

如何全面降低射頻向量信號產生器的量測不確定性

簡介

測試設備可評估您的設計效能，並驗證待測裝置（DUT）是否能如預期般運作。為進行有效的評估，測試設備的效能必須優於待測裝置。如欲將量測不確定性最小化，以提升測試設備效能，您須仔細考量測試平台的所有元件。

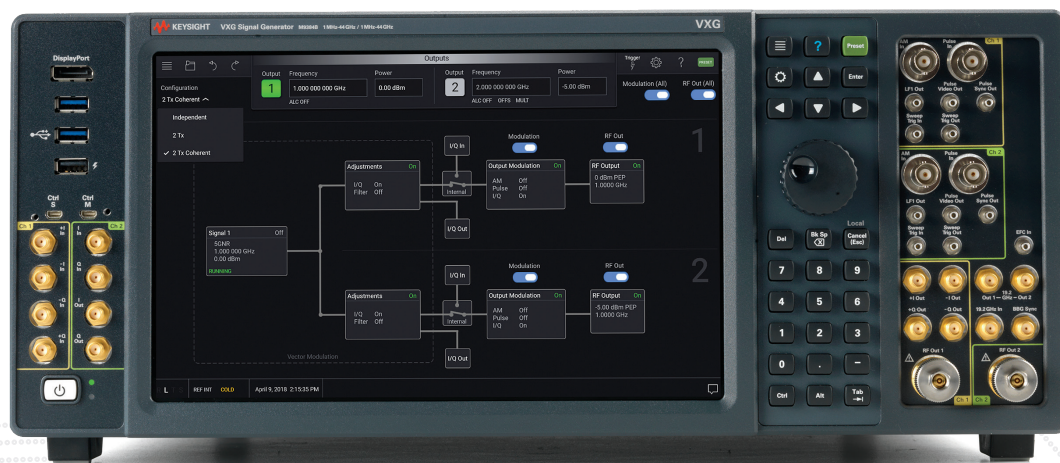
本應用說明可協助您盡可能降低量測不確定性，以便增進測試系統中的測試激發。

您將了解如何使用射頻向量信號產生器，獲得具最佳信號品質的向量調變信號。



想要全面降低量測不確定性，首要之務是了解您需要何種等級的信號產生器功能、特色及效能。

唯有使用合適的設備，方能產生有效測試 DUT 所需的信號。請選擇有助於提高洞察力、經驗及創意的信號產生器和量測軟體，以達成您的設計目標。



向量信號產生器

隨著現今通訊系統的數位調變方案變得更多元，許多系統測試已轉而採用向量信號產生器（VSG）。配有雙通道任意波形產生器（AWG）的 VSG，可產生複雜的基頻 I/Q 波形，如圖 1 所示。

雙通道任意波形產生器，可控制波形區段的播放序列，這些波形區段會被載入內部基頻產生器的隨機存取記憶體中（RAM）。基頻產生器的輸出 I/Q 信號則被送入 I/Q 調變器，並升頻為中頻（IF）及射頻。射頻輸出單元中具有放大器、衰減器及自動位準控制電路，以便對輸出位準進行精準控制。接下來我們將探討這些子系統常見的錯誤根源，並介紹克服這些問題的方法。

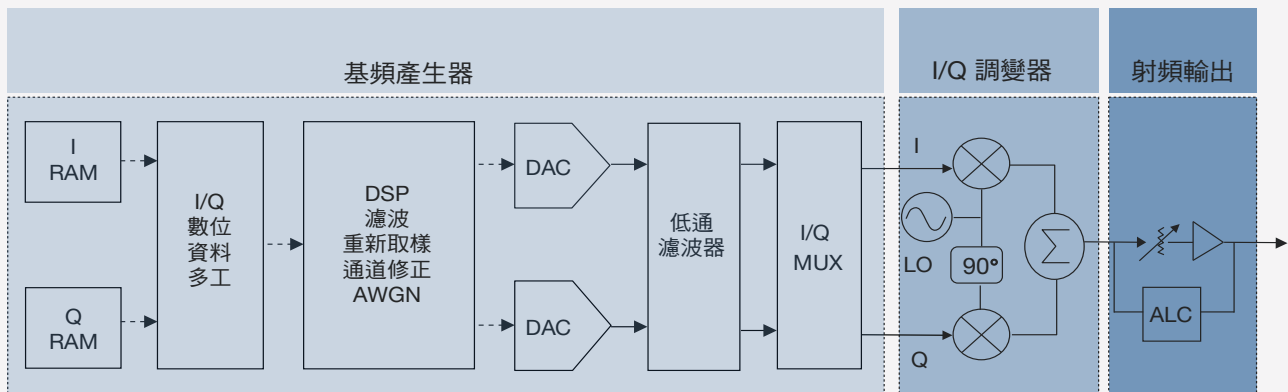
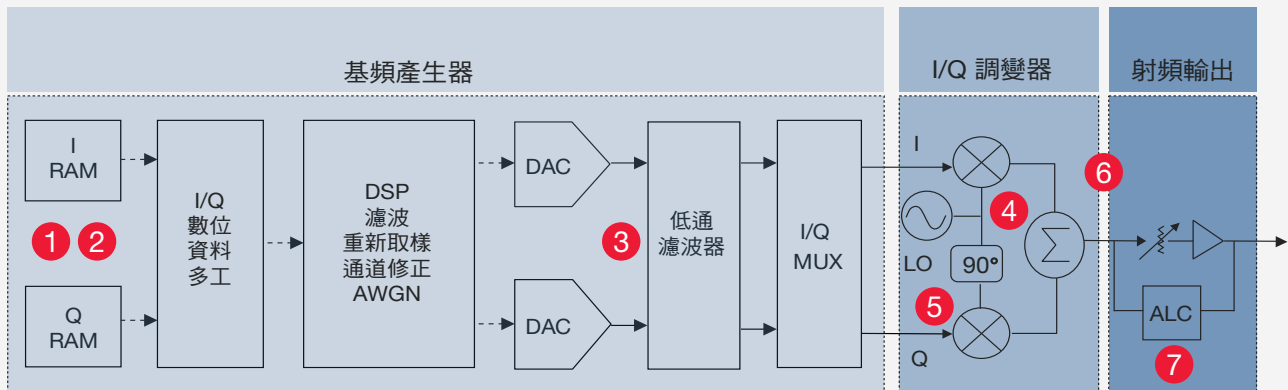


圖 1：簡化後的向量信號產生器結構圖

常見的誤差源



基頻產生器

- 1. 相位不連續性
- 2. 插入法過擊
- 3. 取樣圖像

I/Q 調變器

- 4. I/Q 減損
- 5. 相位雜訊

射頻輸出

- 6. 頻率響應
- 7. ALC 的輸出位準誤差



基頻產生

波形相位不連續性

任意波形產生器常用於重複播放先前取樣的波形。波形播放的副作用是，頻譜再生和失真，主要是某個波形播放結束，下一次開始重複播放之間的相位不連續性所造成的。

例如，圖 2 的取樣正弦波不能覆蓋正弦波的整個週期。重複播放波形時，相位不連續性會出現在波形播放結束和下一次開始重複播放之間的相變點。這種相位不連續性會導致週期性的頻譜再生和失真。圖 3 顯示具有和沒有相位不連續性所產生的衝擊。

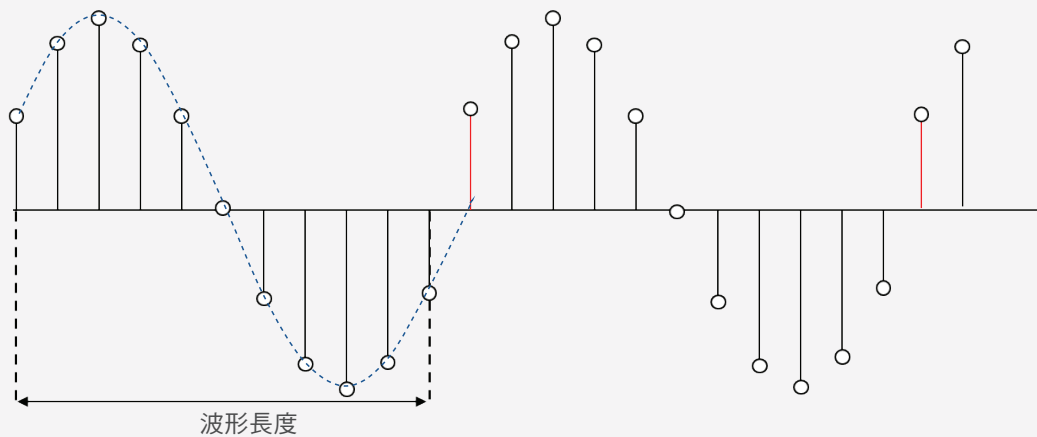
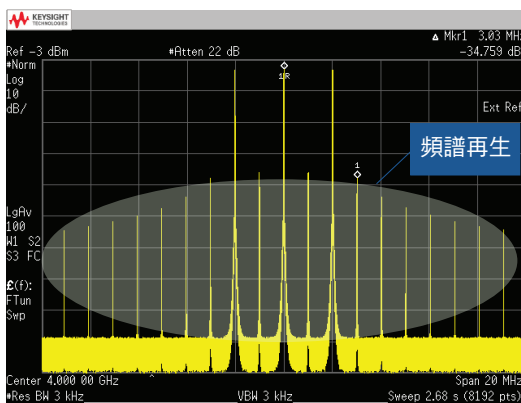
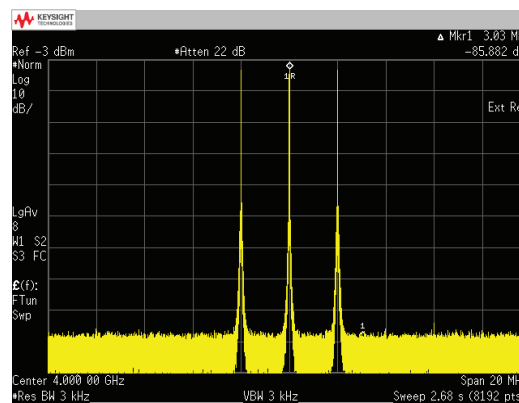


圖 2：具有相位不連續性的取樣正弦波波形



3-tone - 20 MHz 頻寬



3-tone - 20 MHz 頻寬

圖 3：具有和沒有相位不連續性所產生的衝擊

避免相位不連續性

建立波形區段時，模擬整數週期有助於避免週期性波形出現相位不連續性，如圖 4 上方所示。

處理分時多工（TDMA）或脈衝週期性波形時，您可在波形開始處添加結束時間，並在波形結束處減去同等的結束時間，以便去除相位不連續性，如圖 4 下方所示。這樣的調整還可避免頻譜再生。

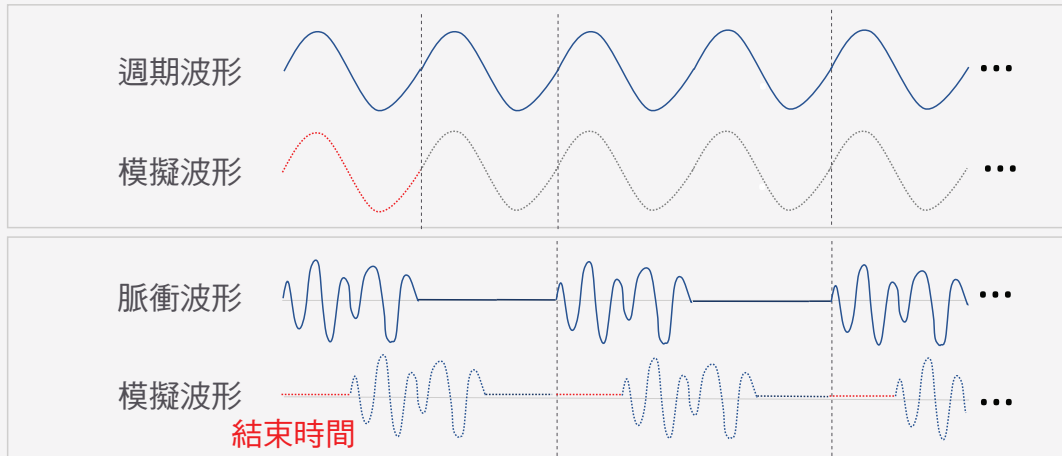


圖 4：模擬週期性波形及 TDMA 波形



- 如果週期性波形中有 N 個樣本，但只有最前面對 $N-1$ 個樣本儲存在波形區段中，如圖 5 所示。
- 如果波形週期的大小超過 AWG 可用的波形播放記憶體，則可能出現週期性的相位不連續性。為此，請選擇具較大空間的播放記憶體選項，以長時間保存波形。

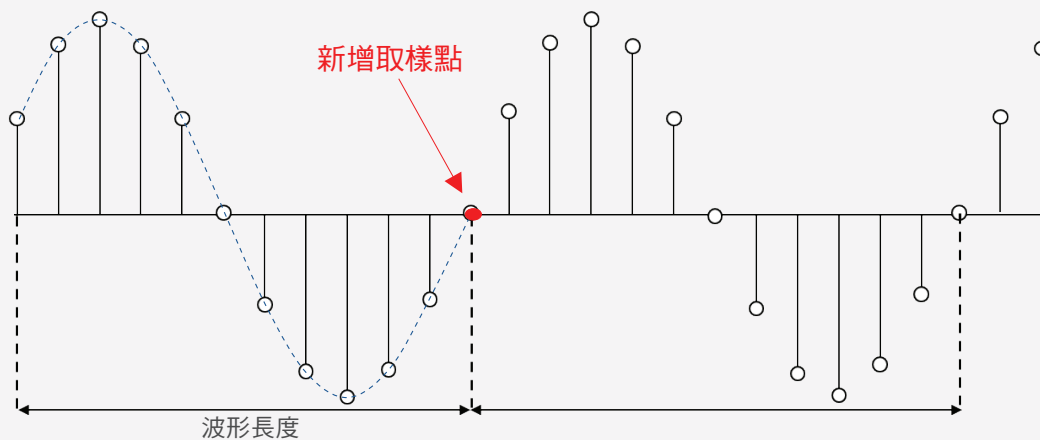


圖 5：為信號週期增加一個樣本

插入法過擊 (Interpolation Overshoot)

雙通道任意波形產生器讓您能靈活地產生現代的複雜調變信號。您可在 PC 上模擬設計並建立波形檔案，接著使用任意波形產生器，將波形檔案轉換成類比信號。但是，在數位類比轉換的過程中，由於插入法過擊會導致非預期的錯誤，請您務必謹慎執行。

數位類比轉換超範圍 (Digital-to-Analog Conversion Over-Range)

基頻產生器使用插入演算法來重新取樣並重建波形。然而，內插法會造成過擊，進而導致數位類比轉換器（DAC）的超範圍誤差。

例如，如果基頻波形具有快速上升信號緣，則內插器的濾波器過擊，將變成插入基頻波形的成分，如圖 6 所示。該響應會在上升信號緣的峰值，造成漣波或振鈴效應，而此漣波會超過 DAC 的輸出範圍上限（紅線），造成信號產生器回報出現 DAC 超範圍誤差。

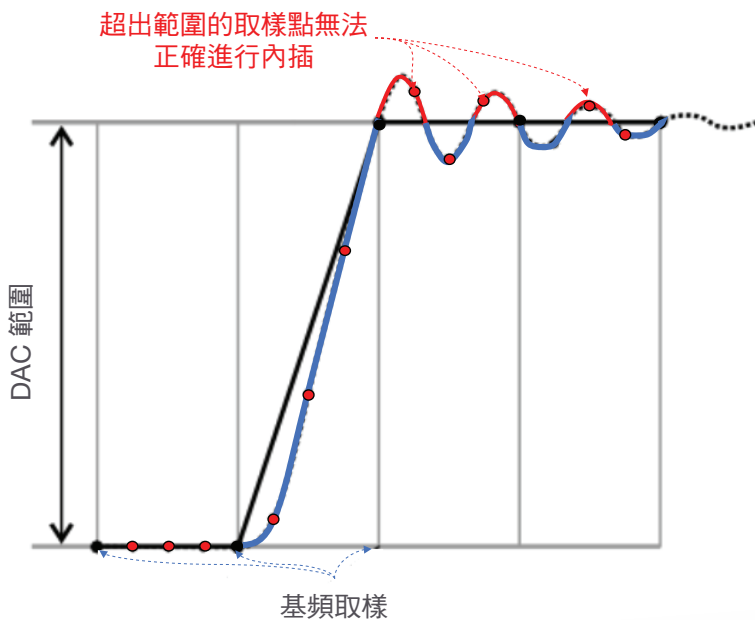


圖 6：DAC 中的內插濾波器超越基頻波形的範圍

縮放波形以消除 DAC 的超範圍誤差

為避免出現 DAC 超範圍問題，您須調整 I 和 Q 的輸入值，讓任何過擊都能保持在 DAC 的範圍內。您可縮減基頻波形的振幅，並維持其基本形狀和特性，如峰均功率比（PAPR），如圖 7 所示。為達到最大動態範圍，請選擇不會導致 DAC 超範圍誤差的最大縮放比值。

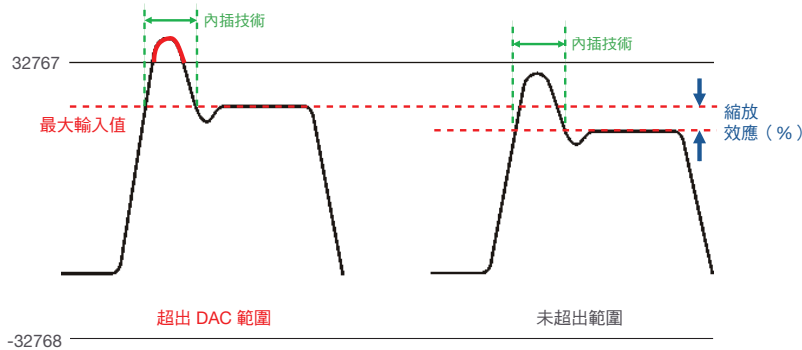


圖 7：使用波形縮放功能，避免數位類比轉換器超出範圍

透過 Runtime 縮放來加速評估

Keysight MXG N5182B 及 EXG N5172B 等新型向量信號產生器，均提供執行時間（runtime）波形縮放功能，讓您能即時評估如何在失真效能和動態範圍之間進行取舍。此功能不會影響所儲存的資料，您可將 runtime 縮放功能套用於任一波形區段或波形序列。

圖 8 顯示對失真效能進行的範例，其中波形從 100% 縮小到 70%。其刻度顯示三階交互調變失真（IMD3）改善了 5-dB。

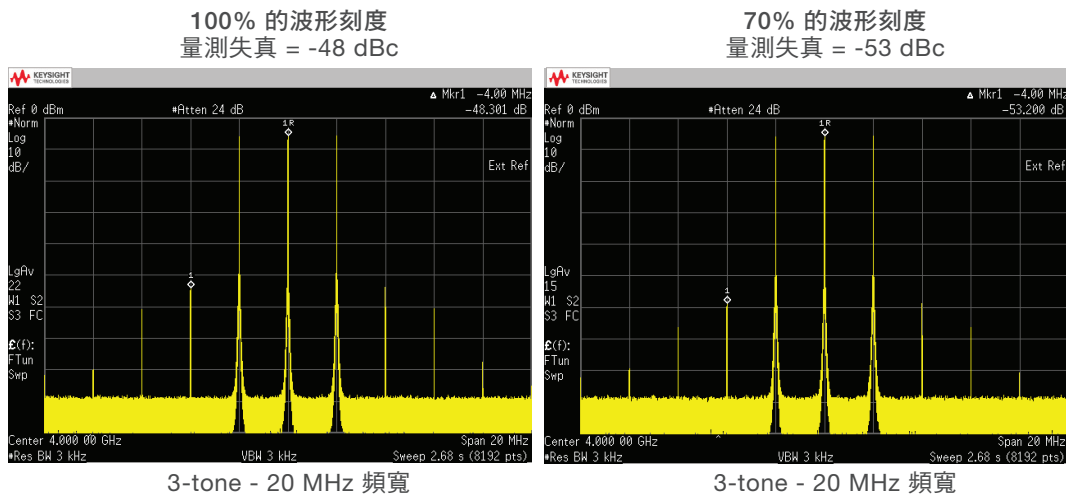


圖 8：藉由改變波形刻度來實現波形雙音頻測試激發

取樣圖像

透過數位類比轉換器（DAC）播放取樣波形，您既可產生想觀測的信號，也可建立高階圖像，又稱為混疊信號。這些混疊信號位於取樣頻率（ f_s ）的倍數處，如圖 9 所示。

我們可使用低通濾波器（LPF）來刪除這些高階圖像。此 LPF 又稱為「抗混疊濾波器」或「重建濾波器」，常用於重建原始、所需的信號。

為了成功隔離所需信號，濾頻器的截止頻率必須夠低才能拒斥圖像，而且必須夠高，才能覆蓋所需信號的整個頻寬。

圖 9 的濾波器無法完全拒斥圖像。為了成功去除圖像，在確定波形取樣率之前，您需了解重建濾波器的頻寬，以確保濾波器能夠拒斥所有圖像。

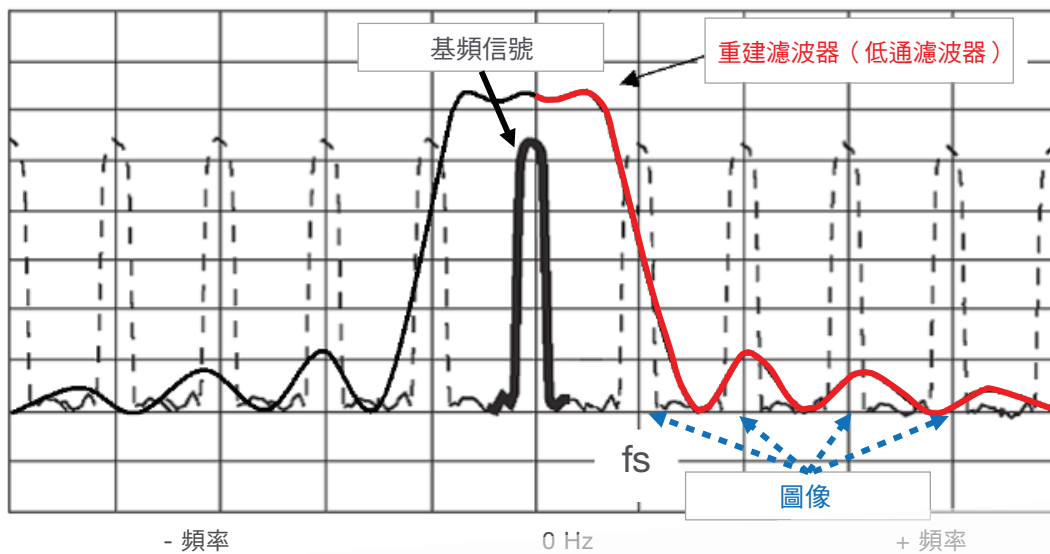


圖 9：使用重建濾波器移除取樣圖像

DSP 波形重新取樣的優點

在建立波形時，研發工程師通常會使用軟體來部署倍增取樣，以便將圖像從重建濾波器的截止頻率中移除，如圖 10 所示。問題是，此技術同時也會增加波形檔案的大小，而且在設計用於播放的波形時，記憶體不足將成為一大限制。

新的向量信號產生器支援硬體重新取樣，可利用單一寬頻重建濾波器來移除取樣圖像。在將波形資料發送到 DAC 之前，需在數位信號處理器（DSP）中進行重新取樣。藉由結合使用倍增取樣和信號抽取技術，插入法重新取樣處理可與 DAC 的時脈率相匹配。

硬體重新取樣讓您能專注於波形產生，而 DSP 則負責重新取樣，取樣率與 DAC 相匹配。

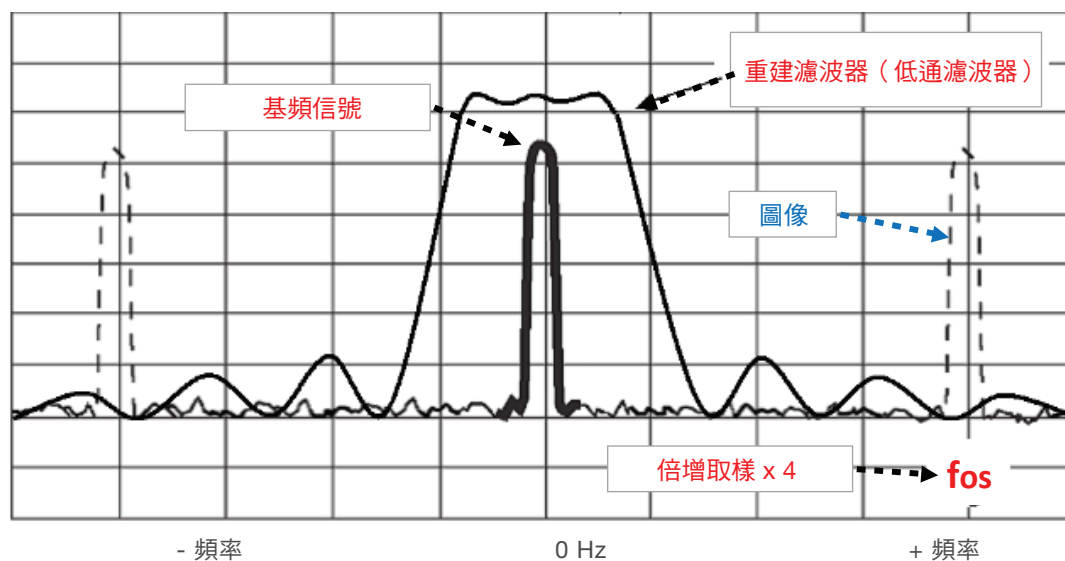


圖 10：以四倍的倍增取樣率來移除取樣圖像

I/Q 調變器

基頻 I/Q 減損

在數位發射器中，I（同相）和 Q（正交）信號，與相同的本地振盪器（LO）信號混合，但在其中一個 LO 路徑上，放置一個 90 度移相器，如圖 11 所示。90 度移相器可以讓 I 和 Q 信號彼此正交，以免互相干擾。I/Q 缺損會導致量測不確定性，可能是由 I 和 Q 信號路徑中的不匹配元件所引起。

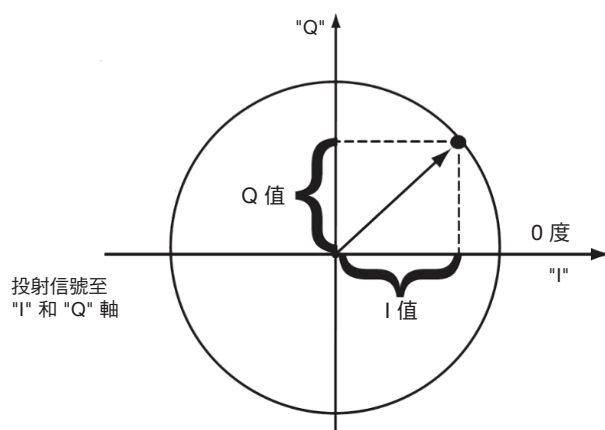


圖 11：I/Q 圖



如需了解如何辨別發射器設計中最常見的減損，請閱讀《數位射頻通訊發射器設計的測試與除錯》

I/Q 增益不平衡

如欲進行 I/Q 增益不平衡特性分析，您可將 I 信號的增益與 Q 信號的增益做比較。

I/Q 正交偏差

如果 I 和 Q 通道的相位偏移不是 90 度，就會發生正交誤差。

I/Q 偏移

I/Q 偏移（又稱為 I/Q 原點偏移）以 dB 為單位，代表載波饋通信號或基頻直流偏移的幅度。

I/Q 時脈偏差

調變器、DAC、或 I 和 Q 路徑中不同的電力長度，都可能導致 I 和 Q 信號間出現不必要的延遲。

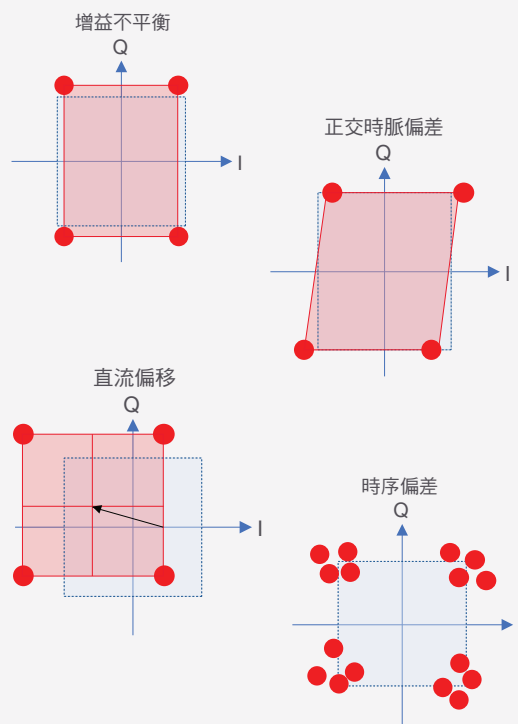


圖 12：常見的基頻 I/Q 減損

基頻 I/Q 調整

基頻 I/Q 缺損可能會出現在基頻產生器、I/Q 調變器或是射頻單元中。將 I/Q 缺損最小化並非絕對必要或需要。其實有些應用軟體和測試，需要一定程度的缺損，才能精準模擬信號，或進行容差度測試。

向量信號產生器讓您能夠使用 I/Q 調整來補償或是增加 I/Q 信號的缺損。表 1 是透過 I/Q 調整獲得的 I/Q 效應和缺損的摘要。


表 1：基頻 I/Q 調整

| I/Q 調校 | 效應 | 缺損 |
|--------|-------------|----------|
| 偏移 | 載波饋通 | 直流偏移 |
| 正交角 | 誤差向量振幅（EVM） | 相位偏差 |
| | I/Q 圖 | I/Q 路徑延遲 |
| I/Q 偏差 | EVM 誤差 | 高取樣率相位偏差 |
| | | I/Q 路徑延遲 |
| I/Q | I/Q 振幅差 | I/Q 增益比 |

基頻 I/Q 校驗

例行的校驗可補償與溫度變化相關的校驗漂移，所導致的量測不確定性。當您執行 I/Q 校驗時，該校驗資料的優先性，大於工廠所提供的校驗資料。

例行的 I/Q 校驗不僅可以讓您修正內部基頻產生器的缺損，同時還可修正外部 I/Q 輸入信號的缺損。您可以選擇儀器的整個頻率，或是指定校驗開始和停止的頻率，以縮短校驗週期。



如果室溫和最新的校驗溫度變化超過攝氏 ±5 度，請執行 I/Q 校驗。

相位雜訊

相位雜訊描述了振盪器的頻率穩定性。它可量測頻域中，振盪器信號周圍的雜訊頻譜。

我們通常在遠離載波頻率功率的特定頻率下，於 1 Hz 頻寬內的單旁波帶（SSB）功率上量測相位雜訊。圖 13 顯示了 SSB 相位雜訊量測結果。

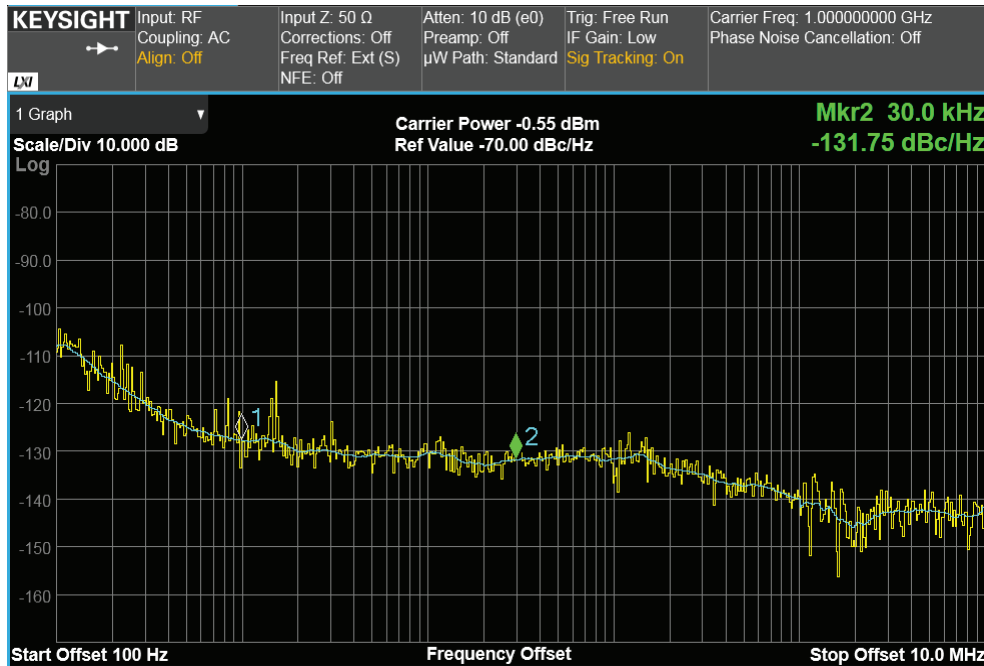


圖 13：SSB 相位雜訊量測

當相位雜訊很重要時

信號源相位雜訊效能，是航太與國防以及數位通訊之特定應用的限制因素。

雷達應用：例如，如果想要觀測的降頻信號被相位雜訊掩蓋掉，則雷達接收器便無法偵測出移動中的物體。

數位調變：相位雜訊對星座圖的影響，是符號的徑向模糊。

正交分頻多工：具有相位雜訊的副載波將擴散並干擾到其他副載波。



請下載《在射頻接收器中產生雜訊》白皮書，以了解相位雜訊的影響，以及如何最佳化信號產生器的相位雜訊特性。

最佳化相位雜訊效能

最佳化相位雜訊效能並非必要的，也不一定是工程師想要的。某些應用和測試需要一定程度的相位雜訊，來進行準確的信號模擬或容忍度測試。

Keysight N5182B/N5172B 射頻信號產生器方便使用者調整合成器相位雜訊的缺損。使用此功能，您可藉由控制兩個頻率點（ f_1 和 f_2 ）和振幅值（ L_{mid} ），將相位雜訊導入信號產生器，如圖 14 所示。

圖 15 顯示具有相位雜訊缺損的連續波信號。起始頻率 f_1 為 1 kHz；停止頻率 f_2 為 30 kHz；振幅值 L_{mid} 為 -90 dBc/Hz。

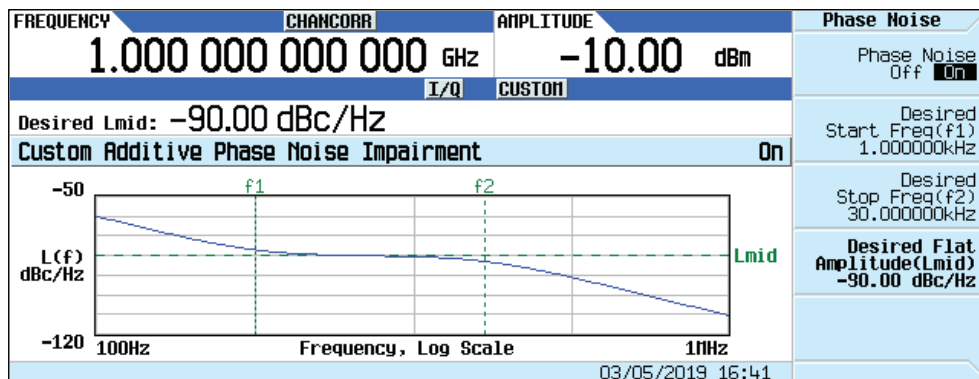


圖 14：在信號產生器中加入即時相位雜訊缺損

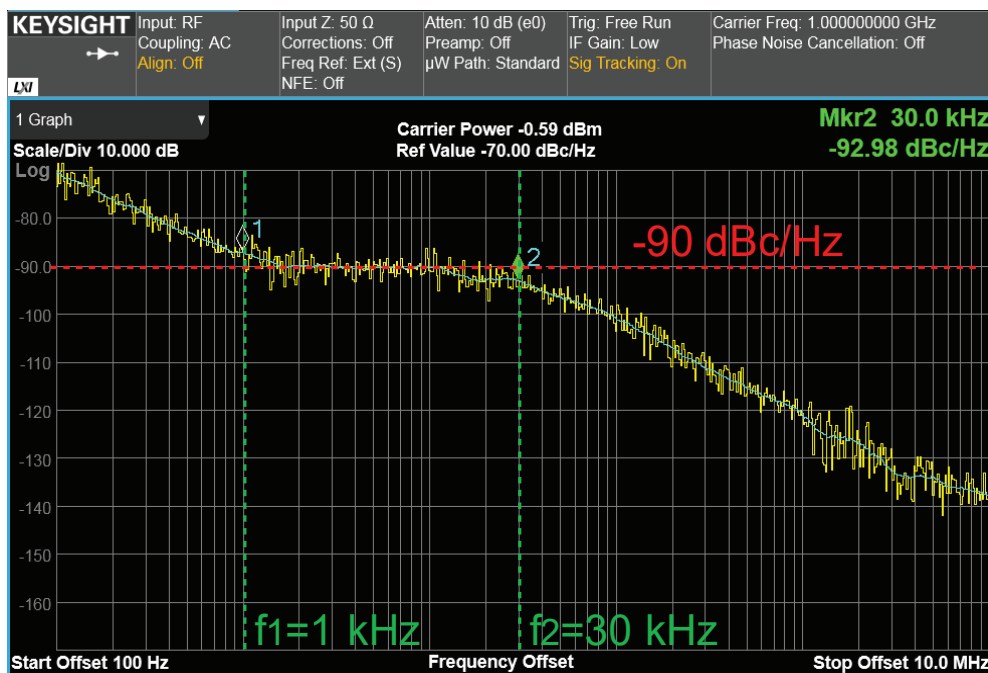


圖 15：一個有相位雜訊缺損的 CW 信號

內部演算法使用信號產生器的即時基頻 ASIC 和處理器加速器，來產生自訂的相位雜訊。
如此一來，您可模擬更真實的信號，以便有效評估待測裝置並進行除錯。

圖 16 顯示在 30 MHz 符碼率下，64-QAM 的解調分析。如圖 14 所示，在相位雜訊缺損設為 OFF（上）和 ON（下）時的信號解調量測。RMS 相位錯誤從 1.85° 升至 2.20°，誤差向量振幅從 1.73% 上升至 1.99%。

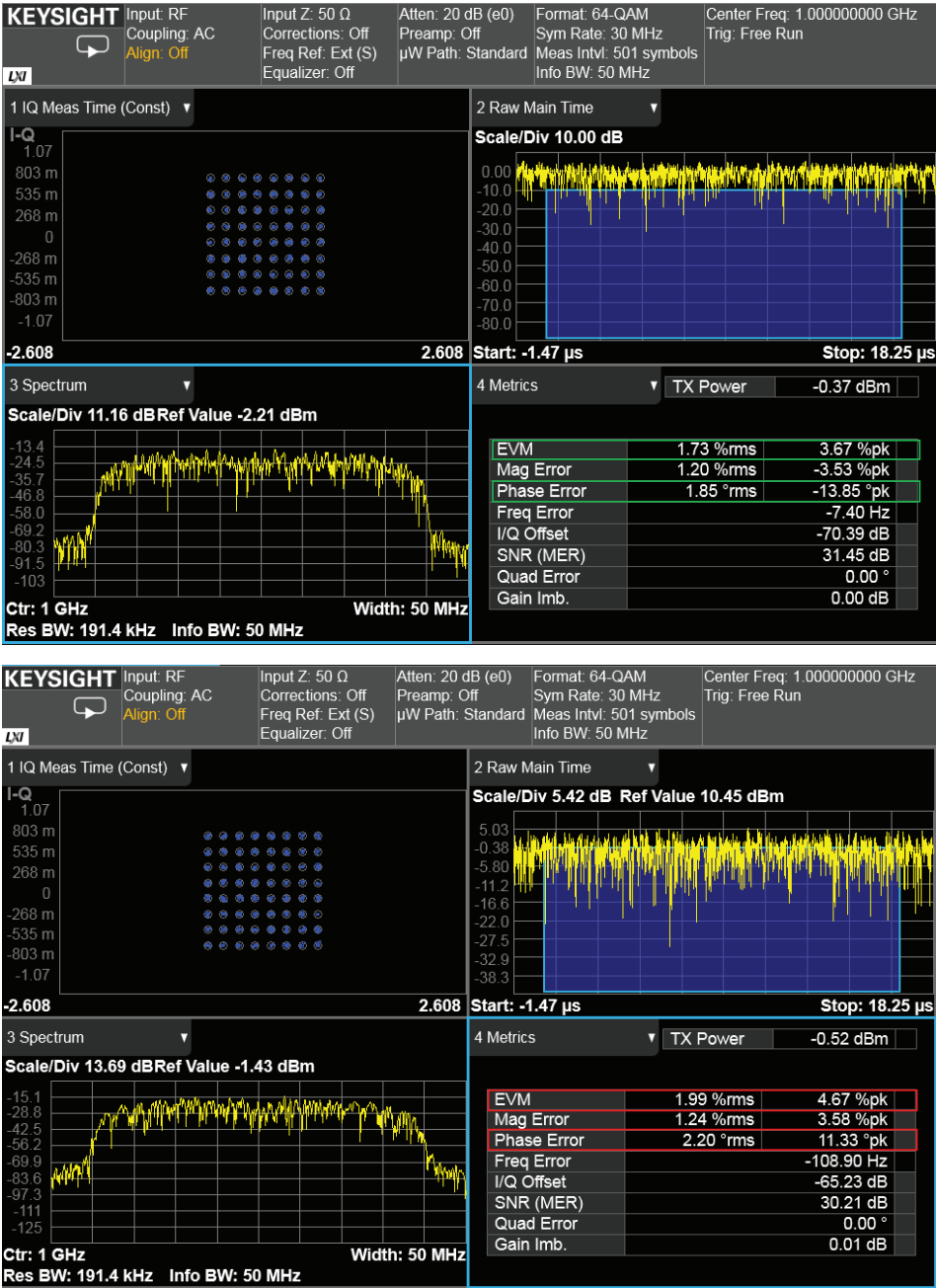


圖 16：對有（下）和無（上）相位雜訊缺損的信號進行解調



射頻輸出單元

頻率響應

當信號產生器輸出調變信號時，信號產生器內部的元件，如混頻器、濾波器及放大器，會產生頻率響應，因而降低調變品質。這些響應出現在不同的頻率和輸出位準，而且包含振幅和相位響應。

圖 17 顯示在 100 MHz 符碼率下，64-QAM 的解調分析。寬頻寬頻率響應會使得 I/Q 星座圖變得混亂，而且信號無法正確進行解調。

開啟信號分析儀的自調適等化功能後，您可以看到信號的振幅和相位響應，如圖 18 的右上圖和右下圖所示。



自調適等化器可動態建立並套用 FIR（前饋）來補償濾波器，以移除調變信號的線性誤差，包括群組延遲失真、頻率響應誤差，以及信號反射或多重路徑失真。

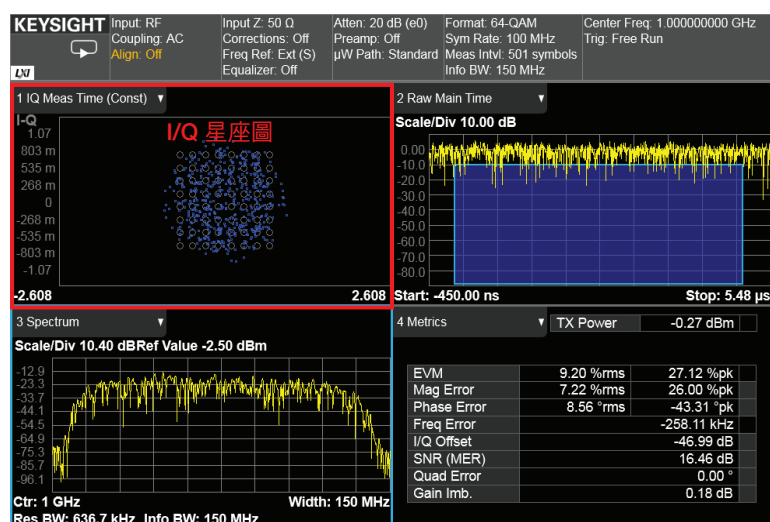


圖 17：頻率響應對信號調變品質的影響

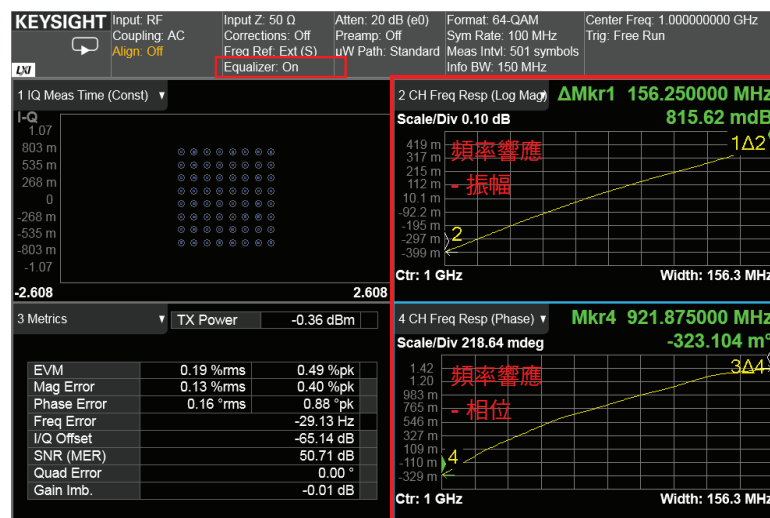


圖 18：信號的振幅及相位響應

內部通道校正

向量信號產生器支援內部校驗例程序，以便收集基頻和射頻振幅及相位誤差的修正資料。這些量測是在整個射頻頻率和所有功率位準範圍內進行的。修正資料包括即時套用於基頻波形的修正濾波器參數。

DSP 可處理部署即時通道修正所需的資料，在產生寬頻寬信號時，這項功能尤為重要。

在圖 19 中，您可以看到啟用內部通道修正的 64-QAM 信號之解調分析。您可以看到符號集中星座圖中（左上），而且 EVM 下降到 0.82%。



請下載《使用下一代信號產生器來提高振幅準確度》白皮書，以了解如何提高量測的振幅準確度。

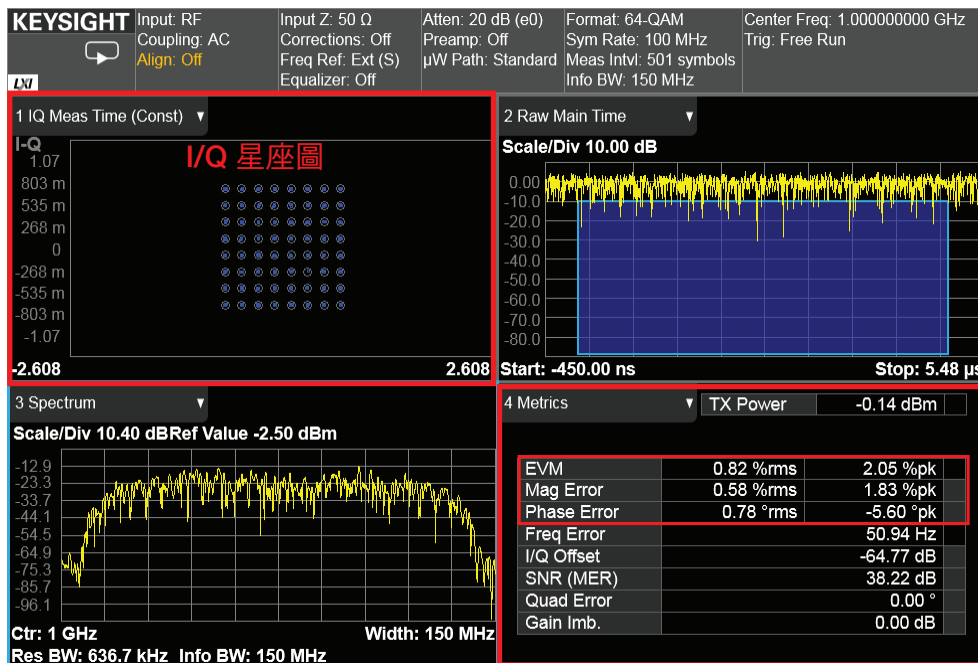


圖 19：開啟產生器內部通道修正功能

在開啟修正功能而且頻率改變的情況下，韌體會計算新的通道修正濾波器。此過程需要額外的處理時間，時間長短取決於頻率切換器的類型。

輸出位準錯誤

步進衰減器和自動位準控制（ALC）電路，決定了信號產生器的輸出功率範圍，如圖 20 所示。步進衰減器可提供粗略功率衰減，以 5 dB 步進，以實現更低的功率位準。ALC 電路則可在衰減器的保持範圍（hold range）內，提供精細的功率位準調整，進而在信號產生器的射頻輸出埠，產生非常準確的振幅位準。

某些調變類型完成不使用 ALC 電路，以免導致輸出位準誤差。此時可過關閉 ALC 並使用功率搜尋，就能獲得所需的功率位準準確度。

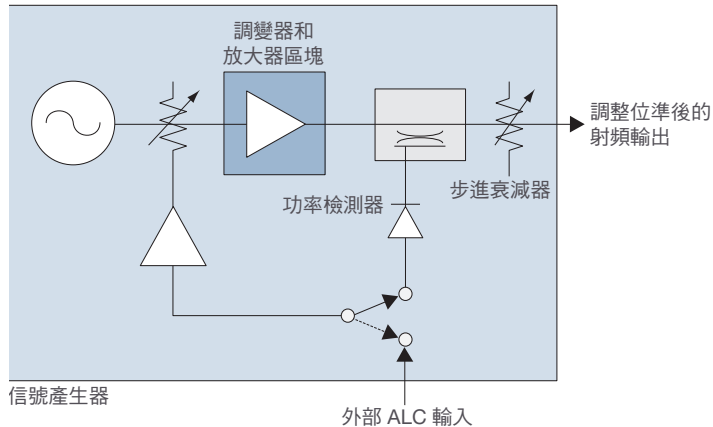


圖 20：ALC 反饋電路的簡化結構圖

ALC 關閉及功率搜尋

如果 ALC 電路無法精準決定射頻位準的話，可以關閉 ALC。一旦關閉後，信號產生器就沒有閉環反饋信號源，因而無法偵測射頻位準並修正誤差。在這些情況下，功率搜尋功能可用於校驗射頻位準。

下列是適用於功率搜索的使用案例：

- 非反覆脈衝調變
- 反覆脈衝調變的脈衝寬度小於 1 μ s
- 高峰值對均值功率調變信號
- 要求最低調幅（AM）雜訊的應用
- 低符碼率的 I/Q 調變，具有最佳的頻譜再生
- 低符碼率 I/Q 調變的脈衝調變

請下載《PSG 向量信號產生器的 I/Q 調變注意事項》白皮書，以了解如何提高量測的振幅準確度。



什麼是 ALC？

儘管溫度變化，ALC 電路仍可將輸出功率維持在指定的位準。方向耦合器和功率檢測器可用於量測輸出射頻功率。檢測到的功率位準會反饋回 ALC，此輸入將用於調整 ALC 調變器，以精準控制輸出位準。

什麼是功率搜索？

功率搜尋為例行的校驗程序，用於在關閉自動位準控制時，設定準確的射頻位準。功率搜尋循環從暫時關閉調變時開始。接著，開啟 ALC 系統，時間剛好足以確定 ALC 的調變器值。這使得演算法可以確定正確的射頻位準。最後再重新開啟調變器。接著，射頻系統的增益將維持不變，即使沒有閉環反饋，也能提供準確的射頻位準。

結語

想要全面降低量測不確定性，首要之務是了解您需要何種等級的信號產生器功能、特色及效能。

唯有使用合適的設備，方能產生有效測試 DUT 所需的信號。請選擇有助於提高洞察力、經驗及創意的信號產生器和量測軟體，以達成您的設計目標。

請至是德科技**射頻測試部落格**中，查閱更多的量測最佳實作。有關是德科技信號產生器的詳細資訊，請上網查詢 www.keysight.com/find/sg。



詳細資訊，請上網查詢：www.keysight.com

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。是德科技聯絡窗口：www.keysight.com/find/contactus

