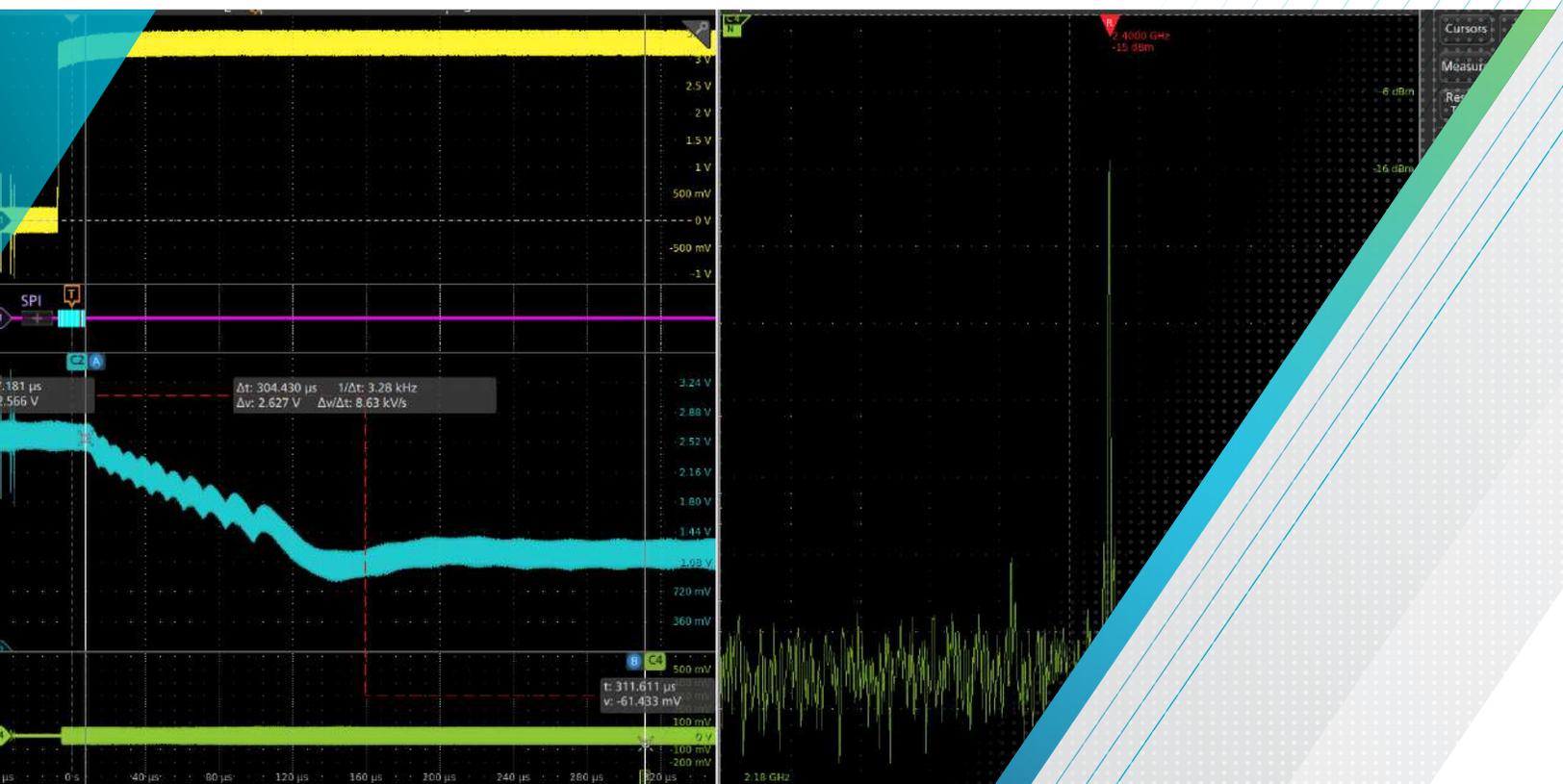


# Spectrum View：在示波器上執行頻域分析的新方法

## 應用摘要



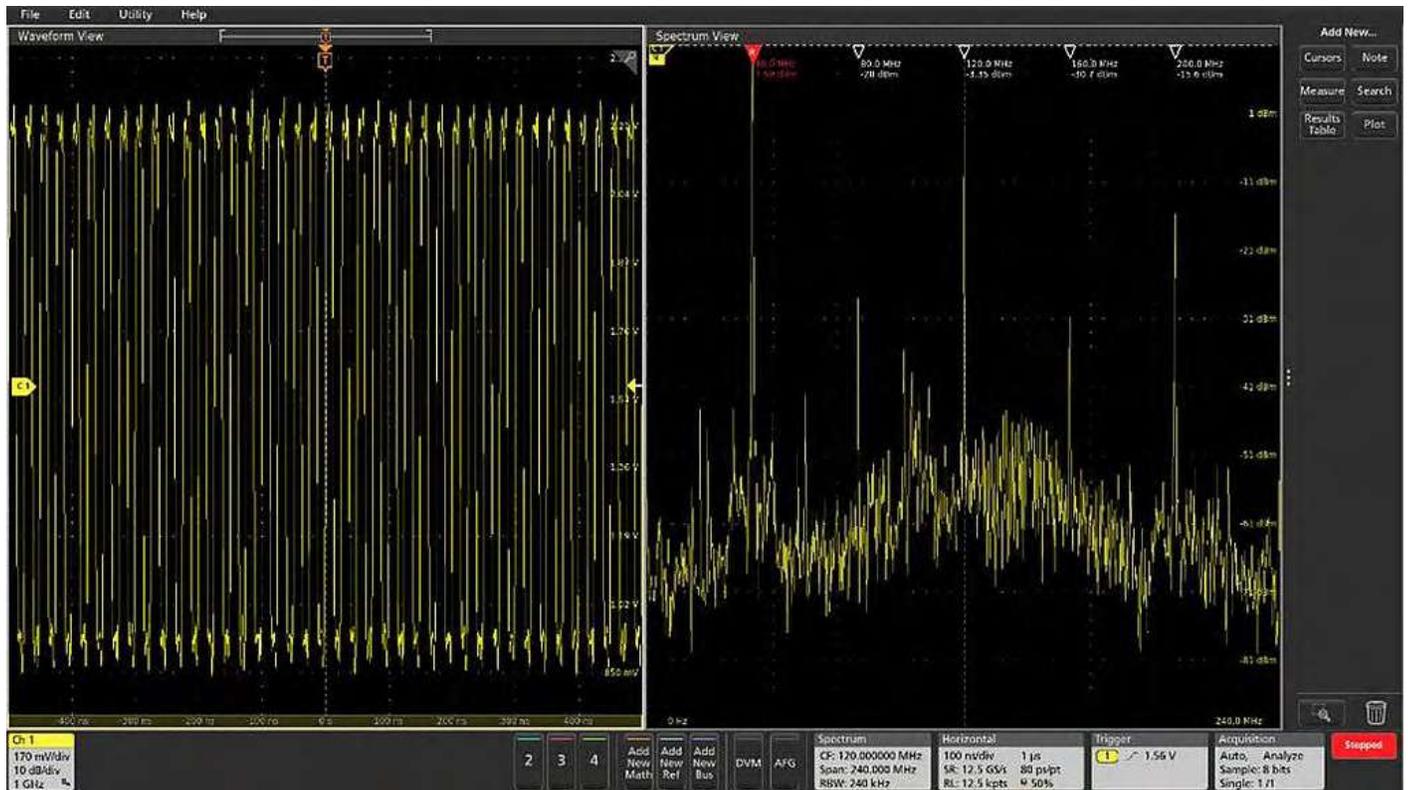


圖 1. Spectrum View 支援在每個域中同時具有獨立控制的類比和頻譜視圖。

針對嵌入式系統進行除錯通常需要尋找一些線索，而這些線索很難透過一次只查看一個域來發現。有時需要同時觀察時域和頻域的訊號可以提供重要的深入見解。混合域分析對於回答以下問題尤其有用：

- 當我傳輸無線資料時，我的電源軌電壓發生了什麼變化？
- 每次存取記憶體時，發射都來自哪裡？
- 開機後，我的 PLL 需要多長時間才能穩定？

透過在同步視圖中提供時域波形和頻域頻譜的視圖，混合域分析將有助使用者解決此類問題。直到最近為止，Tektronix MDO4000C 混合域示波器是唯一能夠提供同步時域和頻域分析，並獨立控制波形和頻譜視圖的示波器。

為了滿足這一需求，4、5 和 6 系列 MSO 混合訊號示波器提供了一個強大的分析工具：Spectrum View。這是 4 系列 MSO 的選配功能，但為 5 系列和 6 系列 MSO 的標配功能。Spectrum View 具備了幾個關鍵功能：

- 支援使用熟悉的頻譜分析控制功能 (中心頻率、跨距和 RBW)
- 允許分別最佳化時域和頻域顯示
- 可在波形視圖和頻譜視圖中查看訊號，而無需將訊號拆分為不同的輸入
- 實現時域事件和頻域量測的精確關聯 (反之亦然)
- 顯著提高頻域中可達到的頻率解析度
- 提高頻譜顯示的更新率

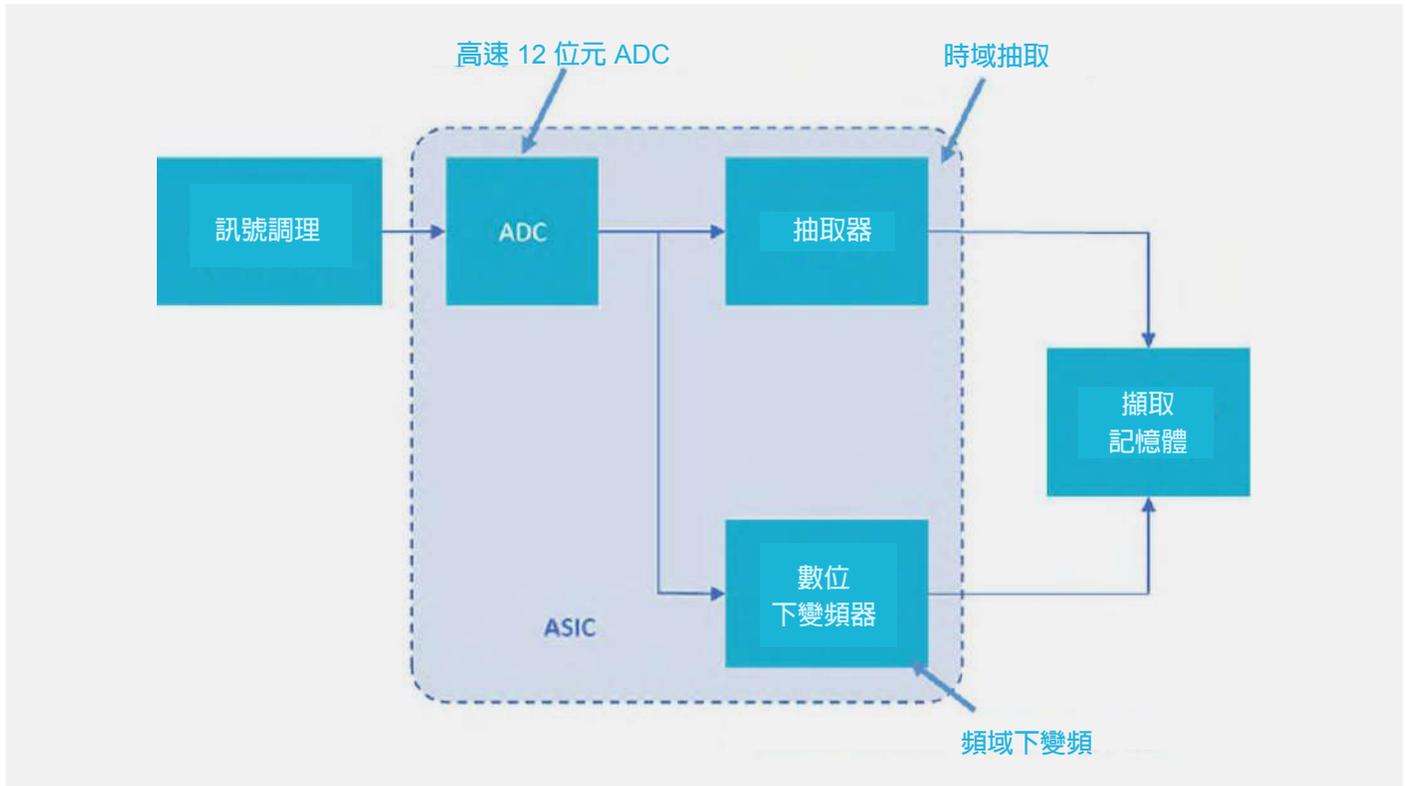


圖 2. 在自訂 ASIC 上實作的數位下變頻器可透過 Tektronix 4、5 和 6 系列 MSO 的獨立控制功能提供同時的波形和頻譜視圖。

## 全新架構

Spectrum View 使用儀器內建的專利硬體。若要瞭解其運作原理，請務必注意，數位示波器通常是以最大取樣率來執行其類比數位轉換器 (ADC)。然後將 ADC 取樣串流傳送至抽取器，抽取器將會保留每輪的第 N 個取樣。以最快的掃描速度保留所有取樣。在較低的掃描速度下，假設使用者正在查看較慢的訊號，並且保留了一部分 ADC 取樣。簡而言之，抽取器的目的是使記錄長度盡可能小，同時仍提供足夠的取樣率以查看時域中感興趣的訊號。

在 4、5 和 6 系列 MSO 中，每個 FlexChannel 輸入的後面是一個自訂 ASIC 中的 12 位元 ADC。如圖 2 所示，每個 ADC 透過兩條路徑傳送高速數位化資料。一條路徑通向硬體抽取器，硬體抽取器會決定時域取樣的儲存速率。第二種路徑通向也在硬體上實作的數位下變頻器。這種方法能夠獨立控制時域和頻域的擷取，允許最佳化給定訊號的波形和 Spectrum View。同時還可以更有效地利用這些儀器中可用的長卻有限的記錄長度。

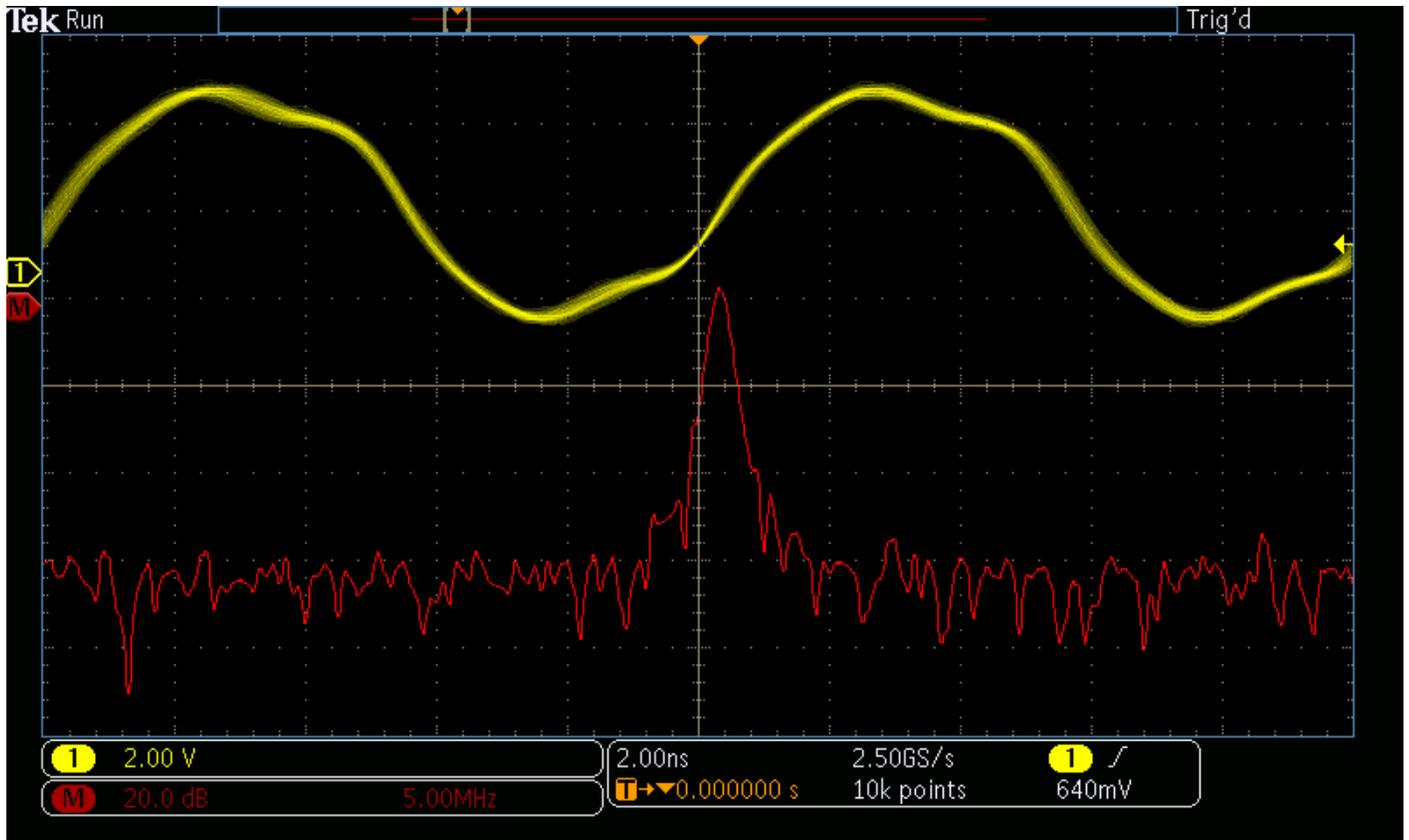


圖 3. 在使用傳統 FFT 最佳化時域的情況下，此展頻式時脈訊號上缺少頻域細節。

## 具有獨立控制功能的 Spectrum View 與傳統 FFT

儘管頻譜分析儀是專為查看頻域中的訊號而設計，但並非是隨手可及的儀器。另一方面，實驗室內幾乎均備有示波器，因此工程師傾向於盡可能地使用示波器。因此，示波器數十年來一直採用以數學運算為基礎的 FFT (快速傅立葉變換)。然而，眾所周知，FFT 由於兩個原因而導致難以使用。

首先，在進行頻域分析時，頻譜分析儀控制功能 (例如中心頻率、跨距和解析度頻寬 (RBW)) 可輕鬆定義感興趣的頻譜。但是，在大多數情況下，示波器 FFT 僅支援傳統控制功能，例如取樣率、記錄長度和時間/格，因此很難獲得所需的視圖。

其次，即使示波器提供了頻譜分析儀風格的控制功能，FFT 仍是由與用於類比時域視圖的擷取系統相同的擷取系統驅動。若變更中心頻率、跨距或解析度頻寬，將以意外和無法預料的方式變更示波器的水平刻度、取樣率和記錄長度。一旦獲得了所需的頻域視圖，其他訊號的時域視圖將無法再使用。當對水平刻度、取樣率或記錄長度進行調整以再次獲得所需的時域視圖時，FFT 視圖將無法再使用。例如，從 MDO3000 擷取的兩個螢幕擷取畫面說明了從 97 MHz 移到 100 MHz 的展頻式時脈的時域和 FFT 視圖。在圖 3 中，時域視圖可清楚顯示時脈，但是 FFT 沒有足夠的解析度可用。在圖 4 中，FFT 顯示了時脈的展頻特性，但是時域視圖已不再有用。

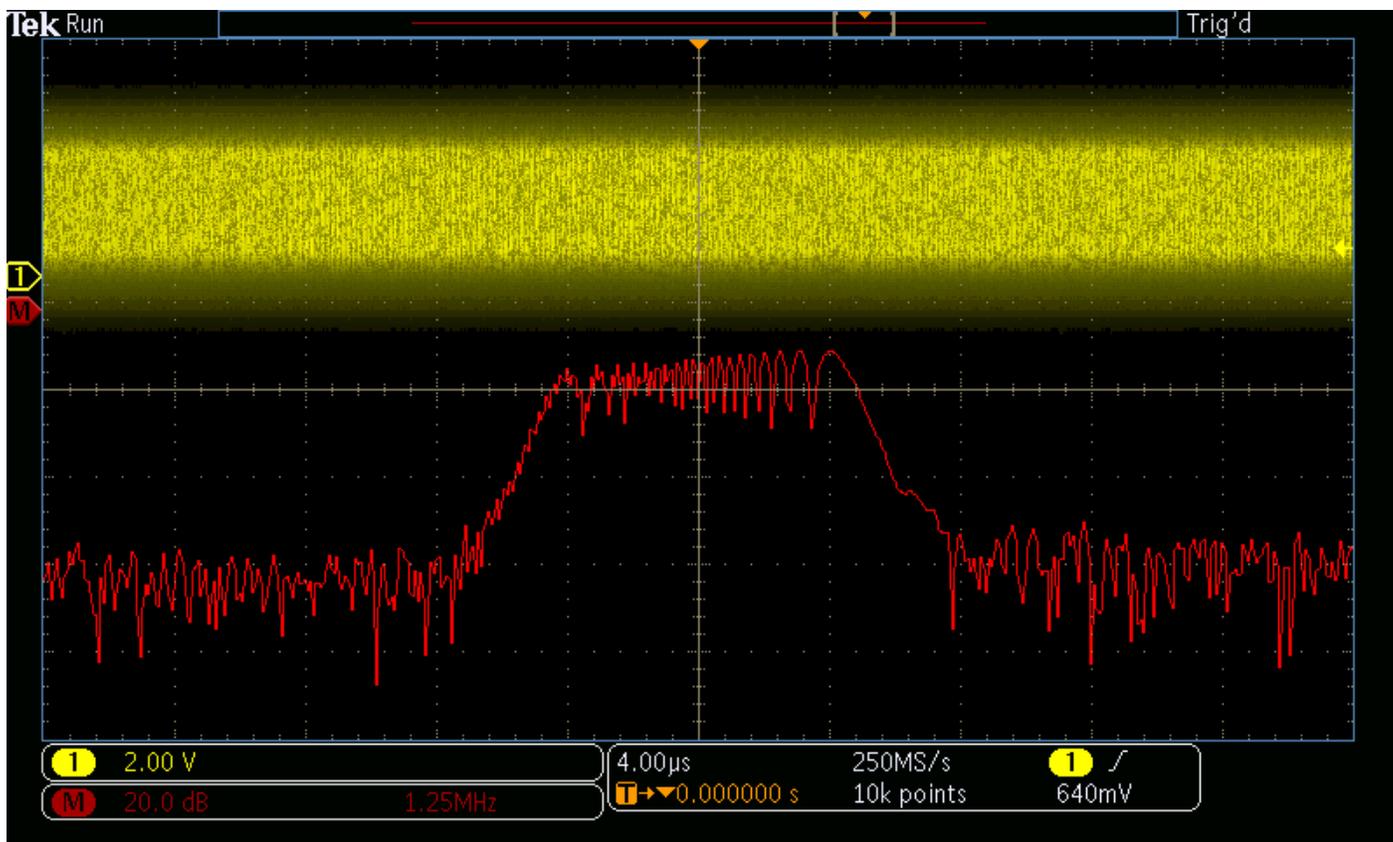
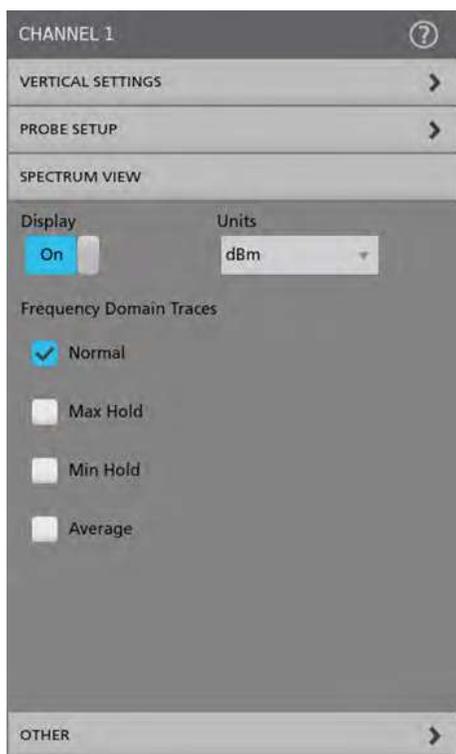
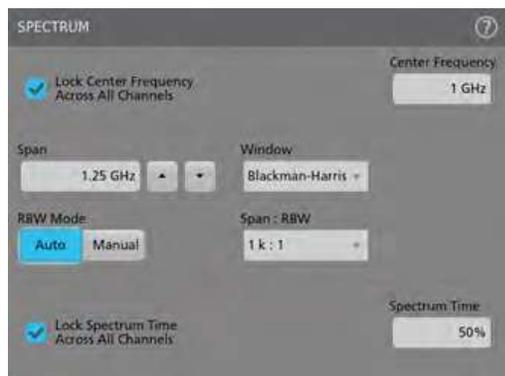


圖 4. 最佳化 FFT 視圖後，時脈訊號的時域視圖現在已不再有用。



Spectrum View 提供了使用熟悉的中心頻率、跨距和 RBW 控制來調整頻域的功能。

同時，由於這些控制功能不會隨時域縮放，因此可以獨立地最佳化兩個視圖，如圖 5 所示。



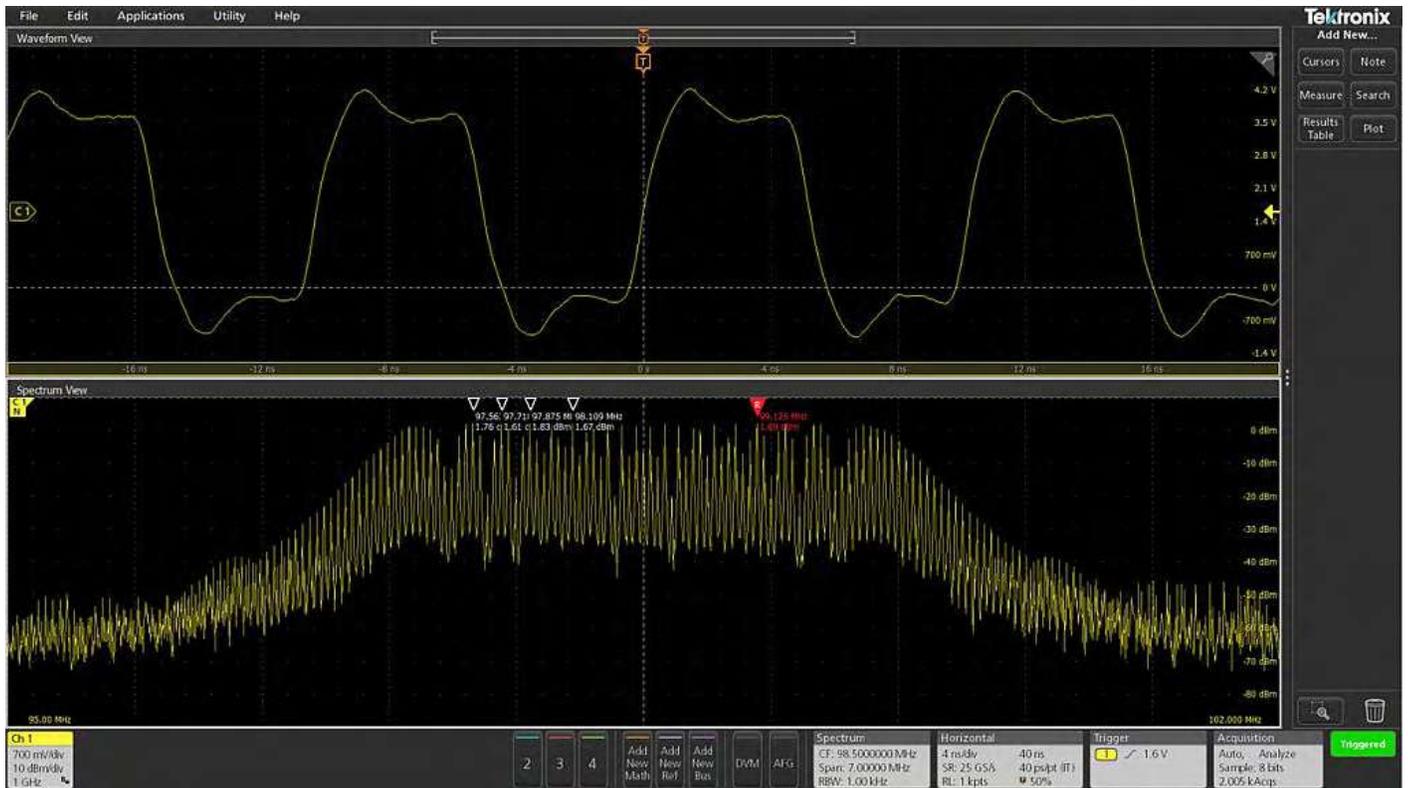


圖 5. 查看與圖 3 和圖 4 相同的擴頻時脈訊號，Spectrum View 可同時提供時域和頻域的最佳化視圖。

## 頻譜時間

螢幕上的一個稱為「頻譜時間」(Spectrum Time) 的指標用來指示 Spectrum View 視窗中顯示的頻譜來自何時何地。頻譜時間指標的寬度就是視窗因數除以解析度頻寬 (如需更多有關視窗因數的資訊，請參見附錄)。您可以在整個擷取範圍內移動頻譜時間，查看頻域視圖如何隨時間變化。您甚至可以在停止擷取的情況下執行。

在圖 6 至 9 中，我們擷取了前述展頻式時脈的啟動序列。在螢幕擷取畫面中「頻譜時間」指標顯得非常窄小，圖中將以紅色方框強調顯示以利識別。在本例中，頻譜時間為

$$1.9 \text{ (視窗因數)} / 10,000 \text{ (RBW)} = 190\mu\text{s 寬。}$$



圖 6. 頻譜時間 (以紅色方框強調顯示) 放置在擷取內容的前段，即觸發事件之前。一如預期，由於時脈尚未開啓，因此頻域中沒有任何強訊號。

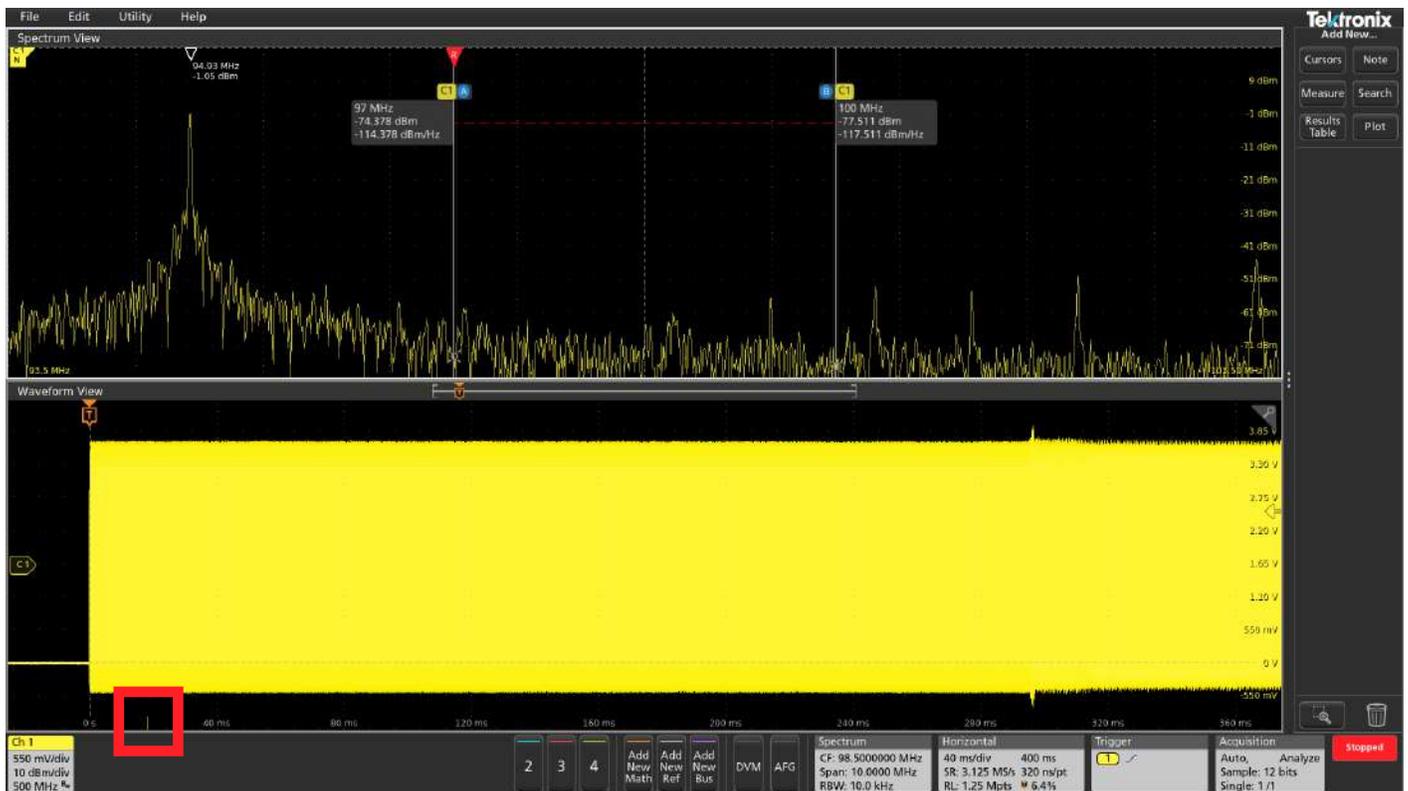


圖 7. 頻譜時間放置在時脈開啓後約 20 ms 的位置。請注意，時脈尚未擴展頻譜，僅位於 94 MHz。

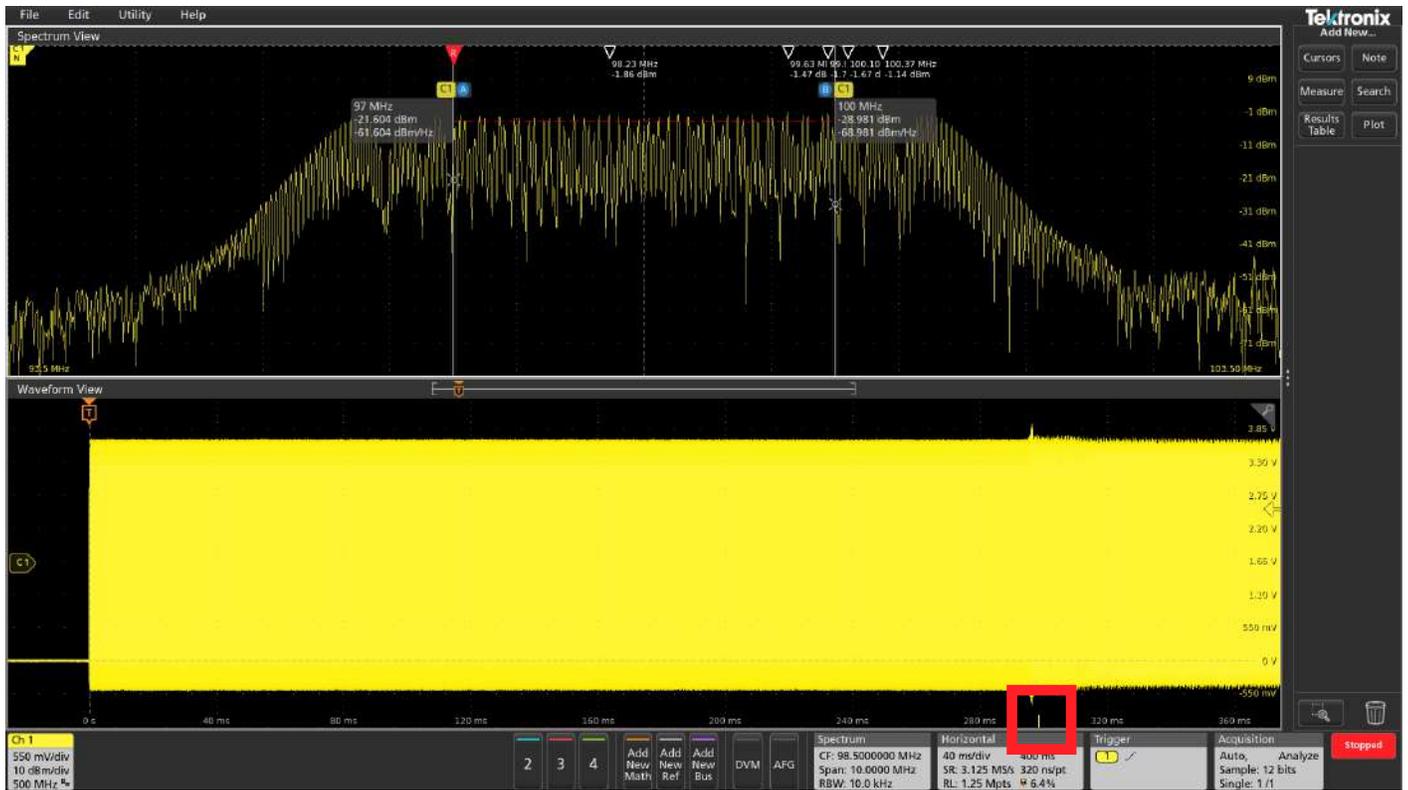


圖 8. 頻譜時間放置在時脈開啓後約 300 ms 的位置。請注意，時脈現在出現擴展頻譜行為，但使用的頻譜超出了預期。游標顯示預期的擴展頻譜寬度。

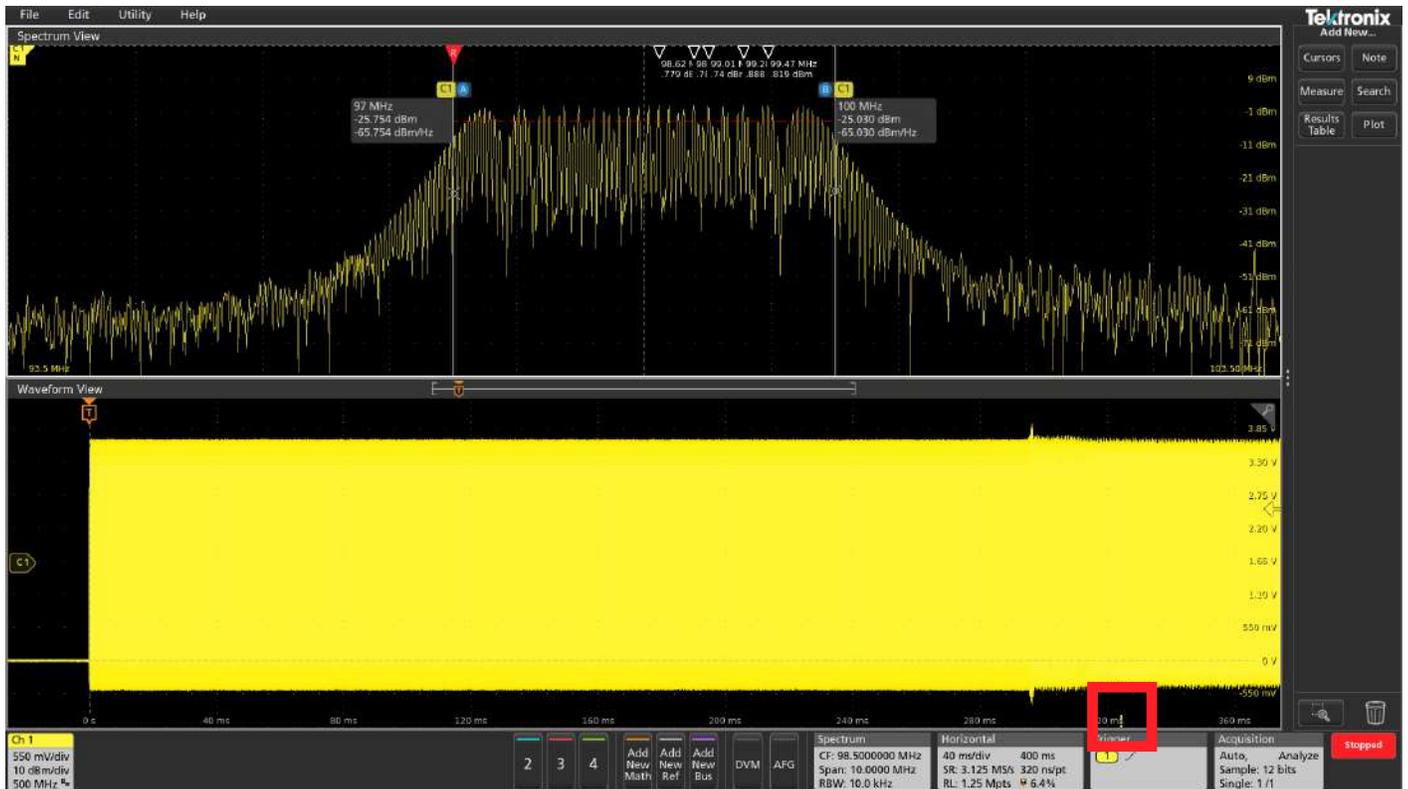


圖 9. 頻譜時間放置在時脈開啓後約 324 ms 的位置。請注意，時脈現在出現擴頻行為，並在預期的頻譜操作範圍內。

## 「射頻與時間」波形

用於建立 Spectrum View 顯示的頻譜的基礎 I&Q 資料亦可用於計算「射頻與時間」波形，這些波形會顯示射頻波形的各種特性在整個擷取過程中如何變化，而不僅僅是頻譜時間的位置。提供三種類型的波形：

- 振幅 – 頻譜的瞬時振幅與時間的關係
- 頻率 – 頻譜的瞬時的瞬時頻率相對於中心頻率與時間的關係
- 相位 – 頻譜的瞬時相位相對於中心頻率與時間的關係

每一條軌跡均可獨立開啟和關閉，且這三條軌跡可以同時顯示。您還可以使用射頻與時間觸發 (RF vs Time Trigger) 功能觸發這些波形。

這些波形顯示在下面的圖 10-13 中，其中顯示了有關所關注的訊號的其他資訊。每個圖像的「波形視圖」中均顯示了四個時域波形。最上面的是訊號的類比視圖。接下來是「射頻振幅與時間」波形，然後是「射頻頻率與時間」波形、「射頻相位與時間」波形。最後，另一個「射頻振幅與時間」波形在「射頻與時間」波形上的位準觸發了擷取。



圖 10. 透過查看「振幅與時間」和「頻率與時間」波形，即可明顯看出展頻式時脈的情況。「振幅與時間」軌跡顯示訊號在位準極低的觸發點開啓，而「頻率與時間」軌跡顯示訊號在前 300ms 內停留在單一頻率上。此時，我們看到訊號的振幅顯著增加，且頻率開始變化。



圖 11. 我們現在放大所關注的時間段 (觸發事件後大約 300-320 ms)。請注意，我們可以清楚地看到振幅波動和頻率變化超出了應有的範圍。

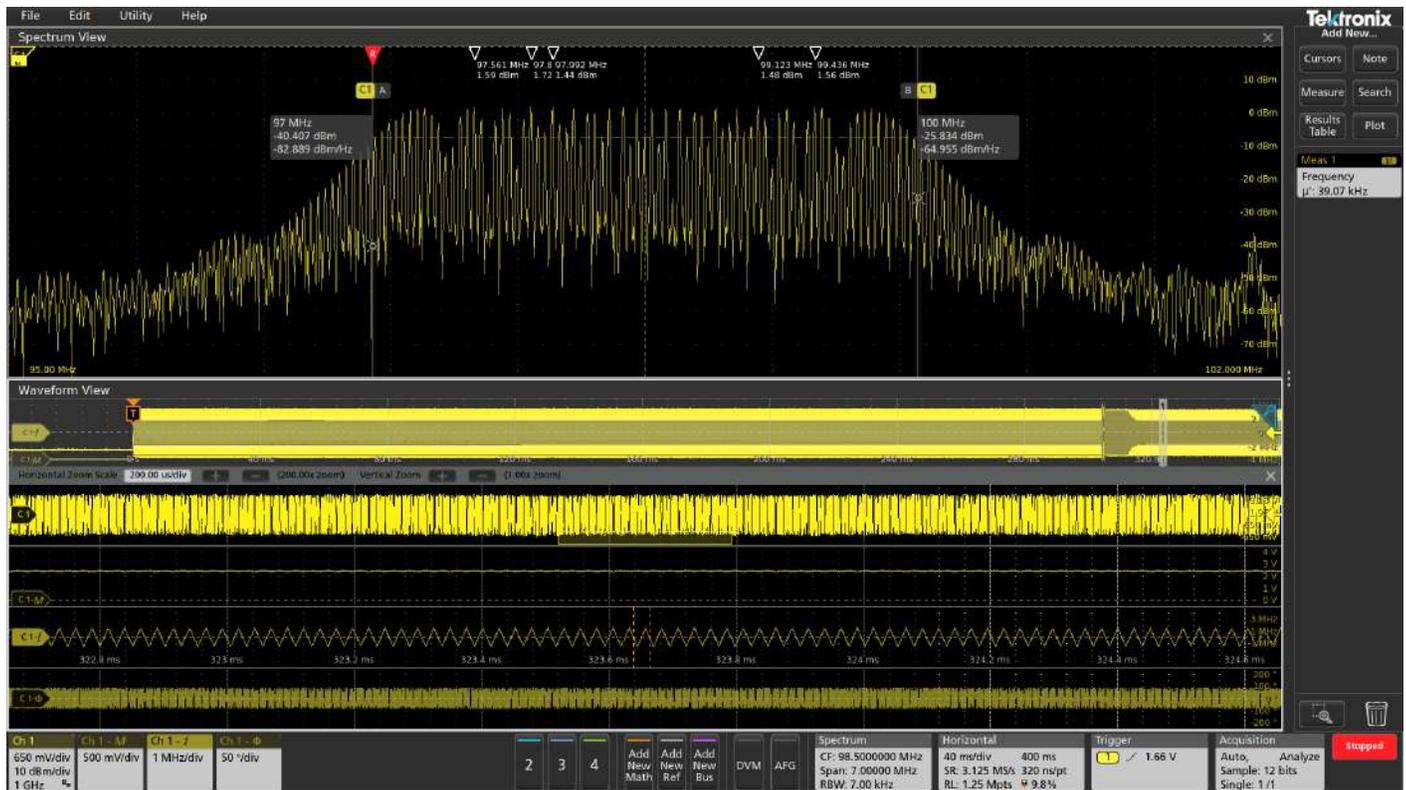


圖 12. 我們現在進一步放大，可以輕鬆查看正在使用的三角頻率調變，並可透過結果欄中的自動量測結果來確認我們獲得了 39.07 kHz 的正確調變率。



圖 13. 為了聚焦於時脈開啓，我們可使用「射頻與時間觸發」設定來指定閾值和邊緣來觸發射頻振幅波形（註：此量測是使用比圖 10-12 更新的韌體進行）。

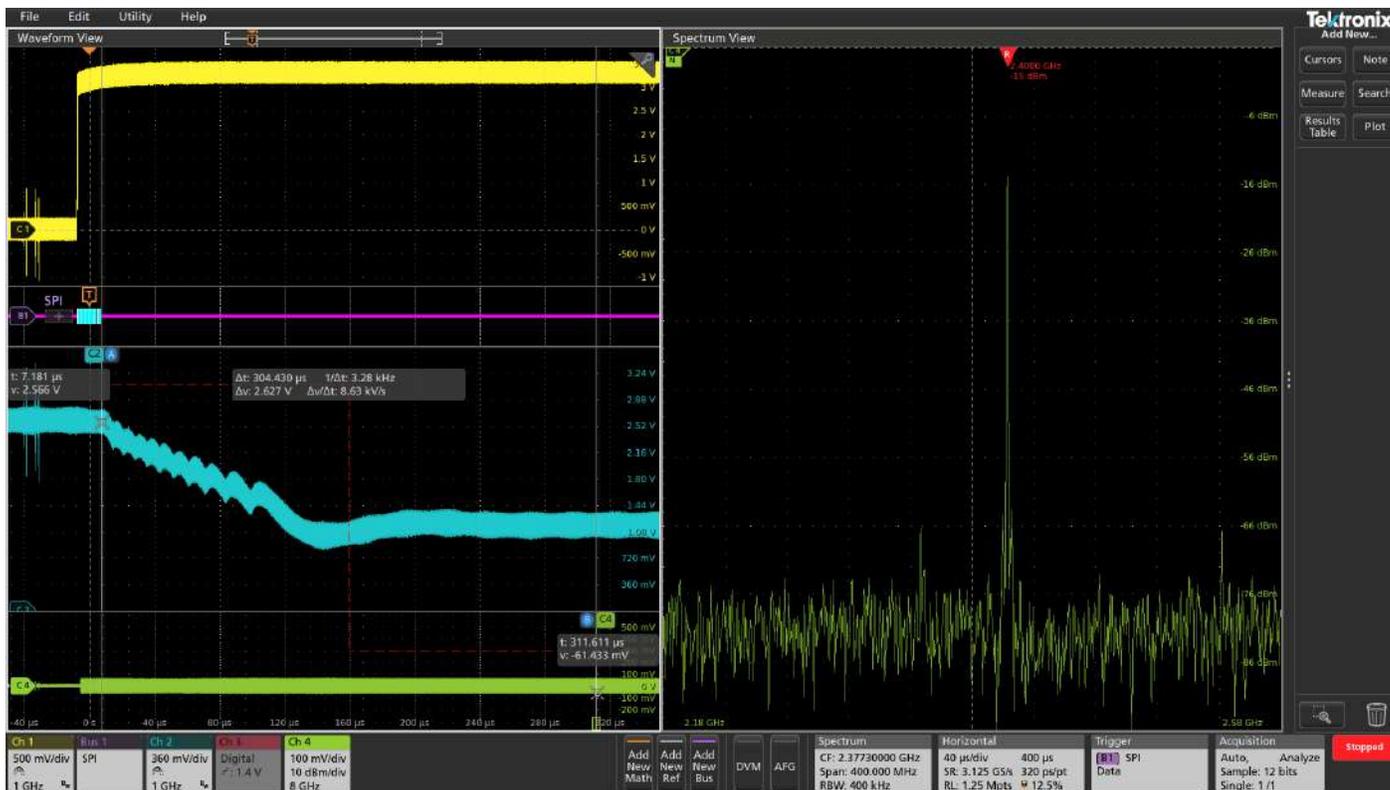


圖 14. 我們在 SPI 匯流排命令上觸發，此命令會告訴 VCO 要調到什麼頻率。在本例中是 2.4 GHz。利用移動頻譜時間功能，我們能夠捲動瞭解整個擷取過程，看看射頻輸出何時穩定在 2.4 GHz。然後，我們可以使用游標量測頻譜時間觸發器事件的位置，並觀看到其花費了 304 $\mu$ s 使輸出達到所需的頻率。

## 與其他訊號的時間相關性

除了顯示頻域訊號隨時間變化之外，Spectrum time 還允許您將頻域內的事件與系統中感興趣的其他訊號進行時間關聯。在圖 14 中，我們擷取了 PLL/VCO 的啟動序列。

- 通道 1 (黃色) 是 VCO 啟用訊號。
- 通道 2 (青色) 是 PLL 電壓。
- 通道 3 (未顯示) 配置為八個數位通道，並正在探測控制 PLL/VCO 的 SPI 匯流排。
- 通道 4 是射頻輸出。

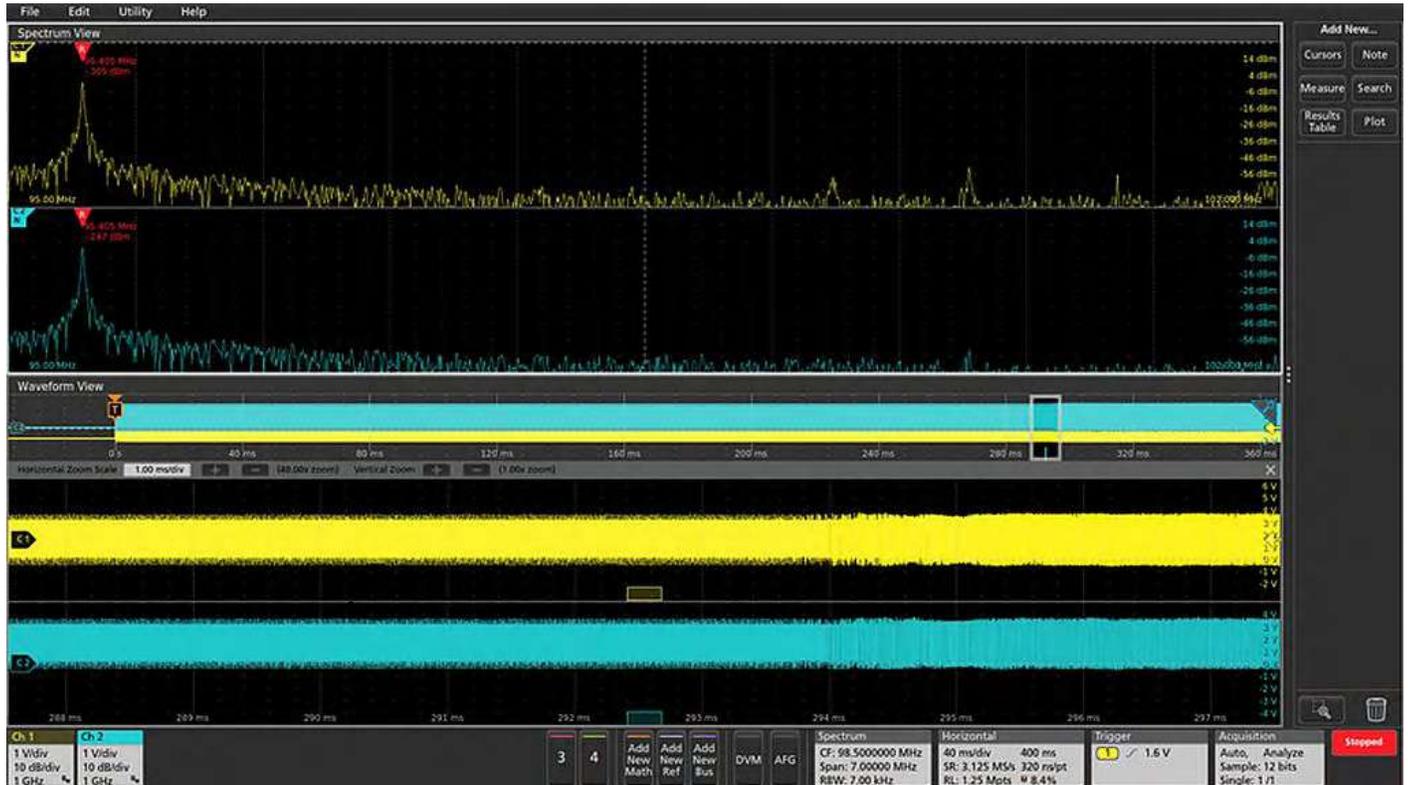


圖 15. 當除錯任務需要時，可以同時分析多個通道。此處兩個通道顯示一個時脈訊號從電路中兩個不同的點開始。

## 多通道分析

對於更複雜的疑難排解，Spectrum view 可用於多個通道，如圖 15 所示。這兩種用顏色編碼的類比波形都有相應的頻譜。請注意，現在每個通道都有一個頻譜時間指標。預設情況下，所有頻譜時間指標都鎖定在一起，並一起移動觀測。這確保您在所有通道上都能看到與時間相關的頻譜。在本例中，這兩個通道顯示了時脈訊號從電路中的兩個不同點的啟動。

若要進行更進階的疑難排解，可以不鎖定頻譜時間，並彼此獨立地移動。此外，每個頻譜的中心頻率可以獨立移動，但是所有的 Spectrum View 通道則必須共用相同的跨距、解析度頻寬和視窗類型。

## 尋求更有效的系統分析

高效的嵌入式系統分析和除錯不僅始於洞察力，也將會以洞察力完美收尾。如果沒有對時域和頻域的精確、同步的洞察力，您如何能找出系統無法如預期運作的真正原因？答案是不能，工程師們早就意識到了這一點，但受限於傳統示波器 FFT 的局限性而有志難伸。

由下一代 ASIC 技術支援的 Spectrum View 不僅解決了這些挑戰，並提供了許多重大的進展：

- 支援使用熟悉的頻譜分析控制功能 (中心頻率、跨距和RBW)
- 允許分別最佳化時域和頻域顯示
- 提高頻譜顯示的更新率
- 顯著提高頻域中可實現的頻率解析度
- 可在波形視圖和頻譜視圖中查看訊號，而無需分割訊號路徑
- 輕鬆調查頻域視圖如何隨時間變化以及整個擷取過程。
- 輕鬆、準確地關聯時域事件和頻域事件

## 附錄

詳細的範例：

### 傳統 FFT 與 Spectrum View

傳統 FFT 所面臨的挑戰遠遠超出了易用性。為了說明工程師必須考慮的效能權衡，假設我們有一個 900 MHz 的音調，並要以 100 Hz 的解析度在音調的任何一側查看其高達 50 kHz 的相位雜訊。理想情況下，頻譜視圖應具有以下設定：

- 中心頻率：900 MHz
- 頻距：100 kHz
- RBW：100 Hz

### 傳統示波器 FFT

使用傳統示波器 FFT、水平刻度、取樣率和記錄長度設定決定 FFT 的運作方式，必須整體考慮以產生所需的視圖。

水平刻度可確定擷取的總時間。在頻域中，擷取的總時間決定了您的解析度。您擷取的時間越多，您在頻域中獲得的解析度就越高。

若要解析 100 Hz，我們至少需擷取  $(1/100 \text{ Hz}) = 10 \text{ ms}$  的時間。但是，實際上，我們需擷取將近兩倍的時間。擷取的開始和結束會在結果頻譜中引入不連續性 (並因此帶來誤差)。為了最小化這些不連續性，擷取的記錄需以 FFT「視窗」倍數增長。大多數 FFT 視窗具有鐘形或高斯形狀，其兩端極低，而中間較高。顯示的結果頻譜主要由記錄的中間部分驅動。每個視窗類型均有一個與之關聯的常數。對於此範例，使用因數為 1.90 的 Blackman-Harris 視窗類型將要求我們擷取：

$$10 \text{ ms} \times 1.9 = 19 \text{ ms}$$

取樣率確定頻譜中的最大頻率，其中  $F_{\text{max}} = \text{SR} / 2$ 。對於 900 MHz 訊號，我們需要至少 1.8 GS/s 的取樣率。以 5 系列的類比取樣為例，我們將以 3.125 GS/s (第一個可用取樣率高於 1.8 GS/s) 進行取樣。

現在我們可以確定記錄長度。這只是擷取時間 \* 取樣率。在本例中是：

$$19\text{ ms} \times 3.125\text{ GS/s} = 59.375\text{ M 點}$$

根據儀器的不同，此記錄長度甚至可能無濟於事。而且，即使示波器具有足夠的記錄長度，但許多示波器仍會限制 FFT 的最大長度，因為儀器需進行極密集的計算。例如，上一代 Tektronix 示波器的最大 FFT 長度約為 2 M 點。假設您仍希望看到 900 MHz 訊號 (需要高取樣率)，則必須擷取所需時間的大約 1/30，導致頻域中的解析度比所需解析度差 30 倍。

如本例所示，若要設定所需的視圖，即需要瞭解水平刻度、取樣率和記錄長度之間的複雜互動。此外，有限的記錄長度迫使工程師必須向現實妥協，而且，若在頻域中以良好的解析度觀察高頻訊號，則需要非常長的資料記錄，而這些資料記錄通常不可用，或者處理起來既昂貴又費時。儘管某些頻譜分析套件試圖管理這些權衡要素，但迄今為止所有的示波器 FFT 仍皆面臨上述限制。

### Spectrum View

現在，讓我們看看具有硬體數位下變頻的 Spectrum View 如何應對相同的挑戰。

所擷取的總時間仍會確定頻域中的解析度。我們亦需套用 FFT 視窗並擷取 19 ms 的資料。在 4、5 和 6 系列 MSO 中，ADC 會將數位化的時域資料傳送至抽取器以建立時域波形視圖，但同時也會將資料傳送至數位下變頻器 (DDC)。

如您所料，DDC 對所需的取樣率具有深遠的影響。DDC 將關注的中心頻率從 900 MHz 移至 0 Hz。現在，100 kHz 跨距從 -50 kHz 到 50 kHz。若要充分取樣 50 kHz 訊號，我們只需要 125 kS/s 的取樣率即可。請注意，透過將 DDC 插入擷取程序，則所需的取樣率將成為跨距函數，而不是中心頻率的函數。

記錄長度由與以前相同的關係控制，但現在是：

$$19\text{ ms} \times 125\text{ kS/s} = 2375\text{ 點}$$

資料儲存為同相和正交 (I&Q) 取樣，並在時域資料和 I&Q 資料之間保持精確的同步。請記住，在傳統的 FFT 中，所需的記錄長度為 59.375 M 點。下變頻的記錄僅需要 2,375 點 (資料減少了 99.996%)。

現在，我們對 2,375 點 I&Q 記錄執行 FFT，獲得所需的頻譜。資料點數量的顯著減少帶來了幾個重要的優點：

- 更新速度有效提高
- 可處理更長的時間跨距，因此可在頻譜分析中獲得更好的頻率解析度
- 可擷取所需的頻域視圖，而無需以任何方式變更時域視圖

## Tektronix 聯絡方式：

澳洲 1 800 709 465  
奧地利 00800 2255 4835  
巴爾幹半島、以色列、南非及其他 ISE 國家 +41 52 675 3777  
比利時 00800 2255 4835  
巴西 +55 (11) 3759 7627  
加拿大 1 (800) 833 9200  
中東歐、烏克蘭及波羅的海諸國 +41 52 675 3777  
中歐與希臘 +41 52 675 3777  
丹麥 +45 80 88 1401  
芬蘭 +41 52 675 3777  
法國 00800 2255 4835  
德國 00800 2255 4835  
香港 400 820 5835  
印度 000 800 650 1835  
印尼 007 803 601 5249  
義大利 00800 2255 4835  
日本 81 (3) 67143010  
盧森堡 +41 52 675 3777  
馬來西亞 1 800 22 55835  
墨西哥、中/南美洲與加勒比海諸國 52 (55) 56 04 50 90  
中東、亞洲及北非 + 41 52 675 3777  
荷蘭 00800 2255 4835  
紐西蘭 0800 800 238  
挪威 800 16098  
菲律賓 1 800 1601 0077  
中國 400 820 5835  
波蘭 +41 52 675 3777  
葡萄牙 80 08 12370  
南韓 001 800 8255 2835  
俄羅斯及獨立國協 +7 (495) 7484900  
新加坡 800 6011 473  
南非 +27 11 206 8360  
西班牙 00800 2255 4835  
瑞典 00800 2255 4835  
瑞士 00800 2255 4835  
台灣 886 (2) 2656-6688  
泰國 1 800 011 931  
英國/愛爾蘭 00800 2255 4835  
美國 1 800 833 9200  
越南 12060128  
最後更新日期 2016 年 9 月

若需進一步資訊，Tektronix 維護完善的一套應用指南、技術簡介和其他資源，並不斷擴大，幫助工程師處理尖端技術。請造訪 [www.tektronix.com.tw](http://www.tektronix.com.tw)



Copyright © Tektronix, Inc. 版權所有。Tektronix 產品受到已經簽發及正在申請的美國和國外專利的保護。本文中的資訊代替以前出版的所有資料。技術規格和價格如有變更，恕不另行通知。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc 的註冊商標。本文提到的所有其他商標均為各自公司的服務標誌、商標或註冊商標。

2020 年 4 月

48T-61563-2

Tektronix 台灣分公司

**太克科技股份有限公司**

114 台北市內湖堤頂大道二段 89 號 3 樓

電話：(02) 2656-6688 傳真：(02) 2799-8558

太克網站：[tw.tek.com](http://tw.tek.com)

**Tektronix**<sup>®</sup>