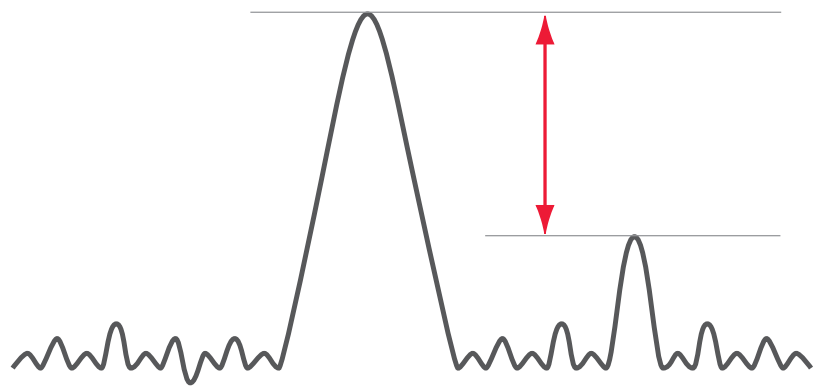


Keysight Technologies

最佳化射頻和微波 頻譜分析儀的動態範圍

應用說明



1. 簡介

什麼是動態範圍？

頻譜分析儀的動態範圍通常定義為：同時出現在頻譜分析儀輸入端之最大與最小信號的比率（以 dB 為單位），其中較小信號的量測可容許到特定程度的不確定性。欲量測的信號可為諧波相關或非諧波相關。

為什麼動態範圍很重要？

動態範圍規格會決定是否能在大信號之下看到低位準信號，因此它是頻譜分析儀最重要的效能指標之一。很多人常對它產生誤解和曲解，因為在決定動態範圍時，儀器的顯示範圍、量測範圍、雜訊底線、相位雜訊和寄生響應都會有重大影響。若能了解特定量測適用哪種動態範圍的解釋，您就可以執行更準確、可靠而穩定一致的頻譜分析儀量測。

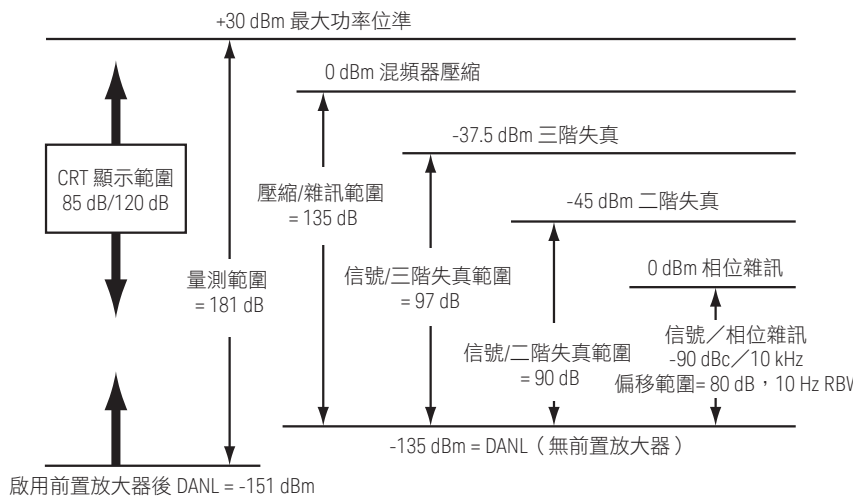


圖 1：動態範圍的解釋

目錄

1. 簡介	2
什麼是動態範圍？	2
為什麼動態範圍很重要？	2
2. 動態範圍的解釋	3
量測範圍	3
顯示範圍	3
混頻器壓縮	3
內部失真	4
雜訊	5
靈敏度	5
相位雜訊	5
二階和三階動態範圍	5
結語	6
3. 量測諧波或交互調變失真	7
量測不確定性	7
最佳化量測	8
前置放大器	8
衰減器	9
衰減器測試	9
外部濾波器	9
RBW 濾波器	9
量測其他信號	9
4. 結語	10
5. 參考文獻	10

2. 動態範圍的解釋

圖 1 顯示了動態範圍的幾種不同解釋。在本章中，我們將說明每一種的解釋。

量測範圍

量測範圍是頻譜分析儀可量測到的最大和最小信號之間的差異，需考量不同的儀器設定。通常來說，可加到分析儀輸入端而不會損壞前端硬體的最大功率位準，就定義為最大信號；對大部分的分析儀而言就是 +30 dBm (1 W)。儀器的雜訊底線會決定量測範圍的下限；低於雜訊位準的信號就不會出現在螢幕上。請注意當輸入衰減器設定與 1 W 量測所使用的設定相同時，就無法達到最低雜訊位準。

顯示範圍

顯示範圍就是校驗後的螢幕振幅範圍。假如分析儀螢幕在垂直方向有 10 格，通常會假設在 10 dB/div 的對數顯示模式中，分析儀可顯示差距 100 dB 的信號。然而對數放大器通常會限制此範圍。舉例來說，如果有 85 dB 的對數放大器而螢幕上有 10 格，就只會 有 8.5 個校驗格。分析儀的參考位準設定會決定顯示範圍的位置（在量測範圍中的任何地方）。

在某些頻譜分析儀中，會用數位濾波器實現狹窄的解析頻寬。這個情況下會跳過對數放大器，現在的限制來自於數位類比轉換器加上自動範圍調整。此時的校驗顯示範圍可達到 120 dB。

提示：利用參考位準進行最佳化

如果必須在大信號之下量測小信號時，通常可調整參考位準將大信號移至顯示上限之上 10 dB，以便將小信號放入校驗顯示範圍。這對小信號的量測準確度影響不大；不過必須避免混頻器壓縮。

混頻器壓縮

混頻器壓縮位準就是可輸入分析儀，又不會犧牲掉顯示信號準確度的最大功率位準。當混頻器的信號位準遠低於壓縮點時，欲得到的混頻產物（中頻信號）位準為輸入的線性函數，轉為失真的能量會很小。當混頻器位準提高時，轉移函數會變成非線性，因為很多能量會轉為失真產物。此時我們認定混頻器處於壓縮狀態，顯示信號位準會低於實際信號位準。

混頻器壓縮規格描述的是混頻器總輸入功率位準，低於此位準時，分析儀壓縮顯示信號會少於 1 dB。請記住混頻器的輸入位準為所有頻率的輸入功率總和，即使螢幕上無法看到所有輸入信號。評估壓縮有三種不同的方法：CW 壓縮、雙音壓縮和脈衝壓縮。每一種都是不同的壓縮機制，有其本身的壓縮臨界值。[1]

提示：限制混頻器位準

為了準確量測高位準信號，就必須決定輸入衰減設定值，限制到達混頻器的功率，以避免進入壓縮狀態。Keysight ESA 頻譜分析儀可設定混頻器最高位準。針對螢幕上顯示的任何信號，衰減器設定值會自動調整，讓功率位準等於或小於輸入混頻器選擇的位準。預設和最大設定值為 -10 dBm。

內部失真

量測失真產物時（例如單音諧波失真或雙音以上的互調失真），內部失真是決定動態範圍的因素之一。內部產生的互調和諧波失真是混頻器輸入信號振幅的函數。若想了解這些效應的話，研究輸入混頻器的特性會有很大的幫助。

大部分的分析儀使用的是二極體混頻器，這是一種非線性裝置，其特性會按照理想二極體方程式 [1]。利用泰勒展開式可以得到，在非線性裝置中，輸入端基波信號功率 1 dB 的變化會在輸出端二階（例如二次諧波）失真造成 2 dB 的變化，並在三階（例如三次諧波）失真造成 3 dB 的變化（參見圖 2）。我們可以讓動態範圍等於基音和內部產生的失真之間的差異。我們發現基波功率 1 dB 的變化，二次諧波失真產物會有 1 dBc（dB 相對於載波或基波）的變化，而三次諧波產物會有 2 dBc 的變化。

參考 Keysight E4402B 頻譜分析儀的寄生響應規格 [4]，此分析儀的二次諧波失真為 -75 dBc（混頻器輸入 -30 dBm 信號），而三階交互調變（TOI）失真為 -80 dBc（混頻器輸入兩個 -30 dBm 信

號）。我們可以針對各種混頻器輸入位準畫出一張圖（圖 3），因為我們知道基波和內部產生的二階、三階失真產物之間的關係。內部產生的二次諧波斜率是 1，三階互調失真斜率是 2。從這張圖可以發現，如果混頻器位準夠低時，就不需要考量內部產生的失真。這的確是真的，但是當信號位準變得更低時，我們就必須考量雜訊效應。

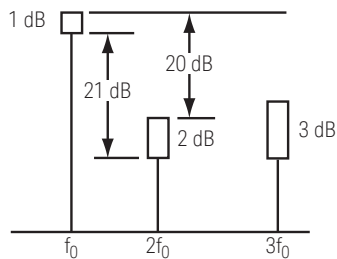


圖 2：輸入功率位準與失真產物的相對振幅變化

雜訊

有兩種雜訊會影響動態範圍：相位雜訊和靈敏度。雜訊是一種寬頻信號；因此當解析頻寬（RBW）濾波器變寬的時候，就會有更多隨機雜訊能量進入檢波器。這會提高相位雜訊位準以及分析儀的雜訊底線。因此雜訊規格必須參考 RBW。

靈敏度

分析儀的靈敏度又稱為顯示平均雜訊位準（DANL）或雜訊底線，會決定我們可以量測的最小信號。DANL 的下限理論上是 kTB^1 或 -174 dBm （室溫下雜訊頻寬 1 Hz）。

相位雜訊

量測兩個頻率差異很大的信號時，DANL 會是重要參數，而在量測兩個頻率很接近的信號（差異 $< 1 \text{ MHz}$ ）時，相位雜訊就會是重要參數。相位雜訊又稱為旁波帶雜訊，是由本地振盪器（LO）的不穩定所造成的。現實中並沒有完美的振盪器；都會由隨機雜訊相位調變到某種程度，而 LO 任何的不穩定都會透過混頻器轉移到顯示的信號上。LO 越穩定，相位雜訊就會越低（假設輸入信號夠穩定）。針對動態範圍的考量，當測試音彼此之間很接近時，相位雜訊就像三階互調失真。

二階和三階動態範圍

為了在內部失真位準圖（圖 3）中納入雜訊效應，我們必須考量相較於混頻器輸入端基本位準的變化，信噪比會如何變化。混頻器的信號位準每提升 1 dB，就可以增加 1 dB 的信噪比。

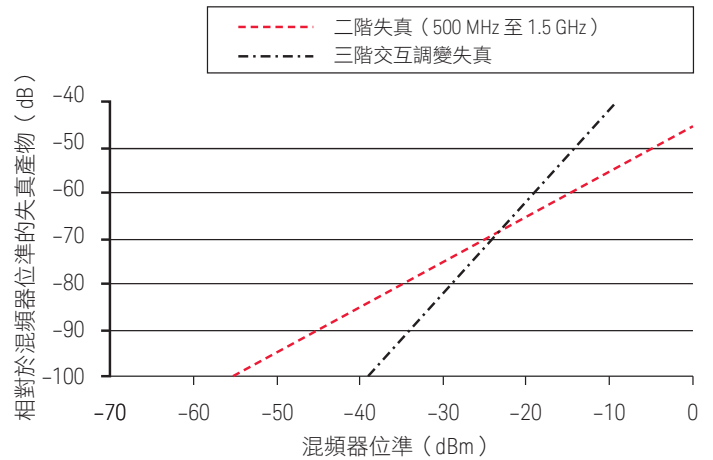


圖 3：Keysight E4402B 內部產生的二次諧波和三階互調失真位準是混頻器輸入位準的函數

1. 此處 k = 波茲曼常數， T = 絕對溫度（單位為 K），而 B = 頻寬（Hz）。

因此 DANL 曲線為一條斜率 -1 的直線（見圖 4）。圖 4 中 -80 dB 處的水平線代表相位雜訊，而不是 DANL（10 kHz 偏移和 10 Hz RBW）。在執行接近載波（差距 <1 MHz）的量測時，相位雜訊會是限制因素；進行差距很大的量測時，則可將它忽略。雜訊會限制可量測的信號大小，進而影響我們將內部產生的失真產物降到最低的能力。

二或三階動態範圍會受到三種因素的限制：輸入混頻器的失真特性、DANL（靈敏度）、以及本地振盪器的相位雜訊。我們必須針對特定量測，將這些因素都納入考量，並進行最佳化。圖 4 顯示在二階和三階失真量測中，可達到的動態範圍為混頻器位準的函數。為了達到最大無失真動態範圍，應調整混頻器的功率，讓 DANL 和內部產生的失真相等。

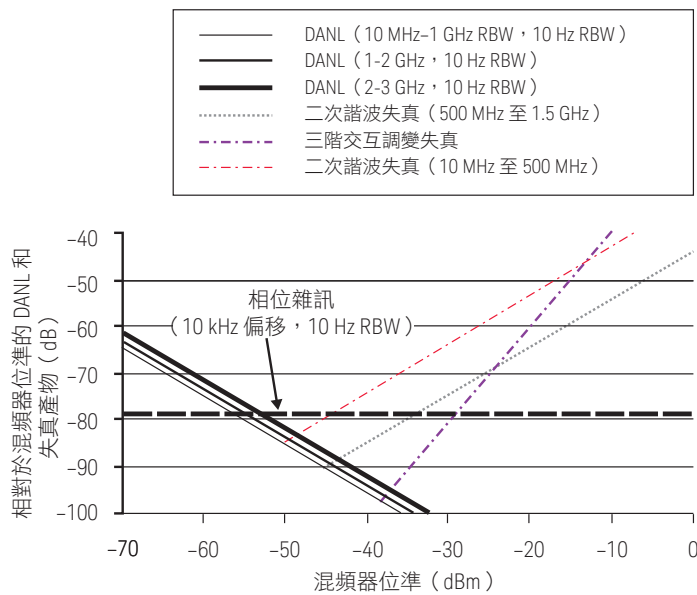


圖 4：Keysight E4402B 靈敏度、相位雜訊、三階交互調變和二次諧波失真與混頻器位準的關係

提示：決定最大可達到的二階或三階動態範圍

通常最大可達到的動態範圍指的是兩個諧波相關信號之間的最大差異（dB），而不受分析儀內部產生的失真產物干擾。由圖 4 可以看到，當混頻器位準相當於雜訊和失真成份的交叉點時，就會達到最大動態範圍。最大動態範圍可用下列方程式計算出來，也可用來確認頻譜分析儀是否具備足夠的動態範圍可以執行特定量測：

$$\text{方程式 1} \quad \text{最大三階動態範圍} = (2/3)(\text{DANL} - \text{TOI})$$

$$\text{方程式 2} \quad \text{最大二階動態範圍} = (1/2)(\text{DANL} - \text{SHI})$$

其中：
 TOI = 混頻器位準 - (1/2)
 （失真產物位準，單位為 dBc）
 SHI = 混頻器位準 - 失真產物位準（dBc）。

結論

頻譜分析儀常見的用途是量測諧波或互調失真產物。在進行這類量測時，量測範圍、顯示範圍和混頻器壓縮並沒有考量遇到的所有限制。因此「動態範圍」通常被理解為二階或三階動態範圍。這是第 3 節中動態範圍的解釋，其中探討的技術可幫助您提升並了解動態範圍的效應，以便執行更好的失真量測。

3. 量測諧波或交互調變失真

量測不確定性

計算理論動態範圍時，我們並未考慮量測不確定性。若內部產生的分量出現在待測信號的相同頻率上，如同執行失真量測時，則準確度會降低。測得之振幅會落於兩者之和與兩者之差之間，視外部與內部失真產物的相位關係而定。由於我們無法得知其相位關係，因此只能就量測準確度來判斷：

$$\text{方程式 3} \quad \text{不確定性 (dB)} = 20 \log (1 \pm 10^{d/20})$$

其中 d = 內部與外部失真產物
之間的 dB 差 (負數)

若我們希望量測不確定性不要大於 ± 1 dB，則須確保內部產生的失真產物，至少比我們想量測之失真產物低 19 dB。若將這 19 dB 的保護頻段加入曲線，則二階動態範圍會降低 9.5 dB，而三階動態範圍則會降低 12.7 dB，如圖 5 所示。請注意，我們所加入的 19 dB 保護頻段並未完全失去。

除了儀器內部失真外；低失真雜訊比也會影響到不確定性。若待測之失真分量等於或非常接近 (數 dB 內) 頻譜分析儀的雜訊位準，則所顯示的信號位準 (實際上是信號加上雜訊的位準) 大於實際信號位準。您可套用修正係數以補償量測誤差。[3]若顯示之信號位準的誤差小於 0.5 dB，常見的作法是確保信號至少比顯示之雜訊底線高 5 dB。

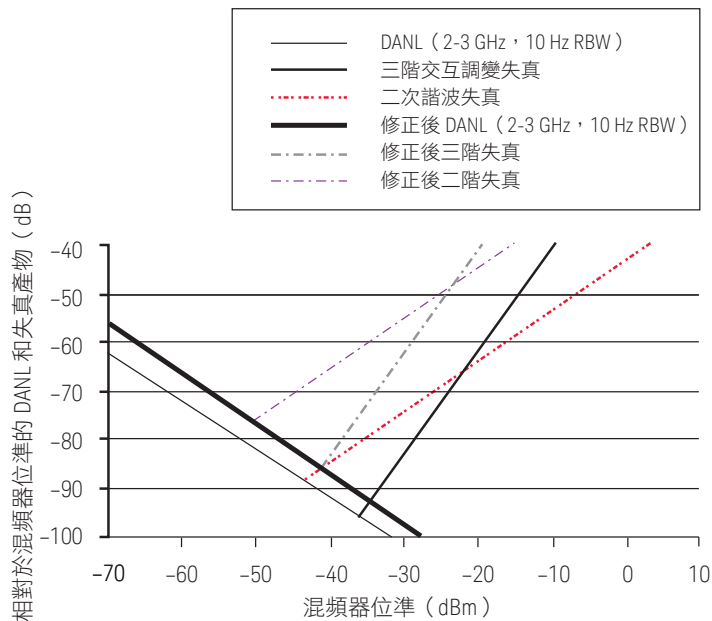


圖 5：校正振幅不確定性後的動態範圍圖

最佳化量測

前置放大器

前置放大器在量測低位準信號時非常有用。選擇前置放大器時，需考量兩個重要因素：增益和雜訊指數。前置放大器的雜訊指數（NF）必須低於頻譜分析儀的 NF（ $NF_{SA} = DANL + 172 \text{ dBm}$ ）。若前置放大器 NF 與增益的加總，小於頻譜分析儀的 NF，則前置放大器所導致的分析儀 DANL 降低量（在修正了前置放大器增益後）幾乎等於前置放大器增益。若增益太大，可用輸入衰減器將混頻器的功率位準最佳化。

前置放大器的缺點之一是，必須在系統內進行校驗，其效應會影響量測結果。Keysight ESA-E 系列頻譜分析儀提供選配的內建前置放大器，可降低系統的雜訊底線，但又不犧牲動態範圍。內建前置放大器位於系統內部，已先進行校驗以便於使用。圖 6 顯示未使用內部前置放大器時的雜訊底線，而圖 7 則顯示內部前置放大器開啟時，雜訊底線改善大約 15 dB。

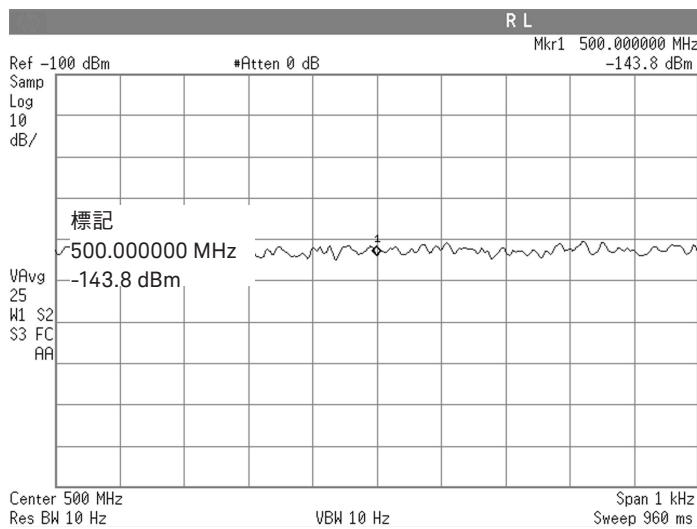


圖 6：Keysight ESA-E 系列頻譜分析儀未使用前置放大器的 DANL

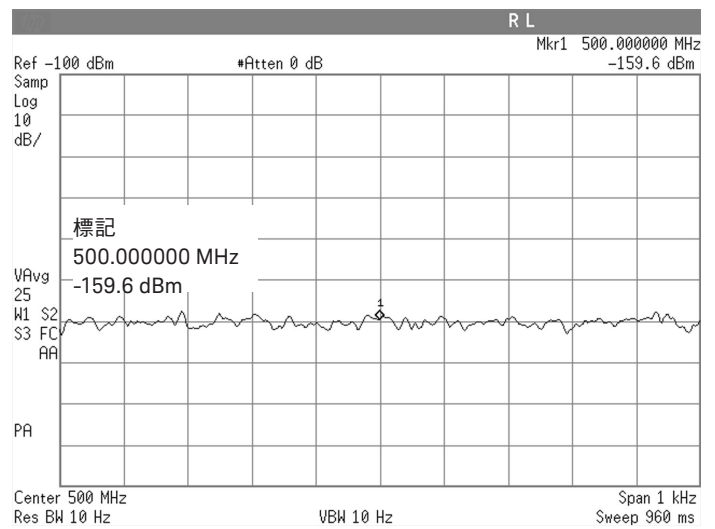


圖 7：Keysight ESA-E 系列頻譜分析儀使用前置放大器時的 DANL

衰減器

如前所述，在量測失真產物時，可能會需要調整混頻器的功率位準。假如混頻器的功率位準夠低的話，就可以確保我們所看到的失真產物是來自於待測物（DUT）。但若是功率太低的話，分析儀的雜訊底線就會將失真產物覆蓋過去。

在混頻器需有足夠的功率讓待測物的失真高於 DANL，但不能高到讓分析儀的失真蓋過待測物的失真。Keysight ESA 頻譜分析儀可讓您以 5 dB 為單位調整衰減器，以便針對特定量測達到最佳平衡。

衰減器測試

在執行失真量測時，很容易看出分析儀上顯示的失真產物是否已經在內部產生。輸入衰減器會衰減輸入信號，而信號通過混頻器之後，分析儀會以相同的倍率再將信號放大。因此如果改變輸入衰減而失真產物維持不變，失真就會是輸入信號的一部分。如果失真產物的振幅改變，就會在內部產生全部或部分失真。

外部濾波器

若要限制進入混頻器的功率以減少內部產生的失真產物，另一種方法就是衰減或去除我們不感興趣的信號。這可以利用外部濾波器來實現，它可提供預選器的功能。舉例來說，如果我們想要測試振盪器的諧波，就可以使用高通濾波器來濾掉基波，保留我們要觀察的諧波。碰到頻率很接近的信號（例如交互調變測試）時，可能就需要使用 high-Q 濾波器。

RBW 濾波器

由於雜訊是 RBW 濾波器的函數，因此必須小心解讀相位雜訊或 DANL 規格。

即使分析儀並沒有 1 Hz RBW 濾波器，相位雜訊規格也會標準化為 1 Hz RBW 濾波器。為了確定實際可達到的相位雜訊位準，就必須將定義的 1 Hz RBW 轉換為量測實際使用的 RBW 濾波器。修正係數可由下式決定：

$$\text{相位雜訊位準修正 (dB)} = 10 \log (\text{實際 RBW} / 1 \text{ Hz})$$

舉例來說，Keysight E4411B 在 10 kHz 偏移的相位雜訊規格為 -90 dBc/Hz，但最小的 RBW 設定值為 10 Hz。所以 10 Hz RBW 的修正係數為：

$$10 \log (10 \text{ Hz} / 1 \text{ Hz}) = 10 \text{ dB}$$

算入此修正係數之後，分析儀最小 RBW 為 10 Hz 時，實際可達到的相位雜訊為 -80 dBc。

DANL 也是針對特定 RBW 制定的，如果量測 RBW 不同的時候，就必須進行調整。相同的計算可用來決定 DANL 修正值：

$$\text{DANL 修正值 (dB)} = 10 \log (\text{量測 RBW} / \text{RBW 規格})$$

在判斷分析儀是否具備足夠的動態範圍以進行某些量測時，最小 RBW 濾波器顯然是一個重要因素。

量測其他信號

在比較小信號（二階或三階失真之外）和大信號的時候，我們前面介紹的失真曲線就不適用了。在這種情況下，混頻器產生的失真產物不會影響量測。舉例來說，如果我們量測的是四次諧波，則內部產生的失真會小到可以忽略。對於這些量測而言，只要混頻器的總功率低於混頻器壓縮而且顯示範圍夠大，那麼相位雜訊和 DANL 就會是限制因素。

4. 結論

頻譜分析儀的動態範圍限制了信號振幅可量測的範圍。動態範圍有好幾種解釋，包括量測範圍、顯示範圍、混頻器壓縮、內部失真和雜訊；適用的解釋會取決於量測的類型。藉由控制各種參數，例如混頻器輸入功率和 DANL，二階和三階動態範圍就可針對特定量測進行最佳化。為了達到最大無失真動態範圍，應調整混頻器的功率，讓 DANL 和內部產生的失真相等。

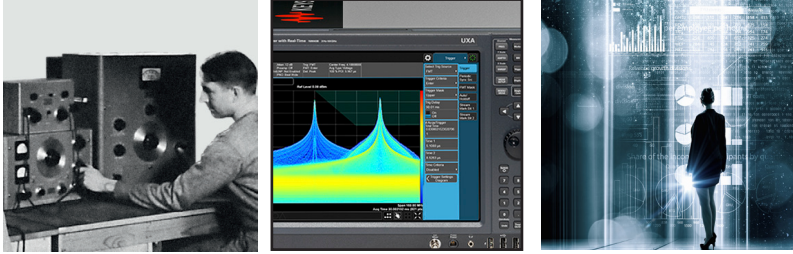
5. 參考文件

	文件 編號
頻譜分析基本原理，應用說明	5952-0292
針對消費性電子產品線進行有效的頻譜分析測試，應用說明	5966-0367E
頻譜分析儀的量測與雜訊，應用說明	5966-4008E
Keysight ESA-E 系列頻譜分析儀，產品規格書	5968-3386E

演進

是德科技獨一無二的硬體、軟體，支援及專家組合，可協助您拓展全新的局面。

讓我們是帶動前瞻技術不斷演進的推手。



薪火相傳 - 惠普將火炬傳給安捷倫，再由安捷倫交棒給是德科技

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 桃園市平鎮區高雙路 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

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。

是德科技服務

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

www.keysight.com/find/service

是德科技擁有領先業界且陣容堅強的專業人員、量測程序和測試工具，可提供一應俱全的設計、測試和量測服務。如此一來，我們協助您部署新技術，並改善量測程序，以便降低成本。



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。



是德科技保固保證方案

www.keysight.com/find/AssurancePlans

是德科技提供長達十年保固，以避免任何意外的維修費用，確保儀器能夠在規格範圍內運作，讓您能永遠信賴儀器提供的量測準確度。

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。

DEKRA Certified
ISO9001 Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

是德科技 -

DEKRA Certified ISO 9001:2015

品質管理系統。

本文件中的產品規格及說明如有修改，恕不另行通知。

© Keysight Technologies, 2006-2014, 2018

Published in USA, August 13, 2018

中文版：5968-4545ZHA

www.keysight.com.tw

KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

Unlocking Measurement Insights