

# 鎖相迴路(PLL)電路的頻率 和相位之設置時間測量

2019/MAY LARRY CHENG

## 前言

跳頻是避免干擾和提高安全性的最常用方法之一。由於數據吞吐量是無線傳輸系統的關鍵參數，因此頻率變化或跳躍的時間至關重要。因此，頻率穩定時間對於頻率合成器的開發人員來說是非常重要的測量。本文提供了有關頻率和相位之設置時間測量的基本訊息，以及如何在現代相位雜訊分析儀中實現測量。

量測範例顯示了此測量功能的可能性，並幫助使用者理解和使用此方法。

## 1. 介紹

現代無線電通信系統經常採用跳頻方法來更好地抑制干擾或防止衰落。由於這種跳頻影響數據吞吐量，因此它的時間是有限的。因此，快速頻率穩定是關鍵特性之一。

到目前為止，需要複雜的測試設置來確定跳頻的建立時間。然而，通信系統開發人員面臨的時間壓力需要一種簡單有效的測量方法。本文介紹了此測量的不同技術。R & S FSWP 相位雜訊分析儀使用現代化寬頻概念執行頻率和相位之設置時間測量，並通過整合的暫態分析功能輕鬆便捷地獲得結果。

## 2. 設置時間測量之概述

### 2.1 頻率設置時間的理論背景

頻率設置通常在於現代通信系統（例如移動電話或雷達系統）的組件的開發期間測量。測量的數量化是指電路需要從一個頻率跳到另一個頻率的時間。只有在電路在新頻率上設定後才能開始數據傳輸。在大多數通信系統中，內部頻率振盪器通過 PLL 頻率鎖定到共同的參考頻率，以確保頻率精度並符合跳頻的時序要求。

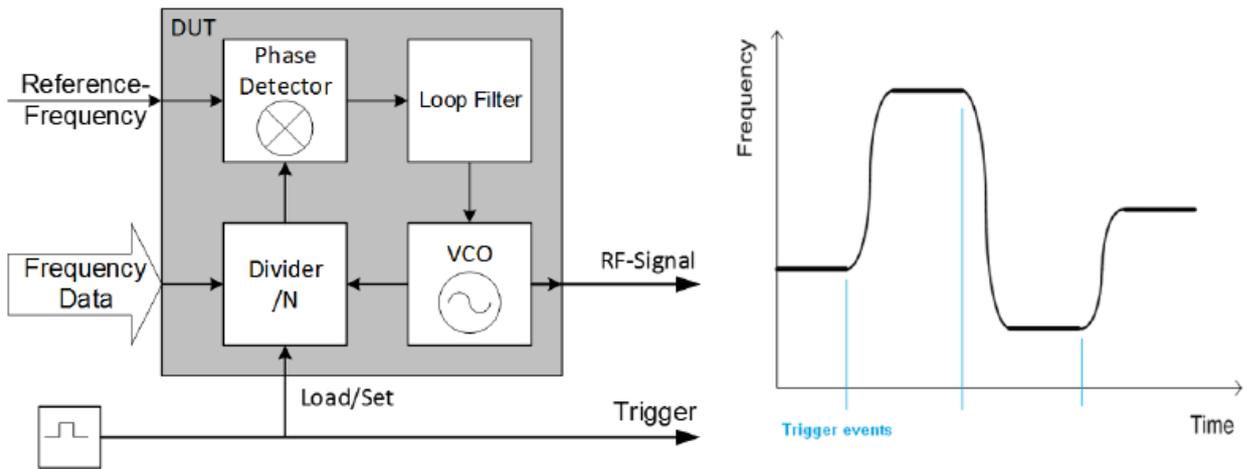


圖 1：跳頻合成器的簡化框圖

PLL 的特性決定了整個系統的相位雜訊。除了對相位雜訊的影響外，PLL 中的迴路濾波器對頻率或頻道變化後系統頻率和相位穩定所需的時間量有很大影響。跳躍後可接受一定程度的頻率和相位偏差。考慮該偏差以精確確定設置時間。

### 2.2 過往的頻率穩定測量

許多標準建議基於頻率鑑別器的頻率設置時間測量。建立時間的測量是在連接到鑑別器之視頻輸出的示波器上進行的，因為這是獲得良好分辨率和自動測量功能進行定時測量的唯一方法。

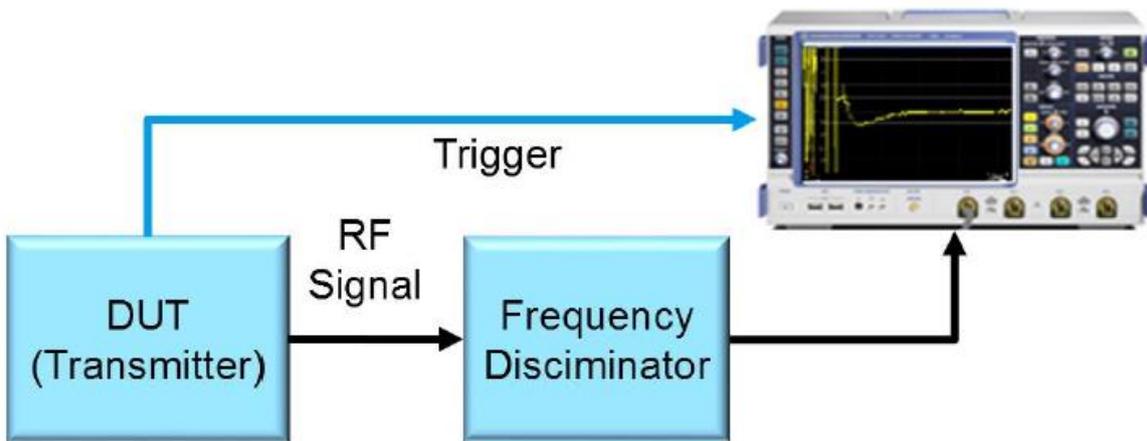


圖 2：用頻率鑑別器進行測試設置

測量方法依賴於頻率鑑別器的可用性，該鑑頻器適合於被測設備的 RF 頻率和頻寬。

#### 2.2.1 使用訊號分析儀進行測量

作為鑑別器可用性的簡單方法，使用帶有數位取樣的訊號分析儀可以對寬頻率範圍進行寬頻測量。高速類比/數位轉換器 (ADC) 對輸入信號進行取樣，並將測量數據 (樣本) 保存在大型存儲器中。A/D 轉換器的頻寬和取樣率加上可用存儲器決定了採集時間，可能的頻率分辨率以及可以測量頻率穩定的範圍。

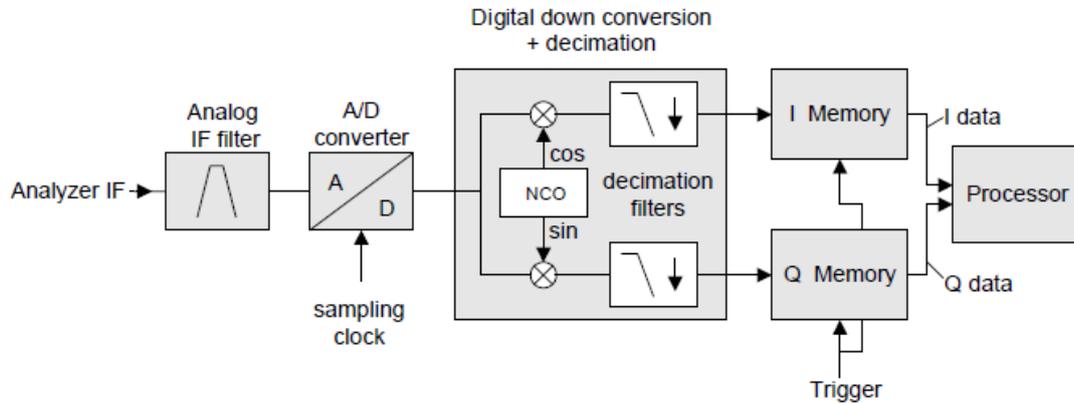


圖 3：訊號分析儀之中頻 IF 數化的框圖

該框圖顯示了一般訊號分析儀中 IF 取樣的實現。類比 IF 濾波器限制 IF 信號遵守奈奎斯特定理。一般的頻寬範圍為 10 MHz 至 2 GHz。A/D 轉換器對類比 IF 信號進行取樣。為了實現數據速率抽取和減小數據量，取樣輸出訊號基於定義的頻寬進行數位濾波，從而降低取樣率。頻寬決定了後續頻率穩定測量的時間分辨率。濾波的 I/Q 樣本存儲在存儲器中以便進一步處理。可以使用內部或外部觸發信號控制存儲過程，從而最佳地調整測量任務的可用存儲長度。訊號分析儀中的處理器包括處理整個解調過程的軟體。所有計算都基於存儲在測量數據存儲器中的相同 I/Q 數據集。

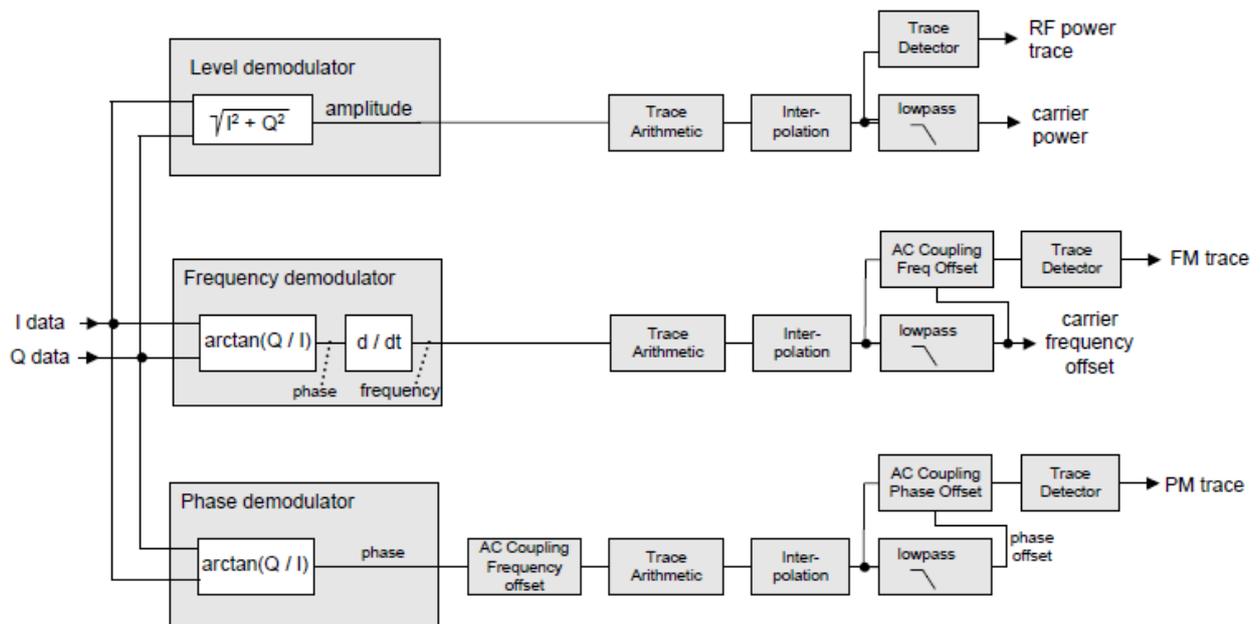


圖 4：解調器的框圖

上面的框圖顯示如何處理保存的測量數據以計算頻率或相位信息。數位 ( I / Q ) 樣本包含有關在記錄的頻譜範圍內發生的所有訊號的信息。這些樣本可用於計算採集時間內的輸入訊號頻率與時間的關係。該

數位解調器的輸出提供有關頻率，相位和幅度與時間的信息。訊號分析儀以測量曲線的格式表示幅度，相位和頻率與時間的關係，並且可以使用所有正常功能，如 MaxHold，MinHold 和 Averaging。

頻率穩定測量通常可以這樣設置，即儀器由觸發訊號啟動，該觸發訊號也啟動 DUT 中的跳頻。

測量數據的記錄直接由觸發事件開始，或者在使用觸發前或觸發後，在觸發事件發生之前或之後的優化的，可定義的時間點開始。因此，該架構的優勢在於窄頻訊號的分析。然而，它不太適合頻率捷變應用或非常大的頻率範圍的測量。

### 3. R&S FSWP 相位雜訊分析儀

現代化的相位雜訊分析儀不僅能夠以卓越的性能測量相位雜訊;它們還提供暫態分析功能，使其能夠測量頻率和相位穩定時間。R & S FSWP 相位雜訊分析儀採用基於數位訊號處理技術的訊號分析儀概念。用於相位雜訊測量的功能單元允許頻率和相位解調，並顯示隨時間的頻率或相位變化。這種新設計的優勢在於 IF 的直接取樣和基頻的數位轉換 ( 數位 I / Q 信號 )。由此獲得的基頻數據允許以最大精度進行測量。解調器的數位實現使調製誤差和漂移可忽略不計。唯一剩下的誤差源是 A / D 轉換器前面的類比訊號路徑的特性。

使用可作為相位雜訊分析儀之硬體一部分的分頻器可將頻率暫態測量增加到更寬的頻寬，從而捕獲高達 8 GHz 寬頻率跳躍的訊號瞬變。此外，R & S FSWP 還提供即時的頻率解調器和觸發電路，以識別定義觸發頻率的轉換，從而開始測量。這對於跳頻或相位穩定時間測量非常有用，因為標記頻率變化的觸發訊號通常無法從待測物上獲得。

#### 3.1 相位雜訊分析儀的架構

信號分析儀的使用允許在寬頻率範圍內進行寬帶測量。與使用信號分析儀或 FM 鑑頻器相比，這是測量頻率和相位穩定的更好方法。高速模擬數字 ( A / D ) 轉換器對輸入信號進行採樣，然後在實時硬件中處理測量數據 ( 採樣 )，以確定輸入信號的頻率和電平變化。A / D 轉換器的帶寬和採樣率決定了可以測量頻率穩定的輸入頻率範圍。

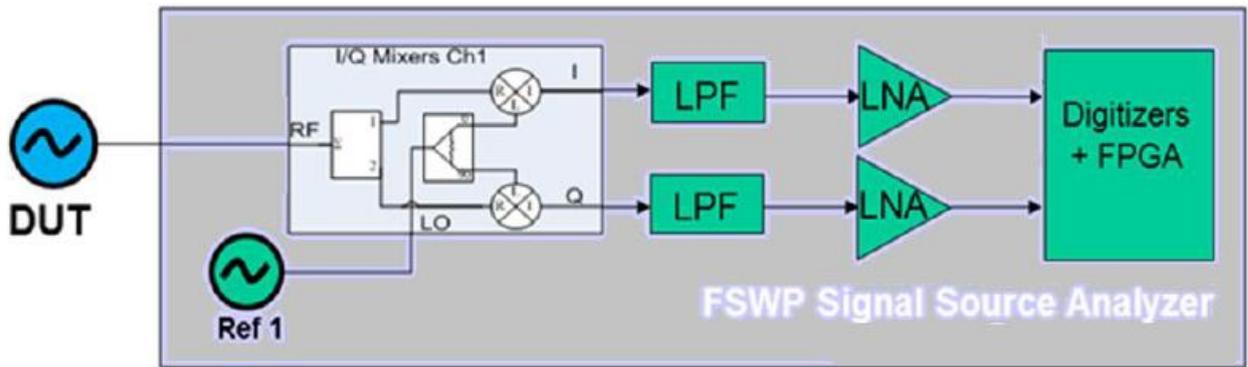


圖 5. 訊號分析儀中 IF 數位化的框圖

R & S FSWP 相位雜訊分析儀採用窄頻暫態模式（展頻設置 < 40 MHz）實現 IF 取樣，如圖 5 所示。類比 I / Q 混頻器使用極低雜訊的內部參考振盪器，並將 RF 輸入訊號轉換為低 IF 頻率。I / Q 混頻器輸出饋入到極低雜訊放大器，然後饋入 100 Ms / s A / D 轉換器（ADC）。然後將 ADC 的輸出饋送到 FPGA，並實時執行數位訊號處理。來自 I 和 Q 數位轉換器的訊號接下來被均衡並饋送到數位式降頻器，該變換器為後續訊號處理提供 I-Q 數據流。數位式降頻器提供精確的 I 和 Q 訊號，這些訊號不會受到常見 I / Q 解調器損傷（如 I / Q 不平衡和正交誤差）的影響。

為了實現數據速率抽取和減少數據量，取樣輸出訊號基於定義的頻寬進行數位濾波，從而降低取樣率。頻寬決定了後續頻率穩定測量的時間分辨率。應避免不必要的過取樣，因為這會顯著增加測量期間的雜訊並增加計算所需的時間。內部或外部觸發訊號可用於控制測量過程，從而最佳地調整任務的可用測量時間。

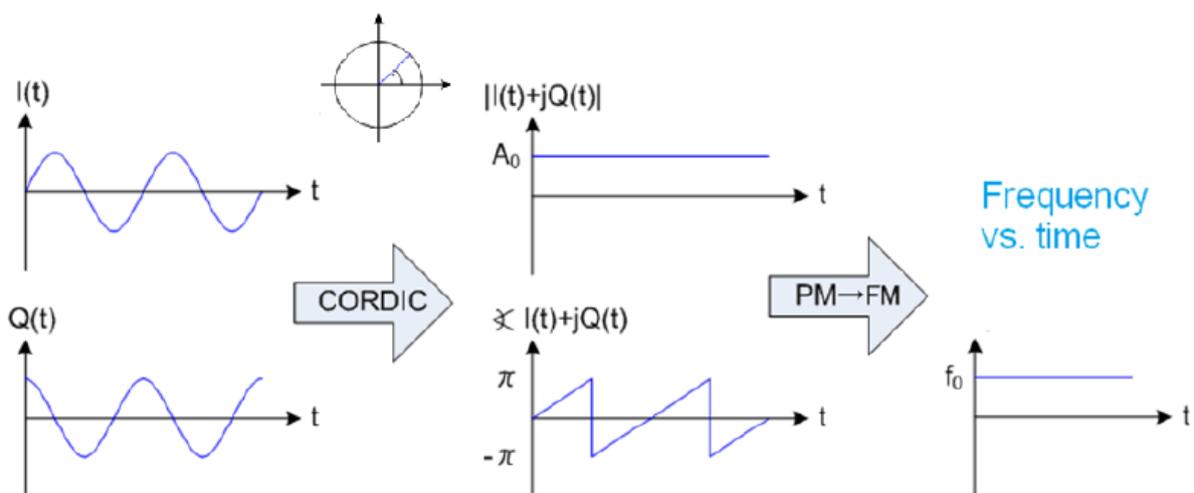


圖 6. 解調器的框圖

上述圖 6 顯示了 I/Q 測量數據的處理，以計算頻率和相位信息。數字 (I/Q) 樣本被轉換成相位和幅度對時間數據，在下一步驟中，頻率訊息從相位數據導出。雖然相位雜訊分析儀通常使用 FFT 將振幅和頻率訊息轉換為相位雜訊和振幅度雜訊的結果，但原始頻率和相位數據與時間的關係可以在暫態模式下以測量曲線的形式用於測量頻率和相位穩定。類比 I/Q 混頻器和 100 Ms/s ADC 將分析儀的頻寬限制在 40 MHz，以滿足奈奎斯特定理。

### 3.1.1 寬頻測量

R & S FSWP 相位雜訊分析儀中的特殊寬頻訊號路徑包括 RF 分頻器。在寬頻暫態模式 (展頻設置 > 40 MHz) 中，第一步將 256 MHz 至 8 GHz 的輸入訊號頻率範圍除以 256，然後對分頻器的輸出信號 (1 MHz 至 31.25 MHz) 進行取樣，轉換為執行窄頻模式下的數位 I/Q 訊號處理。

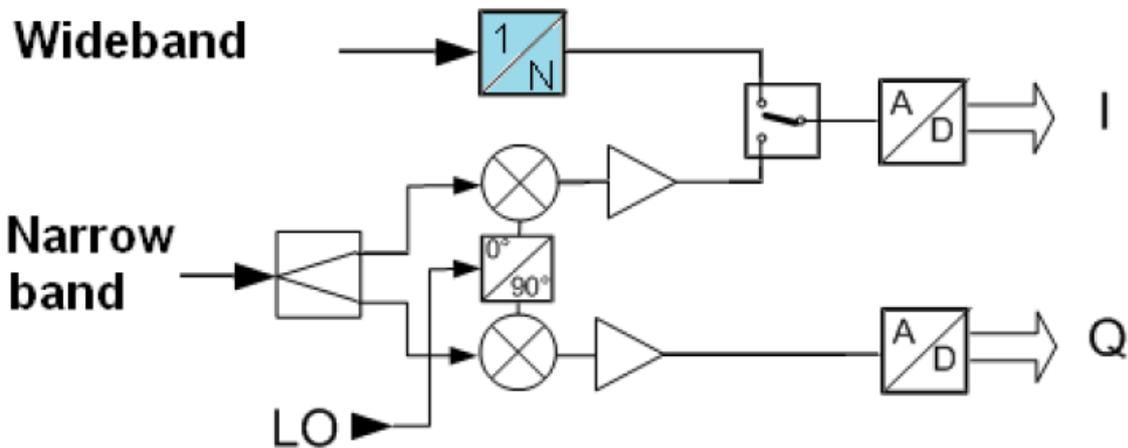


圖 7. R & S FSWP 寬頻模式的框圖

### 3.2 用於建立時間測量的一般測試設置

大多數設計在 PLL 中使用可程式編輯之分頻器來設置頻率。以下模組電路顯示了測量 PLL 控制振盪器頻率穩定的一般測試設置：

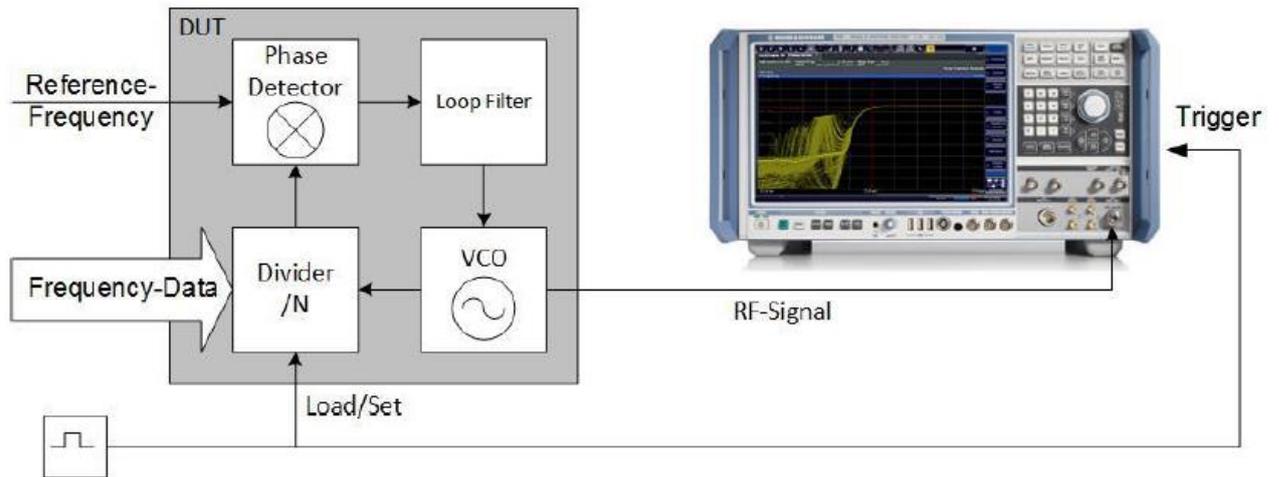


圖 8. 用於測量合成器上的頻率穩定之設置

用於加載分頻器的可程式編碼訊號直接用作分析器的觸發信號。它標誌著跳頻的開始。分析儀開始使用觸發事件記錄測量數據。例如，可以使用預觸發或後觸發來調整記錄的開始，以便也可以在跳躍之前觀察頻率與時間的關係。記錄測量數據後，它用於計算和顯示振幅，頻率或相位與時間的關係。

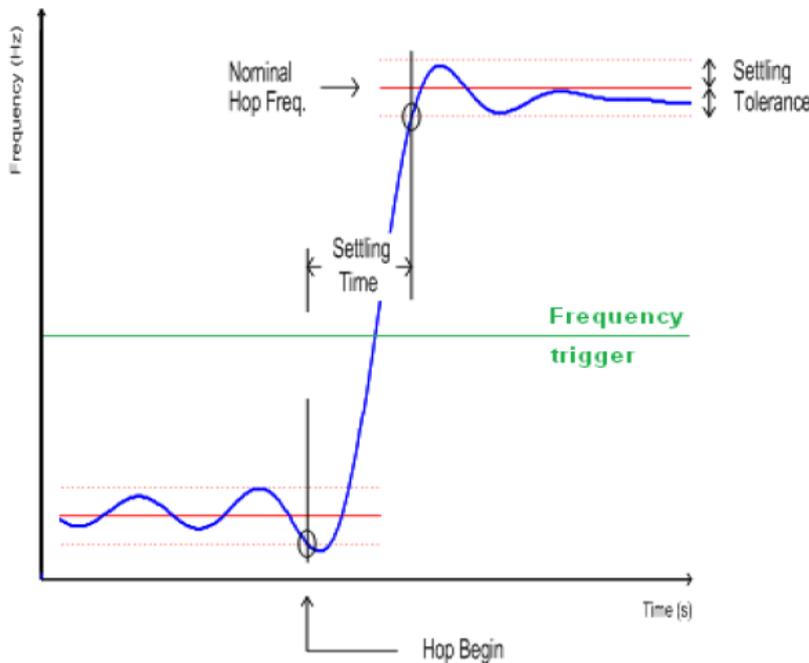


圖 9. 跳頻訊號的頻率觸發和定時測量

對於 R & S FSWP 相位雜訊分析儀，測量也可以由訊號頻率本身觸發。儀器監視頻率解調器的輸出訊號，並包括一個觸發電路，用於識別定義的觸發（頻率）上的轉換，以開始測量。此功能允許待測物內無法被存取之電路內部觸發訊號來進行跳頻時間測量。

4. 實際中的跳頻和穩定時間測量

前面的章節描述了跳頻的基本原理以及對這些訊號的實際測量要求。本節介紹使用 R & S FSWP 相位雜訊分析儀對跳頻訊號進行測量，並顯示 RF 測試場景中的功能。

4.1 觸發寬頻跳頻信號

為了驗證跳頻信號的性能，有必要在感興趣的信號跳上觸發測量儀器。在許多情況下，RF 電路設計不提供被測器件的觸發訊號連接。R & S FSWP 提供了通過定義的觸發位置（觸發頻率）觸發頻率轉換測量的可能性。只要訊號頻率超過此閾值，R & S FSWP 就會觸發並記錄頻率與時間的關係。

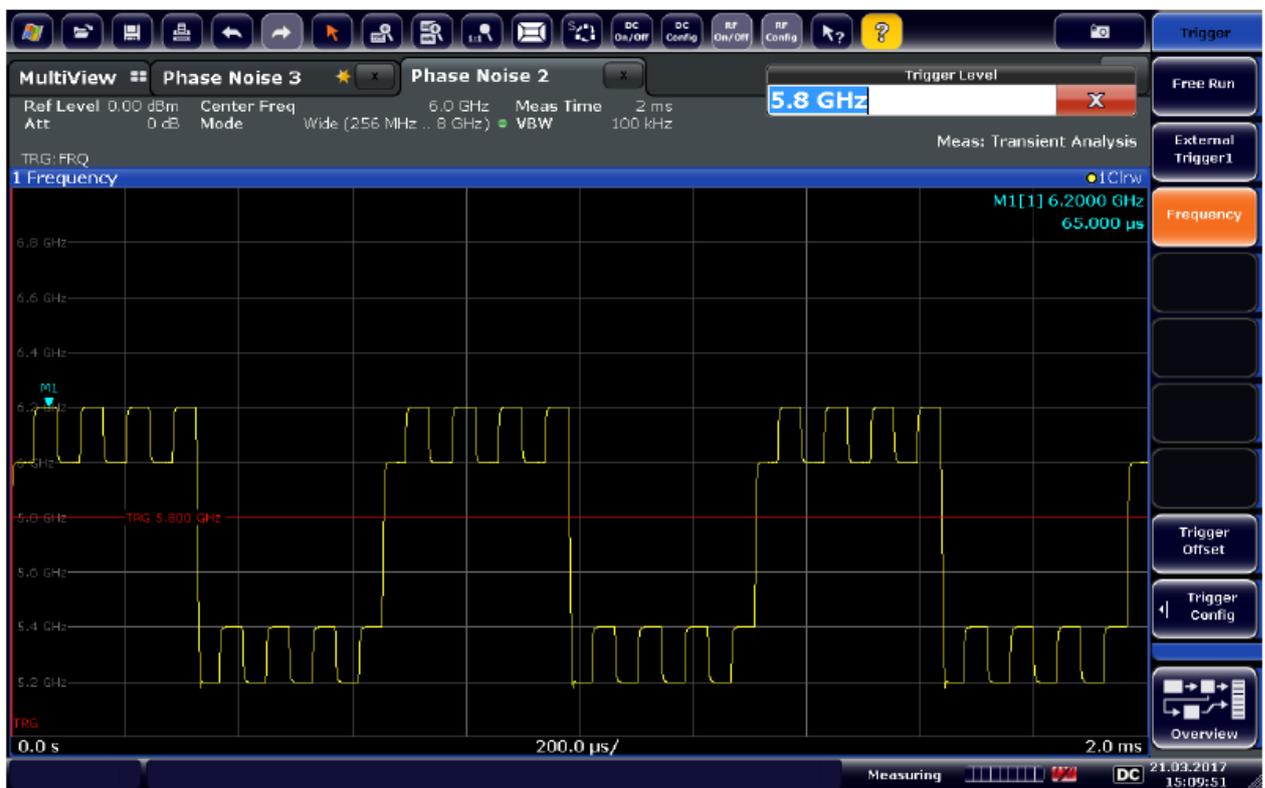


圖 10. 使用 R & S FSWP 相位雜訊分析儀進行頻率觸發

在圖 10 的範例中，振盪器產生具有 200 和 800MHz 跳頻寬度的寬頻跳頻。相位雜訊分析儀設置為寬頻模式（屏幕上具有 2 GHz 展頻），並監控 256 MHz 至 8 GHz 的整個頻率範圍，並在訊號頻率超過設置為 5800 MHz 的觸發準位時來觸發。標記允許在任何時間位置讀取測量值。當然，所有測量值也可通過遠端控制的操作下來獲得。

在圖 11 範例中，在窄頻模式下測量相同的訊號，以獲得關於頻率穩定過程的更詳細的視圖。在這種情況下，頻率觸發設置接近最高頻率 6200 MHz（參考上一次測量中的標記位置）。



圖 11. 具有有效限制驗證的頻率穩定時間測量

該待測物(DUT)的規範定義了最大建立時間為 2 μs。限制線用於觀察這些限制。相位雜訊分析儀自動監測是否符合極限值，並將其輸出為 PASS / FAIL 指示。如前幾節所述，PLL 電路的迴路頻寬是定義建立時間的主要部分之一。為了可視覺化 PLL 迴路頻寬的影響，修改了 DUT 以產生不同的頻率穩定結果。圖 11 上的螢幕截圖之曲線 1 (黃色) 顯示緩慢但平滑的穩定，具有較小的過衝，而曲線 2 (藍色) 使用較高的頻寬，因此穩定得更快。R & S FSWP 可以根據預先定義的限制線檢查測量數據。在圖 11 中，極限驗證表現了振盪器通過了限制線的要求並在大約 2 μs 後達到目標頻率，然後在大約 10 μs 後達到目標頻率。

#### 4.2 頻率和相位穩定時間測量

在前面的範例中，所有測量均使用 R & S FSWP 的頻率觸發功能執行。在這種情況下，DUT 的測量開始會在實際頻率已經變為新值時。在許多情況下，合成器的設計者需要知道頻率穩定命令和 DUT 的實際輸出之間的絕對時間。在這種情況下，分頻器的編程訊號必須直接用作分析儀的觸發信號，因為它標誌著頻率變化的開始。

跳頻 PLL 建立時間的另一個重要參數是 RF 訊號的相位穩定。對於使用相位調製的 RF 通信系統尤其如此，因為相位的建立對調製質量具有直接的影響。

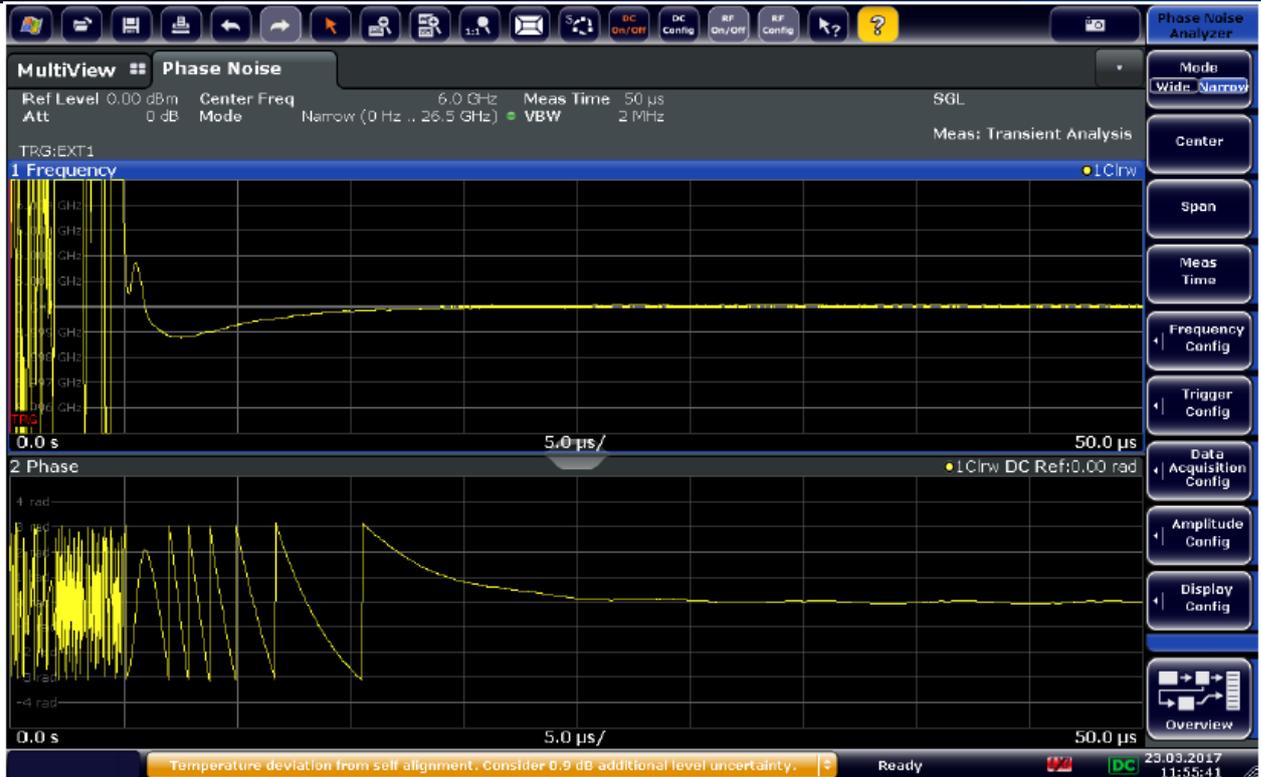


圖 12. 頻率和相位穩定時間並行測量

在圖 12 的螢幕截圖中，DUT 被編程為跳到目標頻率 6000 MHz。相位雜訊分析儀測量上部螢幕中的頻率與時間的關係，而相位與時間的關係則顯示在下部螢幕中。頻率穩定過程似乎幾乎在 10  $\mu$ s 內完成，該階段提供了更詳細的視圖，可以揭示任何其他類型的視圖不可見的行為。只要頻率沒有完全穩定，RF 相位向量就會旋轉，相位與時間的關係將覆蓋 -180 到 +180 度的整個範圍。對於在迴路濾波器中具有大電容器的 PLL 電路而言，這種效應非常典型，需要對振盪器的完全鎖相位置進行充電。

該相位旋轉的影響可能對數據傳輸可以可靠地開始的最早時間點產生影響。在 QPSK 設計中，位元點間隔 90 度，並且容差不超過任何兩個正交點或 45 度之間的距離的一半。重要的是要了解相位漂移的存在，這只能在相位 - 時間分析中看到。

由於相位雜訊分析儀在觸發事件之後的隨機時間點開始捕獲輸入訊號，因此取樣訊號的相位可能隨測量而變化。為了獲得穩定的相位穩定時間測量，需要定義一個時間點，該時間點表示結果中的零相位偏差。在相位穩定測量中，這通常是預期相位穩定完成的時間點。這允許使用顯示的曲線數據上的標記直接測量相對於該點的相位偏差。

#### 4.3 找出建立時間測量中的故障

在前面的範例中，所有測量都在單個跳頻上執行，測量結果集中在頻率或相位穩定階段的最後部分。對於跳頻系統，監視跳頻之間的頻率轉換也很重要。基於 PLL 的合成器的輸出信號可能在不同的跳頻或時間上

顯著不同。因此，監視在一個螢幕中的許多跳頻並且覆蓋頻率穩定的時間相關視圖通常是重要的。R & S FSWP 提供了一種稱為持久性的特殊曲線模式，允許在一個螢幕上覆蓋無限量的測量曲線。在此模式下，實際測量的曲線以深色飽和度寫入，而較舊的曲線以定義的持續時間從螢幕淡出。

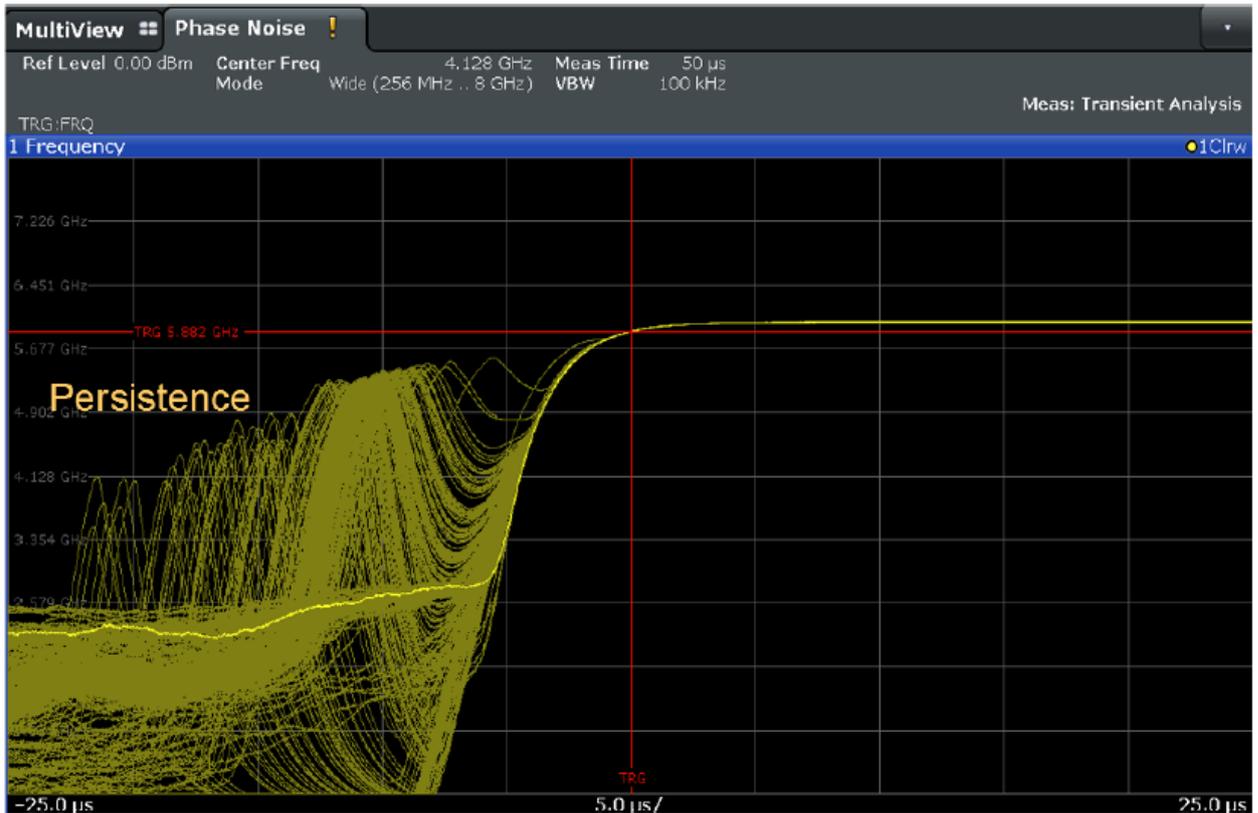


圖 13. 查找頻率穩定時間測量中的故障

圖 13 的螢幕截圖顯示了測量合成器頻率穩定的餘輝曲線的範例。測量觸發即時頻率觸發，以啟動和捕獲頻率的穩定。觸發器使用 25  $\mu$ s 的觸發偏移來監視頻率穩定到最終值之前的時間。

在上面的例子中，我們看到有些事件的頻率在穩定到最終值之前有大量響鈴訊號。在正常曲線模式中，識別這些凸起非常困難，因為一旦在螢幕上看到這樣的結果，用戶將不得不手動停止測量。持久模式會在這些事件淡出之前將這些事件保留在螢幕上一段規定的時間。

持久性視圖非常有助於查找頻率穩定測量的間歇性問題或罕見事件，因為即使後續觸發事件會在正常清除/寫入曲線模式下覆蓋它們，也會使故障可見。

## 5. 結論

一些傳統方法的頻率穩定時間測量非常複雜。例如，如果要將分辨率濾波器用作解調器，則必須對其進行校準。測量範圍非常有限，準確性很難評估。新一代相位雜訊分析儀（如 R & S FSWP）可以更輕鬆地執



行過程的測量，並提供快速結果。除了測量頻率穩定時間外，現代相位雜訊分析儀還記錄了相位穩定時間 - 這是相位調變傳輸方法的一個非常重要的測量方法，也是使用傳統方法難以實現的方法。

由於採用數位架構，因此無需校準；測量立即進行，具有極高的精度和分辨率。FSWP 相位雜訊分析儀可幫助開發人員更快地獲得更多測量數據，從而使他們能夠更快地完成任務。

## 6. 參考文獻

[1] R&S®FSWP Phase Noise Analyzer and VCO Tester – Product Brochure

[2] R&S®FSWP Phase Noise Analyzer – Data Sheet

[3] Application Note 1EF94, Pulsed Phase Noise Measurements