些量測，便可匯出阻抗。在不同的頻率上，可以重複此量測步驟。現代網路分析儀能在頻率掃描期間直接量測入射波和反射波，阻抗結果可以用多種格式（包括 VSWR）顯示出來。

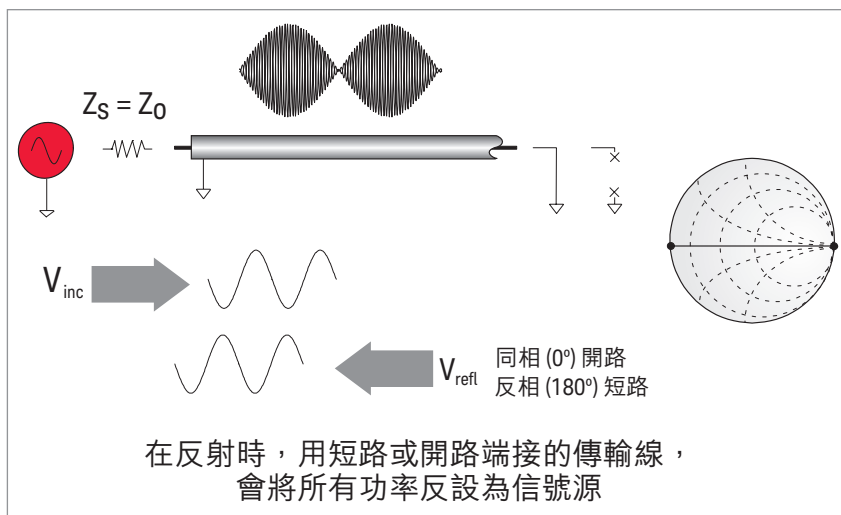


圖 9：以短路、開路端接的傳輸線

網路分析的名詞術語

理解了電磁波的一些基本知識之後，我們還須掌握量測所用的常用術語。在網路分析儀的名詞術語中，一般用 R 或參考通道表示量測入射波。反射波用 A 通道量測，而傳輸波則用 B 通道量測（參見圖 10）。利用這些波中的振幅和相位資訊；便能定量描述待測物（DUT）的反射和傳輸特性，反射和傳輸特性可以表示為向量（振幅和相位）、純量（只有振幅），或只有相位的量。例如，回返損耗是反射的純量量測，而阻抗則是向量反射量測。比值量測法可以讓我們在進行反射和傳輸量測時，不會因為絕對功度和來源功率隨頻率變化而受到影響。反射量的比值常常表示為 A/B，而傳輸量的比值表示為 B/R，它們與儀器中的量測通道有關。

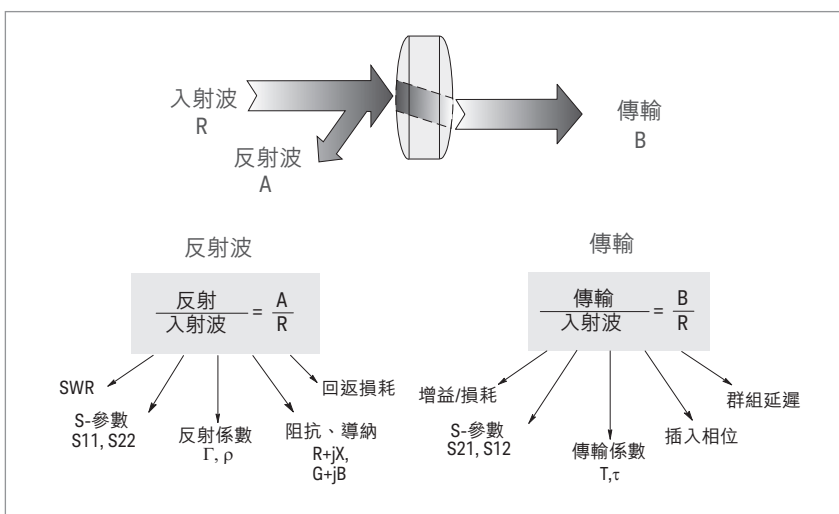


圖 10：說明高頻元件特性的常用術語

反射量比值的常用術語是複反射係數 Γ （參見圖 11）。 Γ 的幅值稱為 ρ 。反射係數是反射信號電壓位準與入射信號電壓位準之比。例如，終端負載阻抗等於特性阻抗 Z_0 的傳輸線將把全部能量傳送至負載，所以 $V_{\text{refl}} = 0$ 和 $\rho = 0$ ，當負載阻抗 Z_L 不等於特性阻抗時，能量即被反射， ρ 大於 0。當負載阻抗為短路或開路時，全部能量被反射， $\rho = 1$ 。因此， ρ 取值範圍為 0~1。

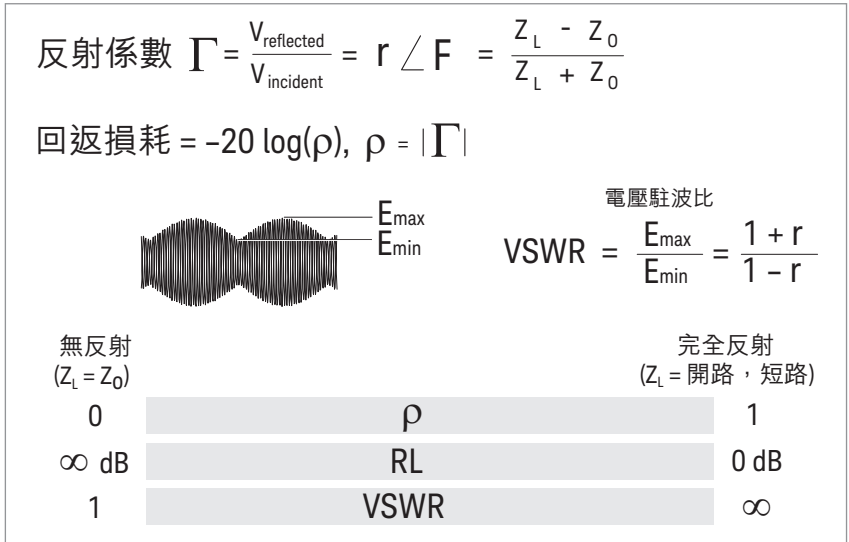


圖 11：反射參數

回返損耗是用對數項 (dB) 表示反射係數的一種方法。回返損耗是反射信號低於入射信號的 dB 數。回返損耗總是表示為正數，且在無限大（對具有特性阻抗的負載）和 0 dB（對開路或短路）之間變化。另一個用來表示反射的常用術語是電壓駐波比 (VSWR)。VSWR 定義為射頻波封的最大值與射頻波封的最小值之比。它與 ρ 的關係為 $(1 + \rho) / (1 - \rho)$ 。VSWR 的數值範圍從 1（無反射）到無限大（全反射）。

傳輸係數定義為被傳輸的電壓除以入射電壓（參見圖 12），若被傳輸電壓的絕對值大於入射電壓的絕對值，則認為待測物或系統具有增益。若被傳輸電壓的絕對值小於入射電壓的絕對值，則認為待測物或系統具有衰減或插入損耗。傳輸係數的相位部分稱為插入相位。

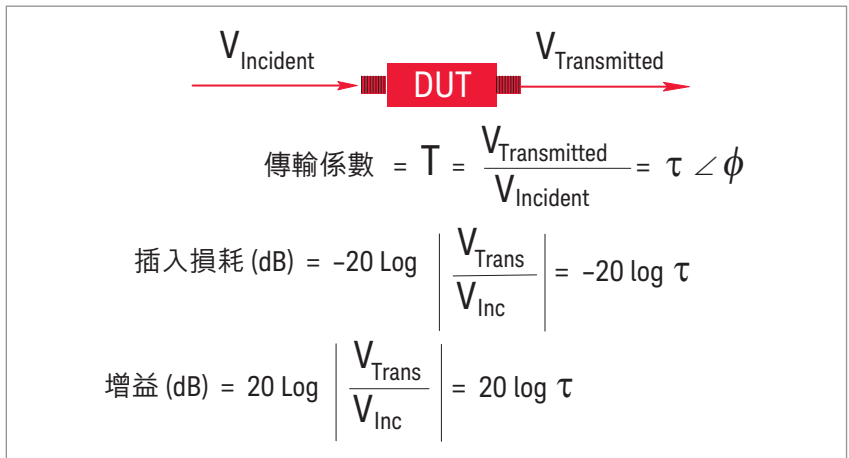


圖 12. 傳輸參數

通常，直接考察插入相位並不能提供有用資訊。這是因為，由於待測物的電長度，使插入相位相對於頻率具有很大的（負）斜率。該斜率正比於待測物的電長度。由於與線性相位的這一偏差是唯一能引起通訊系統失真的原因，故要求去掉相位響應的線性部分，以便對於餘下的非線性部分進行分析。為此，可以利用網路分析儀的延遲特性自動抵消待測物的平均電長度。結果是相位失真或偏離線性相位的高分辨率顯示（參見圖 13）。

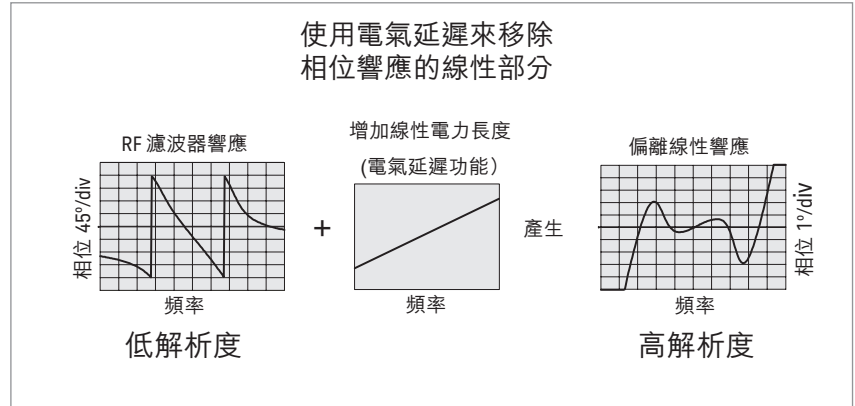


圖 13：與線性相位的偏離

量測群組延遲

相位失真的另一個有用資訊是群組延遲（參見圖 14）。這個參數是信號透過待測物的渡越時間隨頻率變化的度量。群組延遲可以由對待測物的相位響應隨時間的變化取微分進行計算。它將相位響應的線性部分簡化為一個恒定值，再將對線性相位的偏離變換為對恒定群組延遲的偏離（這將引起通訊系統中的相位失真）。平均延遲代表信號透過待測物的平均渡越時間。

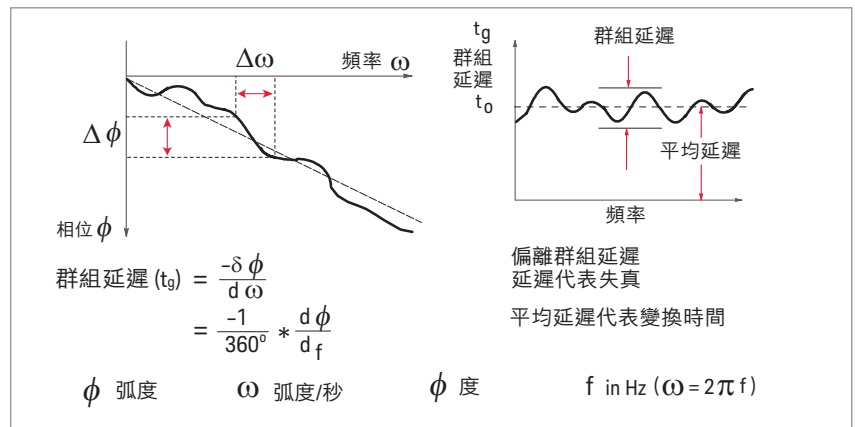


圖 14：群組延遲的定義

依據元件的不同，與線性相位和群組延遲的偏離都有可能需要量測，因為兩者都很重要。規定元件中的最大峰 - 峰相位波動可能不足以全面反映元件的特性，因為相位波動的斜率取決於每單位頻率發生的波動次數。群組延遲則考慮了這種情況，因為它是經微分的相位響應。利用群組延遲往往更便於說明相位失真的跡象（參見圖 15）。

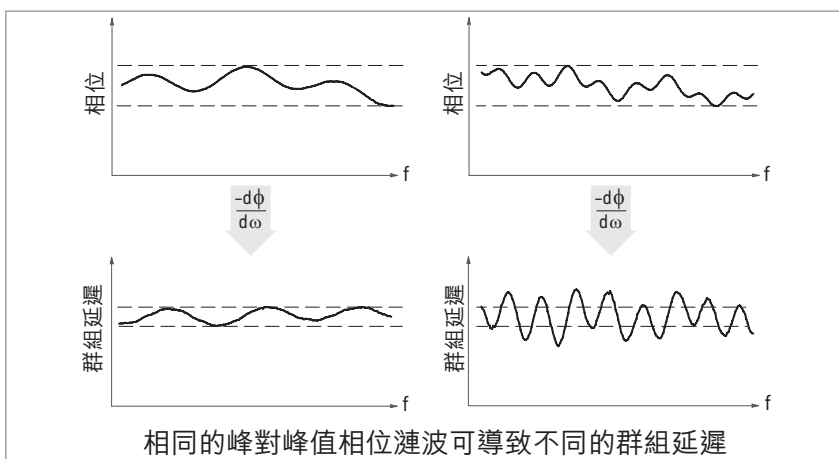


圖 15：為什麼要量測群組延遲？

網路的特性分析

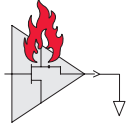
為了全面特性分析一個未知的線性二埠元件，我們必須在不同的條件下進行量測並計算一組參數，即便在源和負載條件與量測不相同的場合，這些參數也能用來全面描述所測試元件（或網路）的電氣效能。低頻元件或網路的特性分析通常是建立在量測 H、Y 和 Z 參數的基礎上，為此，必須量測元件的輸入或輸出埠上或網路節點上的總電壓和總電流，而且量測必須在開路狀態和短路狀態下進行。

由於很難量測高頻總電流或總電壓，故通常代之以量測 S 參數（參見圖 16）。這些 S 參數與一些熟悉的量測，如增益、損耗和反射係數均有聯繫。它們能相當簡單的加以量測，而無需將不適宜的負載連接到待測物上。測得的多個元件的 S 參數可以利用矩陣運算預示整個系統的效能。S 參數無論線性或非線性 CAE 電路模擬工具中都很容易使用，而 H、Y 和 Z 參數在必要時則可從 S 參數匯出。

對於給定元件，S 參數的數量等於埠數的平方。例如，二埠元件有 4 個 S 參數。S 參數的編號習慣是，S 之後的第一個數位是能量出射的埠，而第二個數位則是能量進入的埠。因此， S_{21} 是由於對埠 1 加入射頻激發而從埠 2 輸出功率的量度。當數位相同（例如 S_{11} ）時，便表示為反射量測。

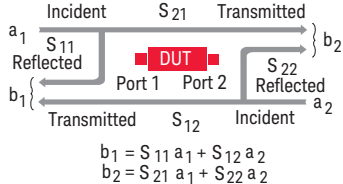
H、Y 和 Z 參數

- 在高頻下，我們很難量測元件埠上的總電壓和電流
- 在短路或開路狀態下，主動元件可能會震盪或自我破壞



S 參數

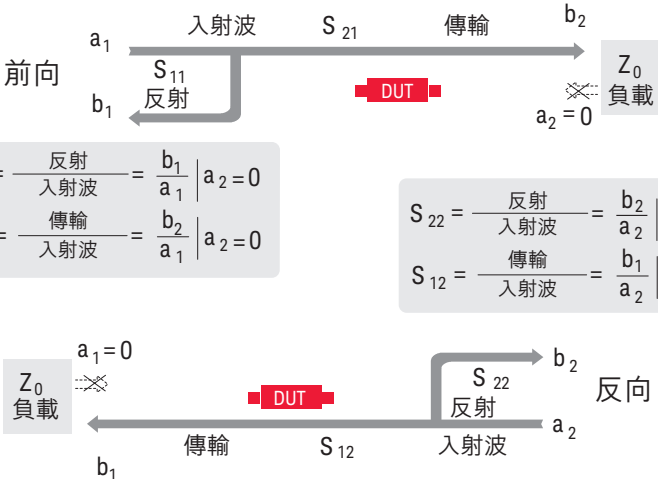
- 與熟悉的量測相關 (增益、損耗、反射係數等等)
- 相當容易量測
- 可堆疊多個元件的 S 參數，以便預測系統效能
- 便於分析
 - CAD 程式
 - 流程圖分析
- 如有需要，可透過 S 參數來計算 H、Y 或 Z 參數



$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

圖 16：H、Y 和 Z 參數的局限性（為什麼要使用 S 參數？）



前向

入射波 a_1 反射 b_1 傳輸 b_2

反射係數 S_{11} 傳輸係數 S_{21}

後向

入射波 a_2 反射 b_2 傳輸 b_1

反射係數 S_{22} 傳輸係數 S_{12}

負載 Z_0 負載 Z_0

條件： $a_2 = 0$ (前向), $a_1 = 0$ (後向)

$$S_{11} = \frac{\text{反射}}{\text{入射波}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{21} = \frac{\text{傳輸}}{\text{入射波}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{22} = \frac{\text{反射}}{\text{入射波}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

$$S_{12} = \frac{\text{傳輸}}{\text{入射波}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

圖 17：量測 S 參數

正向 S 參數由輸出端存取精確等於測試系統特性阻抗的負載時，量測入射信號、反射信號和傳輸信號的振幅與相位確定。在簡單二埠網路的情況下， S_{11} 等效於待測物的輸入複反射係數或阻抗，而 S_{21} 則是正向複傳輸係數。將信號源置於待測物的輸出埠以及用理想負載存取輸入埠，便能量測另兩個（反向）S 參數。參數 S_{22} 等效於待測物的輸出複反射係數或輸出阻抗，而 S_{12} 則是反向複傳輸係數（參見圖 17）。

相關文件

探索網路分析儀架構，應用說明 1287-2，
文件編號 5965-7708E

修正網路分析儀量測的誤差，應用說明 1287-3，
文件編號 5965-7709E

網路分析儀量測：濾波器與放大器範例，應用說明 1287-4，
文件編號 5965-7710E

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight
透過個人化頁面查看與您息息相關的資訊

AXIe

www.axiestandard.org

AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test (AXIe) 是基於 AdvancedTCA 標準的開放標準，將 AdvancedTCA 標準延伸到通用測試和半導體測試領域。是德科技之前身安捷倫 EMG 是 LXI 聯盟的創始會員。

LXI

www.lxistandard.org

LXI 是繼 GPIB 之後推出的區域網路 (LAN) 標準，可提供更快速、更有效率的網路連結方式。是德科技之前身安捷倫 EMG 是 LXI 聯盟的創始會員。

PXI

www.pxisa.org

PCI eXtensions for Instrumentation (PXI) 模組化儀器提供堅固耐用的 PC 式高效能量測儀器與自動化系統。



三年保固

是德科技的卓越產品與長達 3 年保固服務的完美結合，助您一臂之力達成業務目標：增強操作便利性，降低持有成本，增強量測信心。



五年保固延長計劃

www.keysight.com/find/AssurancePlans

是德科技提供經濟實惠的五年保固保證，確保儀器的運作達到規格要求，您可持續信賴儀器的量測準確度。



www.keysight.com/quality

是德科技—DEKRA Certified ISO 9001:2008 品質管理系統。

是德科技銷售夥伴

www.keysight.com/find/channelpartners

兩全其美：是德科技專業的量測技術與齊備的產品，搭配是德科技銷售夥伴的服務與彈性價格。

www.keysight.com/find/NA

有關是德科技電子量測產品、應用及服務的詳細資訊，可查詢我們的網站或來電洽詢

聯絡窗口查詢：

www.keysight.com.tw/find/contactus

台灣是德科技網站：

www.keysight.com.tw

台灣是德科技股份有限公司

免費客服專線：0800-047-866

104 台北市復興南路一段 2 號 7 樓

電話：(02) 8772-5888

324 桃園縣平鎮市高雙路 20 號

電話：(03) 492-9666

802 高雄市四維三路 6 號 25 樓之 1

電話：(07) 535-5035