

利用示波器 FFT 和波形數學運算功能讓射頻量測變得簡單

作者：Brad Frieden/ 是德科技

在為數位和射頻設計進行除錯與驗證的過程中，示波器的快速傅立葉轉換(FFT)功能，以及其他各種數學運算功能都是很有價值的工具，可讓設計工程師將其設計由原型階段順利導入生產階段。例如在檢視數位設計時，示波器的 FFT 功能可快速顯示信號的頻率成分(可能對電源產生影響)，同時利用這些資訊進一步查明該雜訊信號的來源。此功能相當重要，因為那樣的信號可能在設計之中的其他區域轉變成雜

訊，並降低信號餘裕度，而且在問題解決之前可能導致設計無法脫離原型階段。在檢視較複雜、頻譜較寬的信號，並驗證是否產生合宜調變時，FFT 頻譜圖也很有幫助。時間 FFT 可進一步評估信號的頻譜成分。數學運算功能(例如頻率趨勢)可以快速驗證脈衝串列的線性調頻等典型調變機制是否運作得宜。本文將介紹好幾個這類的範例，並檢視量測上的實際考量。

利用輸入正弦波作為簡單的 FFT 量測範例

此範例使用一台具有 1 GHz 類比頻寬和高達 5 GSa/s 取樣率的示波器進行量測。這兩項皆為重要規格，會關係到可以進行哪些類型的量測應用。第一個量測範例要研究的是，擷取一個 600 MHz、632 mV (p-p)、0 dBm、1 mW 的正弦波信號，輸入端採用 50 歐姆，其信號(橘色)和 FFT 結果(白色)如圖 1 所示。

圖 1：在時域中以 1 nsec/div 擷取 600 MHz 的正弦波輸入並顯示 FFT 的結果



此 FFT 頻譜量測的一些基本原理

瞭解示波器取樣特性會如何影響此 FFT 的量測品質相當重要。示波器類比頻寬、取樣率、記憶體深度以及相關的時間擷取週期都會對量測結果有深遠的影響。而待測信號的特性，以及該信號特性如何對應到示波器的擷取效能，這些因素會大幅影響此效應。

例如在這個簡單的範例中，我們量測一個單頻的 600 MHz 正弦波信號，同時還要檢視該信號

的基本頻譜特性，此時示波器需有夠高的類比頻寬才能避免衰減到信號振幅。由於此示波器具有最高 1 GHz 的類比頻寬，因此有充足的示波器頻寬可量測 600 MHz 的信號。

為了避免信號在數位轉換的過程中產生混疊(aliasing)，因此根據待測信號中任何可量測到的頻率來看，取樣率最少必須是此頻率的兩倍。在這個最簡單的正弦波範例中，此 600 MHz 正弦波信號需有 1.2 GHz 的取樣率。若示波器以其最高 5 GSa/s 的取樣率進行取樣時，顯然是綽綽有餘。不過後面會提到，示波器在某些 time/div 設定值下，其取樣率(和頻寬)會降低。

那麼在對 600 MHz 正弦波進行的 FFT 量測中，其量測品質如何呢？回顧一下圖 1 中的示波器 FFT 量測，請注意主要的單一頻率尖峰，上面的量測標記顯示大約 600 MHz 的頻率和 0 dBm 的功率。此量測結果符合我們的預期，但以單一頻率的輸入信號來說，此 FFT 響應看起來非常「寬」。

FFT 頻譜線之間的間距，或是頻率「區間」的寬度(信號能量會分攤在此區間上)，就稱為「解析頻寬」。解析頻寬完全取決於擷取資料的時間長度，以及依據選用的 FFT 視窗類型所得到的一個係數。這裏用的是矩形視窗，其係數為 "1"，因此解析頻寬即為記錄時間的倒數。所以在此範例中：

$$\text{ResBW} = 1 / (1\text{nsec/div} \times 10 \text{ div}) = 100 \text{ MHz}$$

因此這個 FFT 量測可以在信號頻譜中辨別接近 100 MHz 差異的頻率成分，但差異小於 100 MHz 的任何頻率成分則會混在一起而無法辨別。這其實真的是相當粗略的量測。

螢幕上的時間拉長如何提昇 FFT 的響應

為了突顯記錄時間對 FFT 結果的重大影響，如果將 time/div 放大到 200 nsec/div，螢幕上變成 2 usec 的記錄時間，解析頻寬會大幅提升到：

$$\text{ResBW} = 1 / (200 \text{ nsec/div} \times 10 \text{ div}) = 500 \text{ kHz}$$

在圖 2 中可以看到 FFT 結果有明顯的變化，600 MHz 的頻域尖峰會有精細很多的顯示結果。不過這裏作了一些取捨與妥協。現在示波器需要處理更多時間取樣，計算出來的 FFT 有更多的頻譜線，同時產生更好的解析頻寬。但因為需要處理更多資料，所以量測的執行速度

會比之前慢。

運用起始頻率、終止頻率、中心頻率和頻距控制

在 FFT 計算和結果顯示中有一種重要功能，就是能放大感興趣的區域進行分析。這裏的第一個範例具有 0 Hz 到 2.5 GHz 的寬頻距，因此難以看到 600 MHz 載波附近的任何細節。假設在 600 MHz 載波頻率附近有可疑的雜訊，而您想要仔細查看，FFT 控制功能可以將中心頻率設定為 600 MHz，也可以設定您想要的頻距，例如在 600 MHz 載波附近的 100 MHz 頻距。您也可以選擇 550 MHz 的起始頻率和 650 MHz 的終止頻率，會有相同的結果。選擇這些參數所進行的 FFT 量測，如圖 3 所示。

寬頻 FFT 分析

現今有越來越多的信號都使

圖 2：以 200nsec/div 對 600 MHz 正弦波輸入信號進行時域擷取其 FFT 計算結果

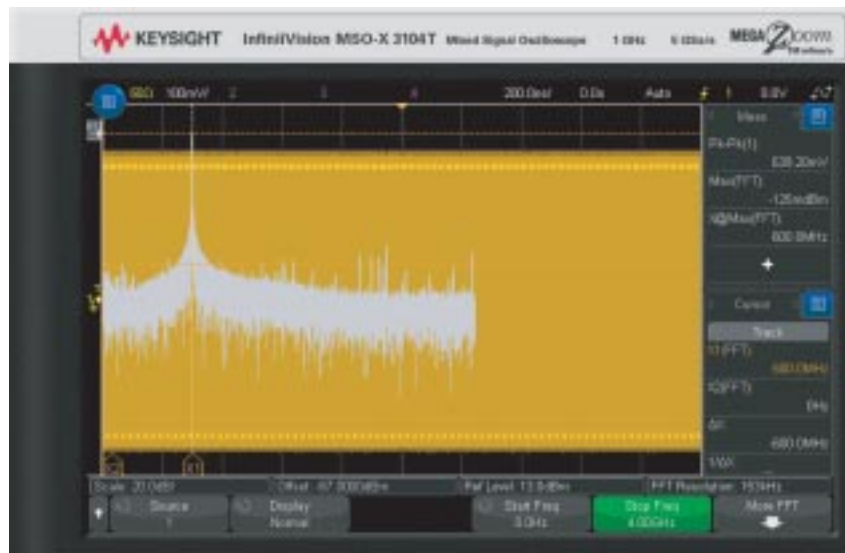


圖 3：FFT 控制功能設為 600 MHz 的中心頻率和 100 MHz 的頻距時，600 MHz 正弦波輸入信號的 FFT 結果



用了調變的方式，如此會將頻譜寬度提升到幾百個 MHz 甚至是好幾個 GHz。假如信號的頻譜寬度超出 500 MHz 左右的話，那麼目前市面上可用的頻譜分析儀或向量信號分析儀都不具有足夠的分析頻寬可以執行有效的量測。在這樣的情況下要進行相關的應用時，就需要使用具有足夠分析頻寬的示波器或數位轉換器。待測信號的載波頻率也很重要。待測信號的載波頻率加上該信號頻譜寬度的一半必須低於或等於示波器頻寬，才能使用示波器本身的功能進行量測。現在我們考慮使用寬頻信號頻域量測。

待測信號是一個 600 MHz 射頻脈衝串列，具有 4 usec 寬的射頻脈衝，脈衝每 20 usec 會重複出現。此信號會進行線性調頻，載波頻率會由射頻脈衝波封前端的 300 MHz 線性調頻(chirp)至脈衝波封尾端的 900 MHz。

為了要對射頻脈衝進行基本 FFT 量測，第一步就是要在時域中清楚擷取螢幕上的脈衝信號。先按下 "Default Setup" 將示波器重置到一個已知狀態。接著按下 "Auto Scale"，並調整 time/div 設定讓螢幕顯示一個主要的射頻脈衝。將基本預設(上升信號緣觸發)進一步限定為觸發遲滯(holdoff)。如此可確保觸發不會出現在脈衝中間，避免讓擷取到的軌跡產生不穩定。將觸發遲滯設定為比射頻脈衝寬度略長一點。射頻脈衝寬度

為 4 usec，因此 5 usec 的觸發遲滯就可以妥善運作。

接著按下 "FFT" 按鈕，以便由螢幕上的時域數位轉換信號計算射頻脈衝串列的頻譜圖。FFT 控制功能包括起始與終止頻率、中心頻率和頻距。寬頻距是首選，搭配 0 Hz 的起始頻率和 2.5 GHz 的終止頻率。由於這是一個脈衝信號，而整個脈衝可以放置在螢幕中，示波器螢幕的左邊和右邊只有一些雜訊，因此選擇矩形視窗來進行 FFT 計算。FFT 平均功能(取 8 次)也有助於將量測結果最佳化。FFT 響應結果如圖 4 所示。

FFT 響應上放置了一些標記，可以看到此射頻脈衝確實具有寬廣的頻譜寬度，從 300 MHz 一直到 900 MHz，也就是 600 MHz 寬。尚未證實的地方，就是從脈衝的左邊跨到脈衝的右邊時，載波頻率會從 300 MHz 線性轉移到 900 MHz。

開控式 FFT 數學運算功能

若要在橫跨整個脈衝串列上

圖 4：寬 4usec、週期 20 usec 之 FM 線性調頻脈衝的 FFT 量測結果



迅速看到一些載波頻率值，有一種方法就是使用閘控式 FFT 功能。我們可以啟用正常時域軌跡時間閘功能來達到目的。示波器上面有一個帶有放大鏡的按鈕，按下此按鈕即可開啟此模式。按下之後，在螢幕的上半部會有一個正常軌跡圖，螢幕的下半部則會有一個放大圖。time/div 控制旋鈕可以放大縮小上面正常軌跡的「時間」視窗，而時間延遲控制旋

鈕可讓視窗沿著軌跡移動。出現在此視窗中的局部波形會顯示在下方的軌跡，而且經過放大。

藉由建立一小段時間的視窗功能然後移到脈衝一開始的地方，可取得想要的量測。示波器會從閘控時間視窗內所涵蓋的資料計算 FFT，如圖 5 所示。

對尖峰的振幅和頻率峰值進行 FFT 量測後，結果顯示射頻脈衝一開始的載波頻率約在 300

MHz 左右。假如時間視窗移到射頻脈衝的中間時，看到的頻率約在 600 MHz。到了射頻脈衝的尾端則是 900 MHz。顯然這是一個線性調頻脈衝，如同我們所預期的一樣。

頻率量測和「量測趨勢」數學運算功能

在某些情況下，「量測趨勢」數學運算功能對於檢視線性調頻信號很有幫助。示波器可透過「趨勢」的形式顯示高達 1000 個量測結果。在類似的一個信號範例中，我們需要驗證一個寬 600 nsec、週期為 20 usec 的脈衝串列。現在我們關閉了 FFT 功能，然後純粹進行時域量測。

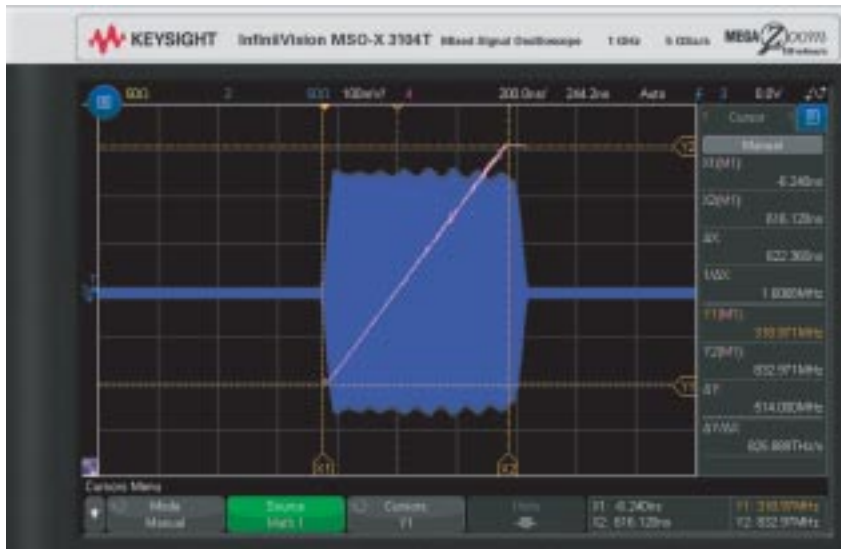
首先，示波器的擷取模式從「正常」改為「高解析度」擷取模式。接著按下 "Measure" 按鈕，並從可選用的量測清單中選擇頻率量測。載波零點交越檢測的中間臨界值設為 30 mV，讓載波信號的擺動大約從 -316 mV 至 +316 mV (1 mW 信號、0 dBm 輸入 50 歐姆)。然後按下 "Math" 鍵，並選擇一個叫做 "Measurement Trend" 的數學運算功能。選用標記，將信號來源設為數學運算功能的結果。涵蓋全部射頻脈衝的頻率量測結果，如圖 6 所示。

顯然整個脈衝載波頻率是以線性方式變動，由左到右逐漸升高，這完全符合原本的設計。請注意線性斜波並沒有涵蓋到整個射頻脈衝的寬度，這是因為趨勢計算功

圖 5：利用時間 FFT 功能觀察在射頻脈衝前端的載波



圖 6：對所有脈衝進行「頻率」量測，以及其中的量測趨勢數學運算功能



能已經達到 1000 個量測的限制。重點在於您可以看到脈衝 FM 功能的局部區域，並且證實調頻為線性的。若要讓涵蓋所有脈衝的頻率量測有夠高的精確度，就必須選擇「高解析度」擷取模式。

結語

示波器的 FFT 功能是一種很有價值的工具，可讓您檢視信號的頻域特性。使用較窄頻的向量信號分析儀所無法進行的量測，

示波器最終可以透過非常寬廣的頻寬加以實現。本文中的 FFT 量測範例可以驗證一個 FM 線性調頻信號確實讓載波頻率以線性方式變動。其中還有一些其他的數學運算功能，也就是量測趨勢功能。在此範例中，這樣的計算功能可讓您用非常簡單的方式驗證一個 FM 線性調頻信號。

作者簡介

Brad Frieden 為是德科技示波

器與協定事業部的一位產品規劃師與產品行銷工程師，負責通用型邏輯分析儀和相關應用，以及利用高頻寬與深度記憶體示波器進行航太與國防相關射頻量測。在任職於 HP/Agilent 的 30 年間，Brad 曾負責光纖測試、脈衝產生器、示波器和邏輯分析儀等各式儀器的行銷工作。他於 1981 年取得德州理工學院電機工程學士學位，並於 1991 年取得德州大學奧斯汀分校的電機工程碩士學位。

CTA

是德科技與龍華科技大學共同成立「微波通訊量測實驗室」



台灣是德科技與龍華科技大學於 2015 年 10 月 27 日簽署合作備忘錄，「微波通訊量測實驗室」正式啟用，由台灣是德科技董事長暨總經理張志銘以及龍華科技大學校長葛自祥共同主持。

台灣是德科技董事長暨總經理張志銘強調：「我們會不定

期為龍華科技大學舉辦不同主題與實驗室內相關之專題討論會，並也特別免費開放微波通訊量測技術線上資料庫使用權，讓學生們擁有更好的學習資源。」

龍華大學校長葛自祥表示：「感謝台灣是德科技獨具慧眼，選擇與本校共同合作，提供這麼好的機會讓學生有機會發揮專長與

創意，創造更多、更好的產品。同時也培養了同學們的創造力與自信，大幅提昇未來就業競爭力。」

「微波通訊量測實驗室」成立的主要目標，係強化雙方產學合作機制，雙方將定期協商研究方向，訂定產學合作計畫及相關事宜。更藉此平台培育更多的微波通訊量測科技人才和致力於微波通訊量測技術發展。龍華科技大學提供實驗室場地，是德科技則捐贈 85052D/26.5GHz 網路分析儀校正器、85056D/50GHz 網路分析儀校正器、N4419AK20/3.5mm 高頻纜線和 85133C/2.4mm 高頻纜線等相關設備。