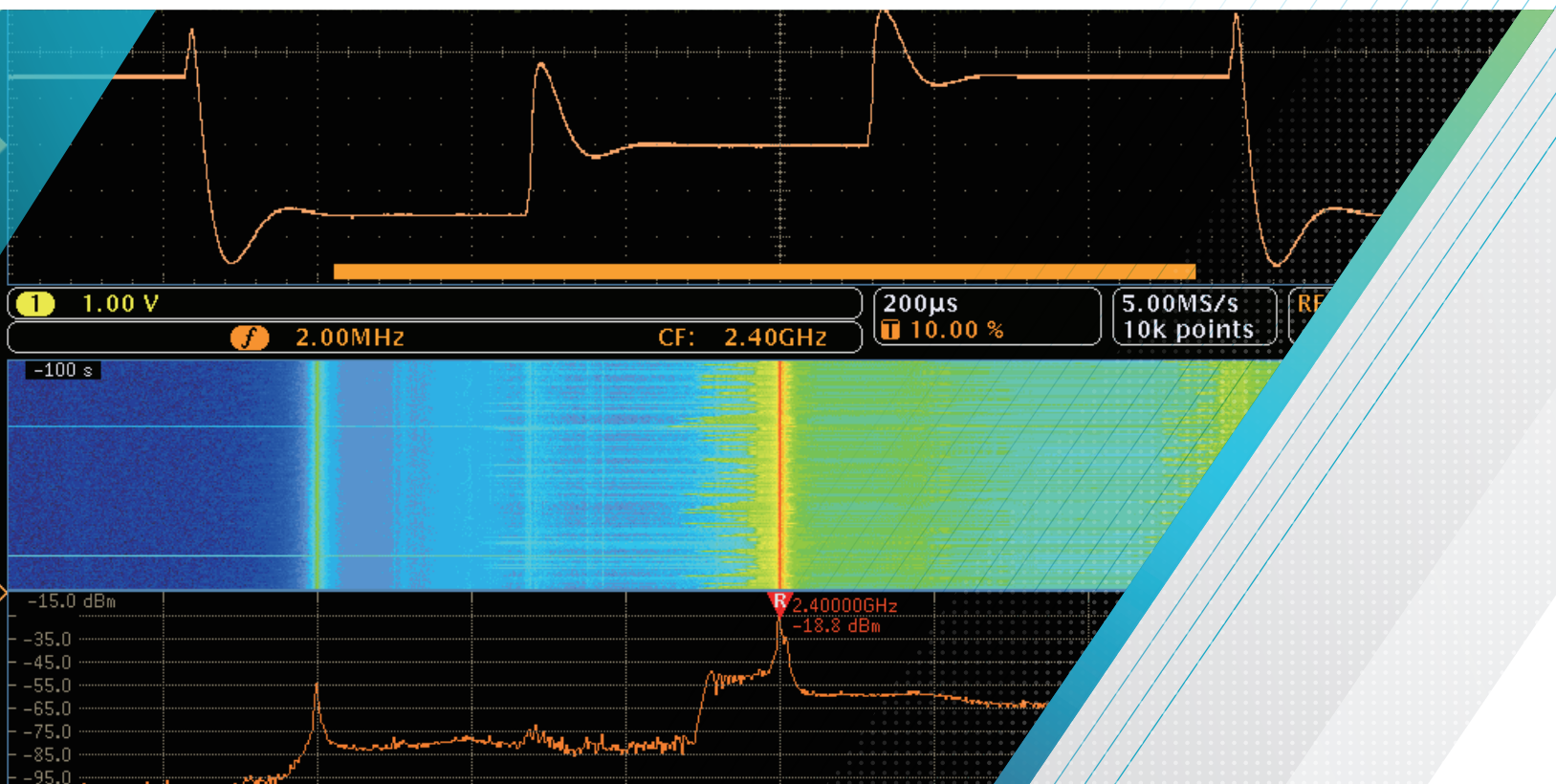


MDO4000C 系列混合域示波器 基礎知識

應用摘要



目錄

| | | | |
|---------------------------|-------------|---------------------------|--------------|
| 第一章：簡介 | 4-9 | 第三章：深入瞭解相關知識 | 36-53 |
| 趨勢：無線技術無處不在 | 4 | 頻譜分析基礎 | 36 |
| 趨勢：現今嵌入式設計人員的職責不斷擴大 | 5 | 降頻 | 42 |
| 趨勢：無線電變成嵌入式系統 | 6 | 頻域觸發 | 43 |
| 趨勢：射頻訊號隨時間變化 | 6 | 擷取原始的射頻時域資料記錄 | 43 |
| 趨勢：射頻頻寬不斷提高，訊號越來越快 | 7 | 數位降頻 | 48 |
| 趨勢：EMC 仍然非常重要 | 8 | 產生頻譜 | 49 |
| 趨勢：產品開發週期變得更加關鍵 | 9 | 產生射頻時域資料 | 50 |
| 第二章：混合域示波器 | 9-35 | 產生頻譜瀑布圖 | 52 |
| MDO：比示波器更優越 | 10 | 時間解析度 | 53 |
| 專用射頻通道 | 11 | 附錄 A：視窗函數 | 54 |
| 獨立擷取時域和頻域 | 12 | 附錄 B：術語 | 58 |
| 為頻域量測最佳化的使用者介面 | 13 | | |
| MDO：比頻譜分析儀更優越 | 15 | | |
| 多個輸入通道 | 15 | | |
| 同時的射頻訊號時域和頻域視圖 | 16 | | |
| 射頻訊號隨時間變化的視圖 | 17 | | |
| 以時間為基礎的寬頻譜擷取頻寬擷取技術 | 19 | | |
| MDO4000C：強大的功能組合 | 20 | | |
| 專用頻譜使用者介面 | 20 | | |
| 頻譜軌跡 | 22 | | |
| 偵測器 | 23 | | |
| 射頻時域軌跡 | 24 | | |
| 時域和頻域關聯 | 26 | | |
| 射頻觸發 | 27 | | |
| 頻譜瀑布圖 | 28 | | |
| 標記 | 29 | | |
| 射頻量測 | 31 | | |
| 限幅指標 | 34 | | |

第一章：簡介

Tektronix MDO4000 系列代表著一種新的儀器典範：混合域示波器或 MDO。這是第一個專為時域和頻域中在數位訊號、類比訊號和射頻訊號之間同時進行同步或時間關聯量測而設計的儀器。

本文透過下述方式介紹了這一全新儀器：

- 討論推動 MDO4000C 需求的發展趨勢
- 匯總 MDO4000C 的功能
- 初步介紹 MDO4000C 中採用的技術

趨勢：無線技術無處不在

近幾年來，使用無線技術傳輸的資料數量一直在快速成長。幾乎在每個領域中，無線鏈結都在代替或擴展傳統有線通訊，例如：

- 照明使用的無線牆上開關和調光裝置
- 實用新型產品 (如自來水軟化器) 使用的無線控制/顯示面板
- 家庭身歷聲使用的無線資料連接
- 無線輪胎氣壓監測感測器
- 可攜式視訊遊戲控制桿之間的無線連接

激增的無線技術包括未授權頻段技術和授權頻段技術。未授權頻段技術主要由廣播公司或服務供應商 (電視、無線廣播、行動通訊) 使用，授權頻段技術則在「自由頻段」(藍牙、無線 LAN、車庫開門裝置、遠端無鍵輸入) 中在相對較短的距離上運行。

現代無線系統採用完善的調變方案。這些調變方案一般使用數位訊號處理 (DSP) 來實現，可以用笛卡爾複數形式的 I (同相) 和 Q (正交) 資料來表達，進而用來調變發送的射頻訊號。

顧名思義，現代無線技術同時涵蓋了時域和頻域。此外，訊號存在於三個域中：數位域、類比域和射頻頻域。

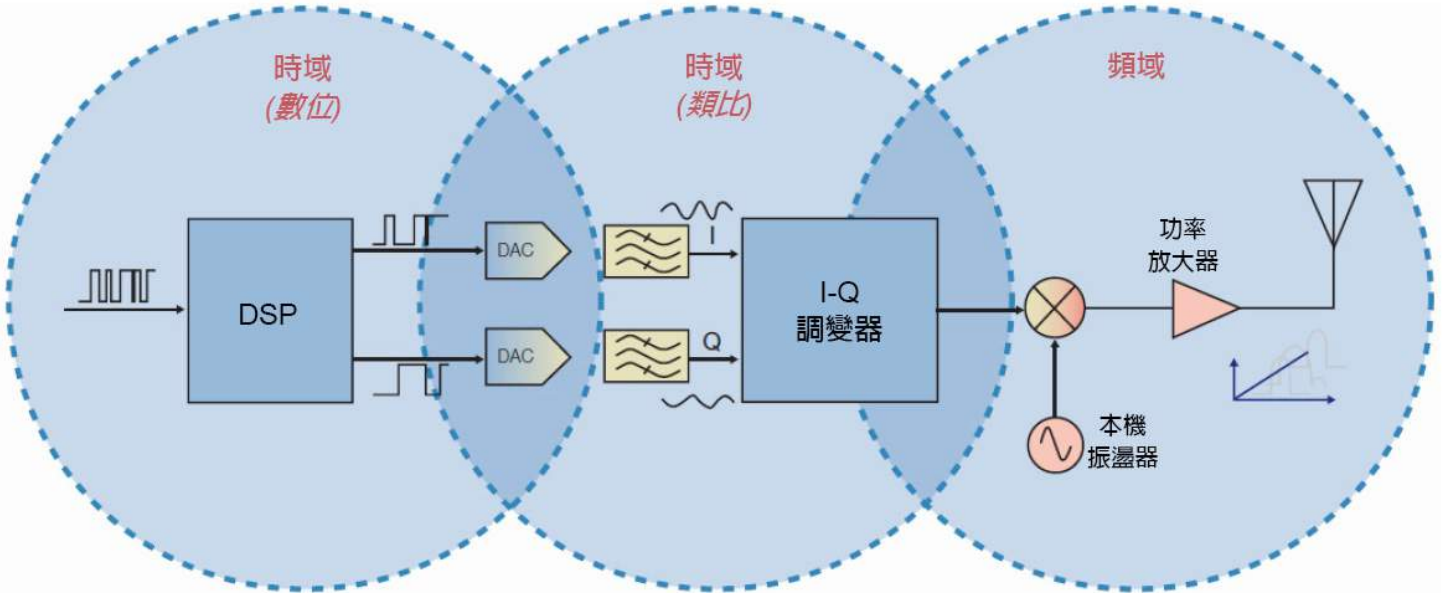


圖 1. 現代無線發射器簡化的區塊圖。

若設計人員需要對跨越這三個量測域的系統進行必要的量測、除錯和驗證，往往需要花費許多的精力與時間。在 Tektronix 混合域示波器推出之前，沒有任何一台儀器是為這些量測類型與需要而最佳化的，這樣使得設計與除錯工作更顯艱鉅。

他們需要一種為在這三個域中「同時」進行量測的專門設計的量測工具。

趨勢：現今嵌入式設計人員的職責不斷擴大

無線技術無處不在的這種趨勢，給嵌入式系統設計人員的職責帶來了深遠的影響，為了迎合市場與應用需求，他們正努力在設計中採用一些新興且自己所不熟悉的射頻技術。

嵌入式設計人員經常發現，自己必需解決許多問題，但在執行工作時卻沒有所需的適當設備，列舉一些例子：

- 設計和除錯採用了 ASK 或 FSK 調變方式的簡單射頻鏈結

- 確定藍牙無線電 IC 是否以預想的方式傳送訊號
- 在運行過程中疑難排解 IEEE 802.11 晶片組的程序
- 偵測和同步相同頻段、相同設備上的多種無線技術，避免自我干擾
- 在通訊建立時追蹤無線電發射器和接收器之間的交互

作為嵌入式設計人員的首選工具，示波器只是為進行時域量測所最佳化的。MSO (混合訊號示波器) 可以同時量測類比訊號和數位訊號 (包括各種匯流排資料與命令)，但很難使用示波器在射頻載波上有效量測射頻訊號。另外，也很難將時域中的事件與頻域中的事件充分關聯起來，而這一點對搜尋系統級問題至關重要。

頻譜分析儀可以在頻域中進行量測，但這些工具並不是大多數嵌入式系統或硬體設計人員的首選工具。在系統其餘部分使用頻譜分析儀進行時間關聯的量測幾乎是不可能的。

設計人員需要一種量測工具擴展傳統 MSO 的量測優勢，允許使用者將頻域中的現象與導致這些現象的時域事件關聯起來，以便檢視這些事件之間的邏輯與時間關係，進而幫助設計人員洞悉與透視系統中的真實情況。

趨勢：無線電變成嵌入式系統

在過去 20 年中，無線電設計一直受到主導電子設計的嵌入式微控制器的發展趨勢所影響。其結果是現代無線電包含著多個資料匯流排（串列匯流排和並列匯流排）、多個微控制器和一個重要的軟體元件。

無線電設計人員經常發現自己需要解決許多問題，但沒有適當的量測與偵測設備，例如：

- 確定編程錯誤會否導致所傳送功率偏低
- 檢視所傳送的無線電訊號中造成間歇性串擾的來源
- 驗證跳頻演算法是否正確地工作

作為這些設計人員的首選工具，掃頻分析儀是為量測單個頻域訊號而最佳化；既無法量測時域訊號，也無法在射頻訊號與設備中大量的其他電子訊號之間提供任何有意義的時間關聯。傳統掃描

分析儀不適合探討隨時間變化的射頻訊號，對除錯無線嵌入式系統中的問題更是遠遠不足。

向量訊號分析儀是一種現代型頻譜分析儀，是為量測隨時間變化的射頻訊號而開發的。在某些情況下，可以在示波器中增加向量訊號分析軟體（如 Tektronix 提供的 SignalVu 向量訊號分析軟體），分析隨時間變化的射頻訊號；但是，示波器的頻寬可能不能直接量測射頻載頻，或沒有足夠的靈敏度與動態範圍來分析射頻訊號的特性。

示波器可以在時域中進行多通道量測，但在示波器通道上增加向量分析軟體可能會限制示波器進行一致性分析的基本功能。對數位狀態邏輯訊號、類比訊號和射頻訊號進行不同的時域分析，對疑難排解嵌入式系統至關重要。

設計人員需要一個整合了現代頻譜分析儀量測優勢（向量訊號分析）的量測工具，允許使用者簡便地進行完善的、時間關聯的類比和數位時域與頻域的量測。

趨勢：射頻訊號隨時間變化

現代通訊越來越多地隨時間變化。無線電通常會以間歇方式傳輸訊號，以節省能耗。許多現代調變方案使用擴頻技術，在多個頻率中編碼訊號。

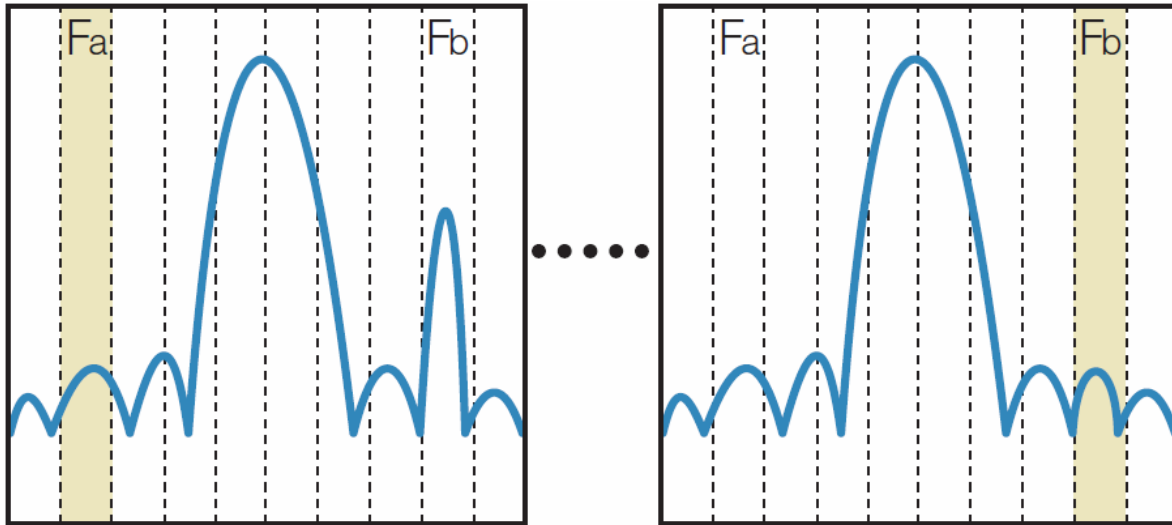


圖 2. 由於掃頻架構限制了分析過程中感興趣的頻率，傳統頻譜分析儀可能會遺漏一些隨時間變化的突變訊號。

| 通訊標準 | 通道頻寬 | 工作頻寬 | 突發訊號的封包時長 |
|-------------|------------------|---|---------------|
| FM 無線電 | 200 KHz | ~20 MHz @ 100 MHz | 連續發送 |
| 電視廣播 | 6-8 MHz | 55 MHz - 700 MHz | 連續發送 |
| 藍牙 | 1 MHz | ~80 MHz @ 2.4 GHz | ~ 400 us |
| IEEE 802.11 | 20-160 MHz | ~ 80 MHz @ 2.4 GHz; ~ 200 MHz @ ~5.6 GHz | 幾百 us 至 10 ms |
| UWB | > 500 MHz x 3 通道 | > 1.5 GHz @ 3.1-4.6 GHz (頻段 1) | 每個符號~300 ns |

表 1. 常見的通訊標準 - 傳統廣播通訊 (黃色) 和現代嵌入式無線技術 (綠色)。

傳統掃頻分析儀在觀察隨時間變化的射頻訊號方面是一種有欠缺的工具。如果分析儀在掃描通過該頻帶後，某脈衝訊號才出現在已掃描過的頻帶內，那麼這個脈衝訊號將不能被擷取 (如圖 2 所示)。

Fb 處感興趣的訊號以間歇方式廣播。在分析儀從 Fa 掃描到 Fb 時，如果在分析儀掃描通過 Fb 時訊號恰好沒有廣播，那麼可能會遺漏訊號。

設計人員需要一個擁有寬即時頻譜擷取頻寬的頻域量測工具，可以在某個時刻點上進行頻域與時域的取樣與量測，該時刻點可以由時域中某個指定的事件 (如：某種觸發條件被滿足時) 所確定，這可以讓系統設計人員瞭解在某時刻點上，系統中各個訊號是如何交互作用的。

趨勢：射頻頻寬不斷提高，訊號越來越快

現代通訊正在採用頻寬越來越寬的調變方案，分組通訊的速度正變得越來越快。

看一下表 1，其中顯示了部分常見的通訊標準及對應的通道頻寬和工作頻寬。注意在較新的調變方案中，通道頻寬會大幅度提高。

爲了有效率地量測這些現代嵌入式無線技術，通常必需在一個時點擷取整個通道頻寬。

雖然傳統掃頻分析儀可以量測連續廣播訊號，但並不是爲在這些頻寬中量測隨時間變化的訊號而設計。掃頻分析儀的有效頻譜擷取頻寬低於解析度頻寬 (RBW，典型爲 10 MHz)。由於採取了掃頻方式，因此「看不到」現今掃描頻率外面 (頻外) 的訊號。掃頻分析儀也不能以時間一致的方式來擷取整個頻譜。

而且，這些現代訊號隨時間變化的特性對傳統掃頻分析儀來說過快。在超出 RBW 的極限時，掃頻分析儀在以最快速度掃描感興趣的工作頻段時，只能擷取幾十到幾百毫秒的時間。但發送的訊號發生的時間通常只有幾十微秒或以下。

更加現代的頻譜分析儀 (向量訊號分析儀) 一般擁有 10 MHz 的頻譜擷取頻寬，可以用於更老舊/更簡單的無線通訊標準。某些頻譜分析儀提供了高達 160 MHz 的頻寬¹，更加適合現代標準，但獲得這種效能的同時，其價格也會大幅度提高。

若需要比這更高的頻譜擷取頻寬，實際上現在還沒有專用頻譜分析工具可以達到 (除了新型的 MOD 外)。使用者被迫使用示波器或運行專用向量訊號分析軟體的數位器來進行量測。遺憾的是，這些時域解決方案在頻域量測中效能都比較差，特別是在無雜散動態範圍 (SFDR) 規格上。

設計人員需要一個擁有寬頻譜擷取頻寬和良好 SFDR 效能的跨域量測工具。

趨勢：EMC 仍然非常重要

電磁相容性 (EMC) 一直是現代電子設計的一個重要要素。

然而，這一領域中的問題通常很難除錯和疑難排解。進行 EMC 量測的主要問題是法定頻率覆蓋範圍至少爲 1 GHz，待測訊號可能是間歇性訊號或定向訊號。

在傳統測試設定中，在有接收天線時，可以轉動電子裝置，這樣可以從所有方向進行量測，在各種高度最大限度地執行量測。但是，由於寬頻率範圍，旋轉速率必須非常慢，以允許掃頻分析儀在所有方位中繪製準確的輻射畫面，因此所耗費的時間也相當長。此外，可以在一個天線高度上最大限度地提高基礎頻率上的輻射，而在另一個不同高度上最大限度地提高其諧波。瞭解待測產品的輻射概況，需要能夠同時觀察所有頻率。

如果干擾源是間歇性的，診斷會變得更加困難。使用這些傳統量測技術時，幾乎不可能將所偵測到的輻射與電子裝置或系統中的某個時間關聯起來，例如：

- 診斷脈衝性輻射是否與待測裝置的記憶體被存取或進入診斷狀態有所關聯
- 進入和離開低能耗模式時，偵測裝置啓動時或狀態變化時所產生的輻射
- 瞭解輻射是否造成高階諧波有關

設計人員需要一種擁有寬頻譜擷取頻寬的頻域量測工具，可以在特定時點進行量測，並與時域中感興趣的事件互相關聯。

¹ 安捷倫 N9030A PXA

趨勢：產品開發週期變得更加關鍵

毫不奇怪的是，世界各地的企業正在更快地將產品推向市場。錯過切入市場的窗口或設計週期過長在競爭環境中可能會導致整體的新產品上市的失敗。同樣明確的趨勢是，與此同時，各企業還正在轉向「更加精簡」的組織架構，以便以更少的投入獲得更高的回報。

在這個壓力日益提高的設計與競爭環境中，現今測試量測設備並不能很好地順應上述的趨勢。

- 為在多個域中量測訊號，需要使用多台量測設備，這提高了資本開支或租賃費用。
- 跨域時間關聯量測方式效率低下，甚至是不可能的，大幅降低了工程設計的效率。
- 在偶爾使用時，瞭解怎樣使用邏輯分析設備、示波器和射頻頻譜量測設備，涉及到的學習曲線通常需要操作人員重新學習每一台設備的使用方式，非常耗時。
- 量測寬頻寬、隨時間變化與突變的射頻訊號所需的設備價格昂貴，再次提高了資本開支或租賃費用，使進入無線設備開發的資本門檻相對偏高。

設計人員需要擁有公共使用者介面，將多種量測功能整合到一個經濟的工具中的量測儀器，可以量測現今跨域環境中寬頻寬、並時間關聯的訊號。

第二章：混合域示波器

Tektronix MDO4000 系列混合域示波器是第一個有效解決嵌入式射頻設計人員面臨的所有量測挑戰的最佳工具。

MDO 是混合訊號示波器和現代頻譜分析儀的整合。但是，透過提供獨特的功能，MDO 混合域示波器實現了真正比這兩種儀器更優越的總體成效。本節將介紹這些獨特的功能，並探討這些功能的部分應用。

混合域示波器的主要價值是能夠在多個域中進行**時間關聯**量測：**時域**、**頻域**和**調變域**。此外，還可以在多個**類比訊號**、**數位訊號**和**射頻訊號**之間進行這些量測與分析。

時間關聯 意味著混合域示波器可以量測所有輸入訊號之間的時序關係。例如，示波器可以量測控制訊號與無線電傳輸開始時間之間的時延，量測發送的無線電訊號的上升時間，或量測無線資料串中各碼型之間的時間。使用者可以分析裝置狀態在變化過程中的電源電壓降，以及這對射頻訊號的影響為何，在時間軸上關聯起來。時間關聯對瞭解與診斷整個系統運作至關重要，使用者可以瞭解這些時域、頻域與調變域事件之間的因果關係。

時域 訊號以振幅如何隨時間而變化的角度來觀察是最好的。這些時域訊號傳統上使用示波器來觀測與量測。以振幅隨時間變化方式觀察訊號有助於回答下述問題：「這個電源供應器真的是直流嗎？」「這個數位訊號是否有足夠的建立時間？」「我的射頻訊號打開了嗎？」或「透過這個有線匯流排正在發送哪些資訊？」時域訊號並不限於類比輸入。觀察射頻訊號的振幅、頻率和相位如何隨時間變化可以研究射頻訊號簡單的類比調變、啟動和穩定等各特性。

頻域 訊號以振幅如何隨頻率而變化的角度來觀察是最好的。這些訊號傳統上使用頻譜分析儀來觀測與量測。以振幅隨頻率變化觀察訊號有助於回答下述問題：「發送的這個射頻訊號是否位於分配的頻譜範圍內？」「是不是這個訊號上的諧波失真導致裝置問題？」或「這個頻帶內是否存在任何訊號？」

類比訊號是電氣訊號中最通用的訊號。在感測器的幫助下，許多物理現象都可以轉換成類比電訊號。基本上，類比電訊號的電壓會隨著時間推移而連續變化。類比訊號連續表示可變現象，如電源供應器輸出電壓或鎖相迴路控制電壓。

數位訊號是現代電子裝置中的主要訊號。透過在兩個不同電壓之間的切換，這些訊號用來以二進位格式編碼數位資訊。實際上，數位訊號也是類比訊號，但通常沒有必要（有時會引起混淆）以邏輯位準「1」或「0」之外的方式觀察這些訊號。數位訊號一般用來控制或編碼資訊（在時域中）。

射頻訊號可以分為故意訊號和非故意訊號。非故意訊號可以分為電磁輻射（EMI），故意射頻訊號主要用於現代無線通訊中。在頻域中進行資訊編碼是故意訊號的特性。由於與無線電通訊相關，射頻訊號一般使用頻率非常高的載波對資訊編碼。射頻訊號也是類比訊號，但其調變方案、頻率和無線傳輸使其自成一派。

傳統上，量測這裡討論的訊號需要使用三種不同的儀器：

- 示波器，這是為在時域中對類比訊號進行時間關聯量測而最佳化。
- 邏輯分析儀，這是為在時域中對數位訊號進行時間關聯量測而最佳化。通常為簡單起見，邏輯分析儀會代替混合訊號示波器（MSO）。混合訊號示波器是增加邏輯通道或數位通道的示波器，是為數位訊號和串列匯流排解碼與觸發而最佳化。

- 現代頻譜分析儀，這是為在頻域中對射頻訊號進行量測而最佳化的，以向量訊號分析架構為基礎。

MDO4000C 混合域示波器是第一台為使用一台儀器在時域和頻域中對全部三種訊號（類比訊號、數位訊號和射頻訊號）進行時間關聯量測而最佳化的儀器。

MDO：比示波器更優越

大多數示波器能夠計算和顯示擷取的時域訊號的快速傅立葉轉換或 FFT。從表面上看，這似乎為許多使用者提供了充足的頻域分析功能。典型示波器即使有 FFT 功能，在進行頻域量測中仍是次優方案。

與典型示波器（即使有 FFT 功能）相較，MDO 混合域示波器有多個主要優勢：

- 擁有一個整合式頻譜分析儀，為頻域量測提供了傑出的功能、動態範圍、靈敏度和整合性。
- 其架構允許在時域通道和頻域通道上獨立設定擷取參數。
- 在多個輸入中進行擷取，並可以達成取樣對準（以跨域為基礎的觸發電路）和多域樣點的時間關聯。
- 為顯示和控制頻域量測通道最佳化的使用者介面，節省學習與熟悉使用多台儀器的時間。

| 型號 | 類比通道頻寬 | 射頻輸入頻率範圍 |
|-----------------|---------|---------------|
| MDO4104C 選配 SA6 | 1 GHz | 9 kHz 至 6 GHz |
| MDO4104C 選配 SA3 | 1 GHz | 9 kHz 至 3 GHz |
| MDO4054C 選配 SA6 | 500 MHz | 9 kHz 至 6 GHz |
| MDO4054C 選配 SA3 | 500 MHz | 9 kHz 至 3 GHz |
| MDO4034C 選配 SA6 | 350 MHz | 9 kHz 至 6 GHz |
| MDO4034C 選配 SA3 | 350 MHz | 9 kHz 至 3 GHz |
| MDO4024C 選配 SA6 | 200 MHz | 9 kHz 至 6 GHz |
| MDO4024C 選配 SA3 | 200 MHz | 9 kHz 至 3 GHz |

表 2. 搭配整合式頻譜分析儀的 MDO4000C 型號。

整合式頻譜分析儀

第一個主要優勢是擷取能力。MDO4000C 可在基本示波器上選配一個整合式頻譜分析儀。除量測射頻訊號使用的單獨專用輸入外，這個輸入提供了多個重要優勢 (不是一般頻譜分析儀可以達成)：

- 輸入頻率範圍大
- 傑出的整合性
- 低雜訊效能
- 整合的多域樣點對準功能
- 與所有其他輸通道入共用和整合的跨域觸發功能

為進行頻譜量測，需要能夠量測高頻訊號的輸入。許多現代通訊訊號在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的 ISM 頻帶中運行。即使在頻率相對較低的 900 MHz 系統上進行量測，也需要 4.5 GHz 的輸入頻率範圍，以檢查第五諧波。

儘管示波器提供了可以量測這些訊號的頻寬，但其一般比較昂貴，因為所有輸入通道承載相同的頻寬等級。MDO4000C 混合域示波器上的整合式頻譜分析儀為典型射頻訊號提供了能滿足所需的效能，而不要求每個類比通道都等於該頻寬效能。因此，其在類比通道和射頻通道上都達成充足的效能水準，同時儀器價格與主流示波器相當。圖 2 顯示包含整合式頻譜分析儀的可用型號。

在射頻訊號上進行量測時，訊號整合性也同樣重要。

頻譜分析儀中最重要的整合性指標是無寄生訊號動態範圍 (SFDR)。這個規格表示頻譜分析儀在大振幅訊號存在時偵測和量測小振幅訊號的能力。

與輸入相關的寄生訊號是由於使用者訊號與量測儀器之間的交互而產生，這些訊號難以「修復」，因為其頻率和振幅會隨著輸入訊號的變化而變化。

殘餘寄生訊號是表示量測儀器內部所產生的訊號洩漏到訊號路徑中的部分的大小。這些訊號消除起來比較容易，因為其一般是靜態的，但如果使用者訊號位於大體相同的頻率上，則可能會出現問題。

由於示波器的通用性特性，其 SFDR 一般要比典型頻譜分析儀要差。

低雜訊效能指標對量測低位準訊號及發射器的頻外輻射非常重要。

| | MDO4000C 規格 | 典型示波器規格 ² | 典型頻譜分析儀規格 ³ |
|----------------|--|----------------------|---|
| 輸入頻率範圍 | 9 KHz - 3 GHz | DC - 3.5 GHz | 9 KHz - 3 GHz |
| 輸入相關寄生訊號 | -65 dBc 典型 | -45 dBc 標稱值 | -60 dBc 典型 |
| 殘餘寄生訊號 | -85 dBm，在 < -78 和 < -73 dBm 有例外情況 | -70 dBm | -90 dBm |
| 顯示的平均雜訊 (DANL) | -148 dBm/Hz 典型 (5 MHz - 400 MHz) -149 dBm/Hz 典型 (400 MHz 至 3 GHz) | 無 ⁴ | -150 dBm/Hz 典型 (10 MHz - 1.5 GHz) -147 dBm/Hz 典型 (1.5 GHz - 2.2 GHz) -143 dBm/Hz 典型 (2.2 GHz - 3 GHz) |

表 3. 典型的 SFDR 規格。

MDO4000C 混合域示波器上的整合式頻譜分析儀再次解決了這些問題，其傑出的整合性填補了這些產品類別之間的空白。表 3 列出了部分主要規格。

MDO 較傳統的示波器在這些效能上得以改進，是因為採用了整合式頻譜分析儀，允許其採用高完整性的射頻衰減器裝置、遮罩與最佳化了的通道及進階訊號處理技術，如採用添加高頻振動來模糊模數轉換器量化的解析度，並改善其線性化，從而增加通道的雜訊比。這些技術不能用於典型類比示波器類比輸入通道上，因為所採用的射頻衰減器將會影響到示波器的類比通道頻寬是否能達到 DC (例如：MDO4000 的專用射頻輸入通道是由 50 KHz 開始)。並且在模數轉換中採用高頻振動模糊技術的話，在時域中將會被顯示為雜訊。

獨立擷取時域和頻域

第二個主要優勢是射頻通道控制和設定是獨立於其他示波器通道的。在示波器上使用 FFT 進行頻域量測的一個缺點，是特定頻域量測要求的取樣率和記錄長度設定還會影響其他示波器通道。這通常意味著一次只能在一個域中進行量測。在用於頻域量測時，時域顯示通常價值不大。在用於時域量測時，頻域顯示通常價值不大。如果想進一步瞭解時域設定和頻域設定之間的交互，請參閱第三章的「擷取原始的射頻時域資料記錄」。

² TektronixDPO7354，在典型的生產裝置上量測，不保證效能。

³ 安捷倫 CSA，如同在安捷倫科技公司 2013 年 6 月推出的安捷倫 CXA 頻譜分析儀資料規格表中所指的效能。

⁴ 示波器上的向量訊號分析軟體不具備頻率、頻距和解析度頻寬控制能力，DANL 就無意義。

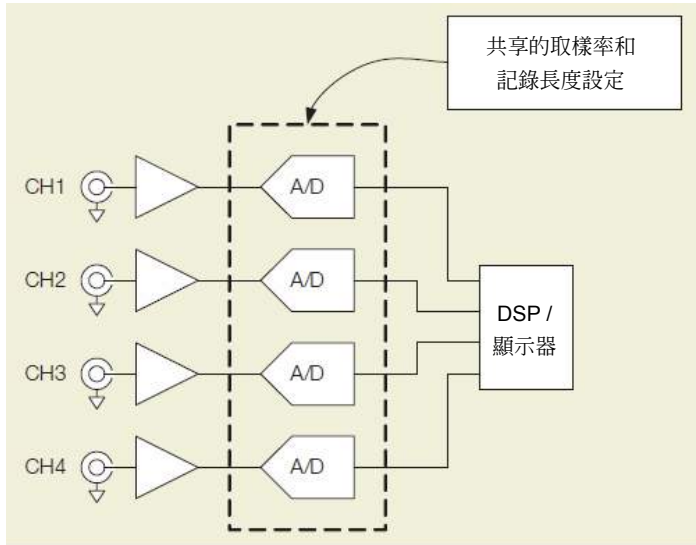


圖 3. 典型的示波器架構。

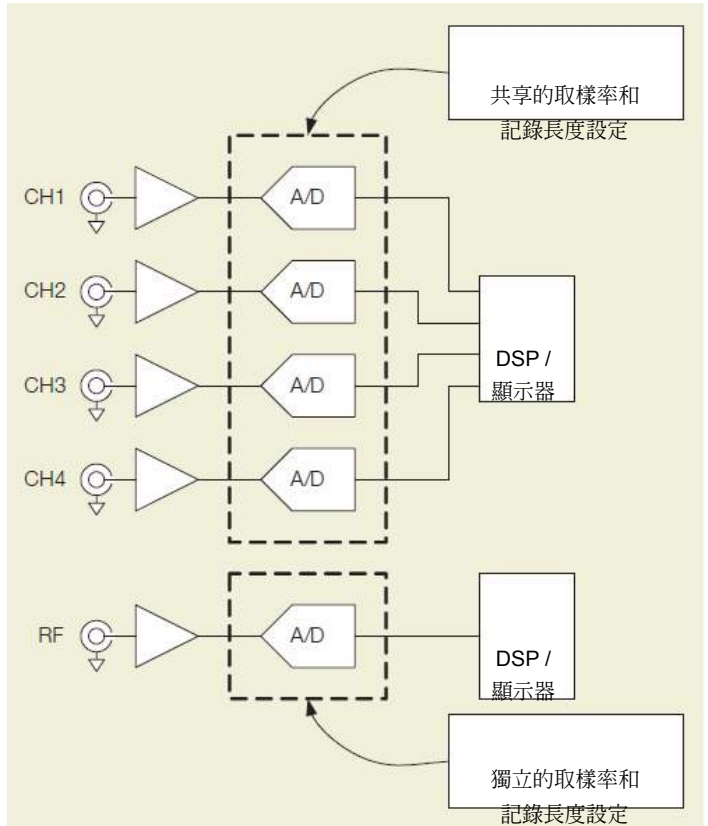


圖 4. MDO4000C 混合域示波器簡化的擷取系統。



圖 5. MDO 頻域畫面的使用者旋鈕。

圖 3 是簡化的典型 4 通道示波器的架構，可以看出這種限制。

相較之下，MDO 混合域示波器擁有與射頻輸入相關的專用獨立擷取系統，可以獨立控制擷取參數，在進行頻域量測時實現最佳化顯示。還可以以類似方式最佳化時域擷取參數，在該域中進行顯示。這兩個擷取域同步化，從而實現擷取資料的時間關聯，如圖 4 所示的 MDO4000 混合域示波器架構。

為頻域量測最佳化的使用者介面

最後一個優勢是使用者介面。在典型示波器上使用 FFT 進行頻域量測的另一個明顯問題，是其使用者介面是為時域量測而最佳化的。因此，一般頻譜分析儀的參數，如中心 **頻率**、**頻距**和 **RBW**。解析度頻寬，在這樣的介面上是很難被調整的（使用者需要調整示波器的記錄長度，取樣率等時域概念來控制如中心 **頻率**、**頻距**和 **RBW** 等頻域概念）。調整畫面一般需要手動計算取樣率和記錄長度等時域參數。獲得確切的所需設定通常也是不可能的事。

此外，FFT 通常以與時域軌跡相同的方式顯示，並且在與時域軌跡相同的視窗中顯示，因此經常會導致客戶對這些畫面發生混淆。

MDO4000C 消除了這些問題，提供了直覺的使用者介面和顯示功能，這些使用者介面和顯示功能為同時分析時域和頻域而最佳化，並在任何時候在各域之間保持時間關聯。

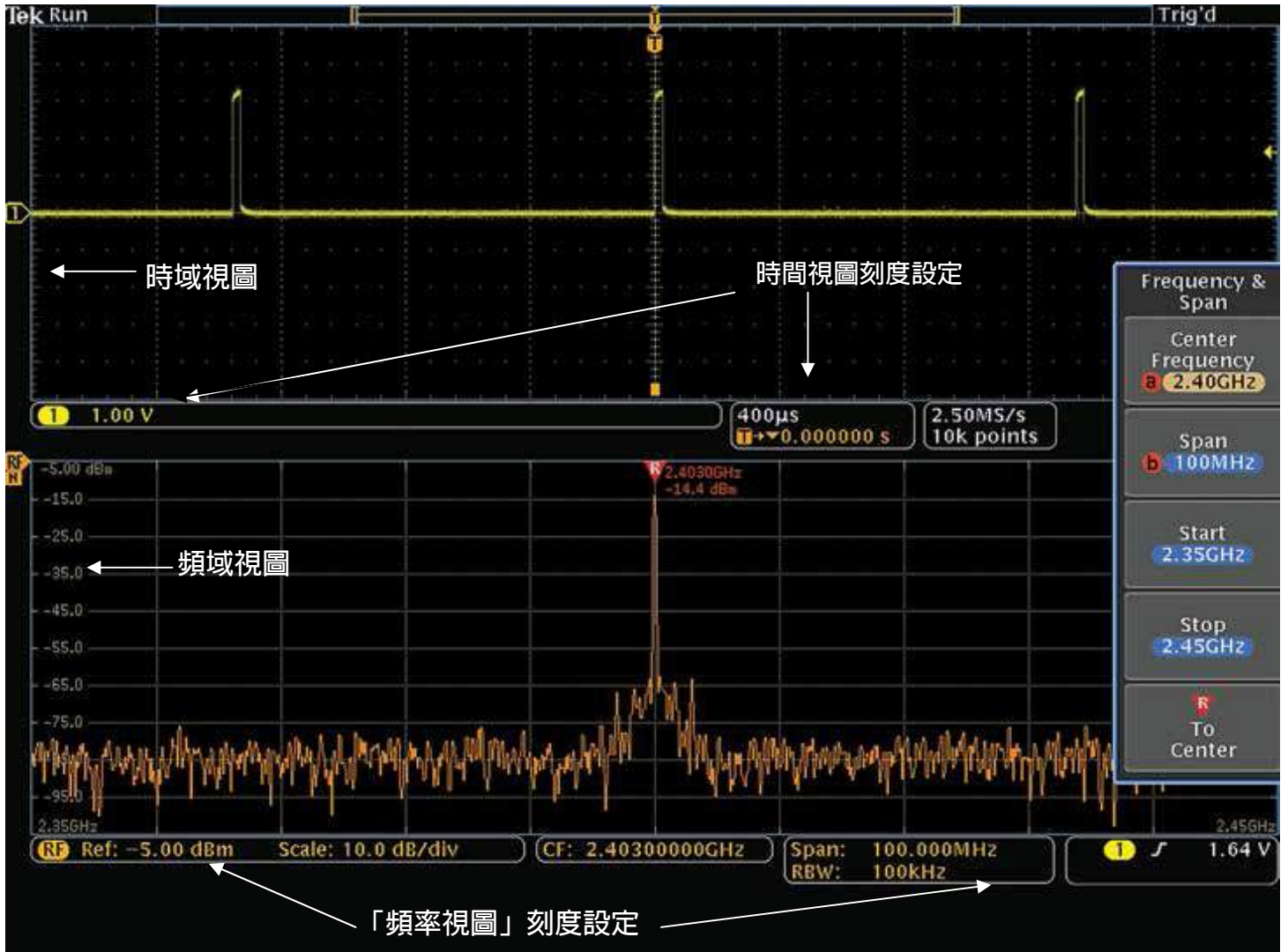


圖 6. MDO4000C 混合域示波器時域視圖和頻域視圖顯示概況。

可能最重要的是，其使用者介面還是為同時觀察時域訊號和頻域訊號最佳化的，提供了這些域之間交互的重要資訊。

圖 6 說明使用者介面和顯示功能的專門特性。「MDO4000C：強大的功能組合」文中提供了進一步細節。

請注意下面幾點：

- 時域資料顯示在頂部的顯示視窗中
- 頻域資料顯示在底部的顯示視窗中
- 每個視窗的相應讀數
- 相應的頻域功能表選項

MDO：比頻譜分析儀更優越

大多數頻譜分析儀能夠以「零頻距」畫面的形式顯示時域資料。從表面上看，這似乎為許多使用者提供了充分的時域分析功能。但實際上，典型頻譜分析儀（即使有零頻距功能）對進行時域量測來說也是次優方案。

與典型頻譜分析儀相較，MDO 混合域示波器擁有多個主要優勢：

- 多個輸入通道，包括類比、數位、匯流排等，提供系統層級的洞察力
- 整合式頻譜分析儀搭配多個併發的時間關聯的頻域和時域視圖，提供系統重要資訊
- 能夠觀察射頻訊號隨時間的變化，而沒有傳統頻譜分析儀的架構限制
- 以時間為基礎的寬擷取頻寬擷取架構，可以簡便地分析隨時間變化、寬頻寬和快速發生的射頻訊號

多個輸入通道

第一個主要優勢源於多個輸入通道。MDO4000C 可配置為包含 4 個類比通道和 16 個數位通道（大多數的 MSO 所提供），以得到一個能夠超越典型頻譜分析儀單通道功能的訊號量測產品。

現代射頻訊號由複雜的嵌入式系統來產生、接收和管理。串列和並列資料匯流排用於不同元件之間的通訊。可以由微處理器來管理電源。射頻系統本身可以是更大的電子裝置的一部分，預計提供與射頻系統相關的進一步功能。

趨勢是射頻訊號在現代電子系統中被「孤立」的可能性變成小得多。由於傳統頻譜分析儀只有一個輸入通道，專門用來進行簡單的射頻量測，因此無法擷取嵌入式設計（射頻、類比、數位）的整套訊號及其之間的交互。

MDO 提供了一套完整的輸入通道：

- 4 個類比時域通道，200 MHz、350 MHz、500 MHz 或 1 GHz 頻寬，擁有串列匯流排解碼和觸發功能
- 16 個數位時域通道，高達 60.6 ps 時序解析度，擁有串列匯流排解碼和觸發功能
- 1 個頻譜分析儀通道，擁有 3 GHz 或 6 GHz 輸入頻率範圍

更重要的是，這些輸入通道在時間上是關聯的。MDO 可以顯示與量測從發送給射頻發射器的串列資料命令到達的時刻，到射頻突發脈衝被發射時刻之間的時序關係，從而瞭解電子系統內部多個訊號之間的交互關係，這樣對透視、診斷和疑難排解裝置的行為至關重要。

儘管示波器使用者已經熟悉這一領域的這種多通道視圖，混合域示波器使得頻譜分析儀使用者第一次能夠輕鬆獲得多通道同時分析的優勢。

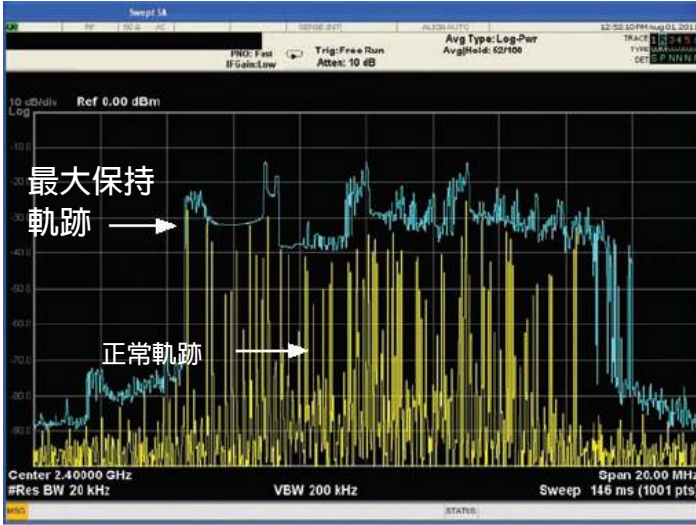


圖 7. 頻譜分析儀以 20 KHz 的 RBW 量測 20 MHz 頻譜中的訊號。

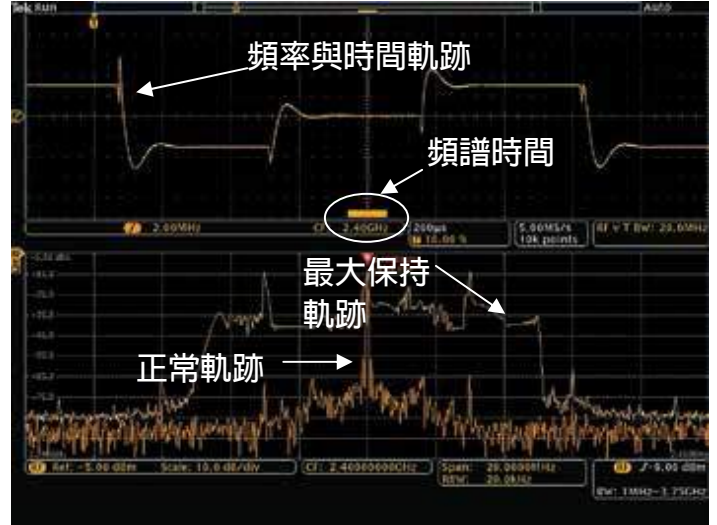


圖 8. 相同的訊號和設定，在 MDO 混合域示波器上的時域和頻域視圖。

同時的射頻訊號時域和頻域視圖

由於能夠同時觀察隨時間變化的訊號的時域和頻域，因此瞭解訊號行為的真正特性現在要容易得多了。一些簡單的射頻事件，如跳頻訊號，使用傳統的頻譜分析儀很難得到概括的瞭解。下面的實例展示了 MDO 混合域示波器架構的優勢。

傳統的頻譜分析儀會掃描使用者自訂的頻譜。在圖 7 所示的實例中，傳統頻譜分析儀被設定成以 20 KHz 的 RBW 掃描通過 20 MHz 的頻譜。在這些設定下，頻譜分析儀的掃描時長預設為 146 ms。在 Max Hold 軌跡（藍色軌跡）和 Normal 軌跡（黃色軌跡）中，很難從累積的或暫態的頻譜視圖中瞭解訊號的時域特性。使用傳統頻譜分析儀觀察這個訊號時域特性的唯一方式是採用零頻距模式；但是，頻譜分析儀零頻距模式下的時域頻寬受到頻譜分析儀最大解析度頻寬的限制。由於這個訊號的頻譜特性明顯超出了典型頻譜分析儀的解析度頻寬的極限（10 MHz），因此使用傳統頻譜分析儀零頻距模式並不能觀察這類訊號。此外，在

傳統頻譜分析儀中選擇零頻距模式時，訊號的頻譜視圖就無法提供了。

圖 8 是現在在 MDO4000C 混合域示波器上時域畫面和頻域畫面觀察的同一訊號。在顯示的 Max Hold 和 Normal 軌跡中，現在很明顯這個訊號不像傳統頻譜分析儀看到得那樣亂。Normal 軌跡顯示與時域畫面中顯示的頻譜時間關聯的訊號的 FFT（時域和頻域相關部分將詳細討論頻譜時間）。在頻譜分析儀的 RBW 設定下，顯示這個訊號要求的擷取時間稱為頻譜時間。這個擷取時間小於 115 us，代表著圖 7 中訊號的相同頻寬，但訊號擷取速度要快 1300 倍。

瞭解射頻訊號同時的時間和頻率視圖提供了必要的資訊，可以瞭解現代訊號特性，正確進行量測設定。在概括介紹頻譜分析儀架構時，我們將詳細討論這個實例。

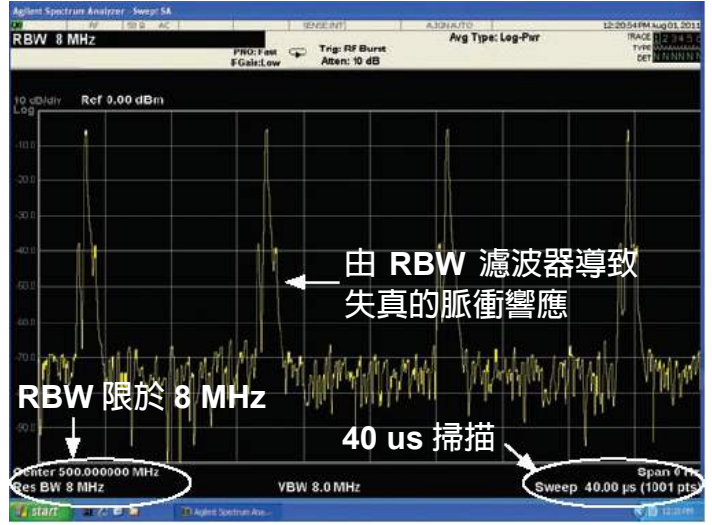
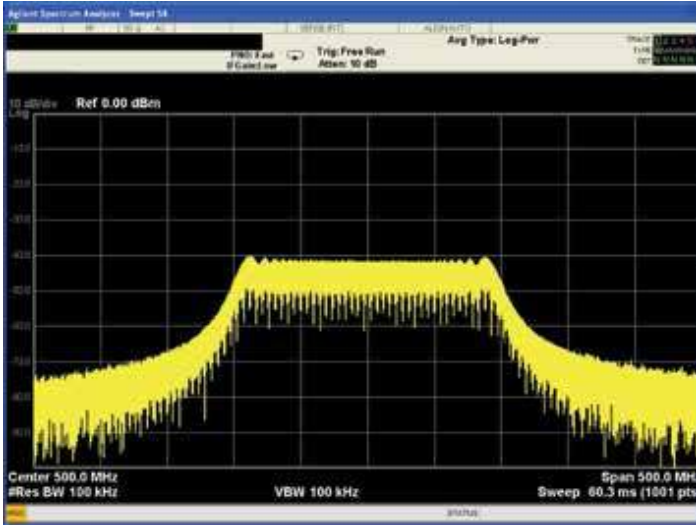


圖 9 (a/b). 顯示了寬頻脈衝訊號 (a) 在零頻距時的頻譜 (b) 其時域視圖。

射頻訊號隨時間變化的視圖

傳統頻譜分析儀的時域視圖只能分析訊號振幅隨時間變化，如前所述，傳統頻譜分析儀不能同時顯示訊號的頻譜和時域視圖。此外，傳統頻譜分析儀不能隨時顯示頻率和和相位隨時間變化。考慮到這些局限性，我們將比較 MDO 混合域示波器在觀察脈衝式訊號時與傳統頻譜分析儀的優勢，其中所使用是相對重複性、不會隨頻率變化的訊號。

圖 9 (a/b) 顯示了脈衝式訊號的頻譜和零頻距視圖。圖 9 (b) 中的零頻距畫面顯示振幅隨時間變化的時變特性。這個訊號似乎是某種脈衝式能量，工作週期約為每 10 us。

在 RBW 設定成頻譜分析儀最大值時，傳統頻譜分析儀的零頻距模式可以最好地表示訊號的時域視圖。如果訊號的上升時間比輸入訊號的 RBW 快，那麼振幅隨時間變化的畫面就是一個扭曲的表達。

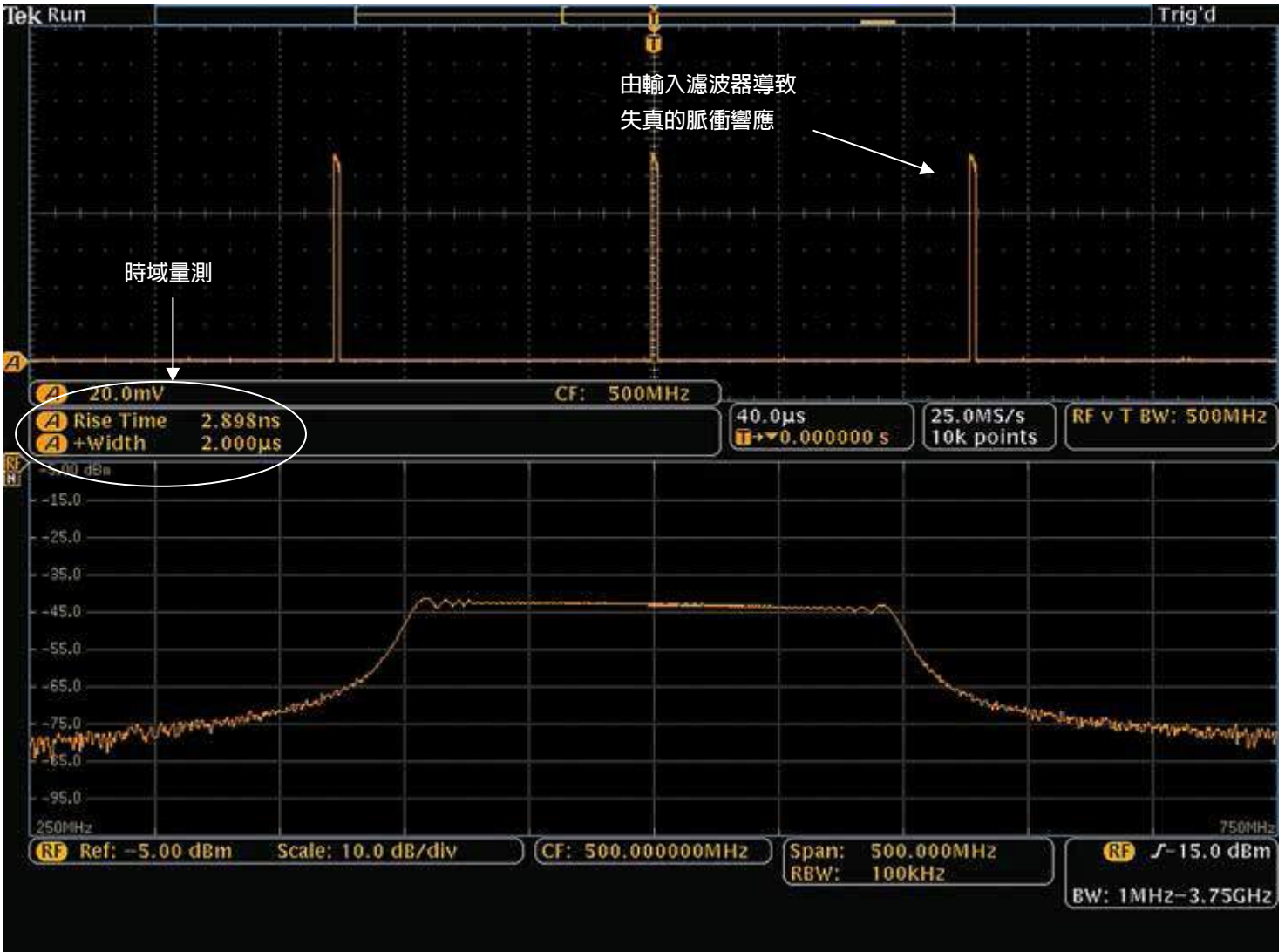


圖 10. 以時域量測的脈衝式訊號的時域和頻域視圖。

圖 10 顯示了同一訊號的時域與頻域畫面同時在 MDO4000C 混合域示波器被顯示。注意時域畫面可以立即看到振幅隨時間的變化和量測。比較圖 10 中的振幅隨時間的變化與傳統頻譜分析儀圖 9 (b) 的零頻距畫面，RBW 的限制導致的訊號失真就十分明顯了。由振幅隨時間變化軌跡中的量測得知，訊號的上升時間為 2.898 ns，脈衝時長為 1 μs。

傳統頻譜分析儀頻寬和 RBW 有限，因此不能準確地顯示或量測上升時間。MDO 不僅能夠觀察射頻訊號隨時間的變化 (包括振幅、相位和頻率隨時間的變化)，而且其架構不會像傳統頻譜分析儀導致訊號的時域軌跡失真，因為時域視圖不受儀器的 RBW 設定限制。

以時間為基礎的寬頻譜擷取頻寬擷取技術

幾十年前，當頻譜分析儀剛剛面世的時候，需要進行頻域分析的射頻訊號在時間上都是相當穩定的，而且所採用的都是簡單的窄頻調變方法，如 AM 調幅或 FM 調頻等。然而，幾十年過後，現今數位通訊的趨勢，明顯是訊號更多的是隨時間而變化的，多採用複雜的數位調變方法，並且採用了不少涉及脈衝的傳輸技術。這些調變方法還可能有非常寬的頻寬 (例如：透過採用擴頻或跳頻技術來降低 EMI 的干擾或抗干擾能力)。

爲了滿足現代量測的頻寬要求，MDO4000C 混合域示波器保證提供 1 GHz 以上的擷取頻寬。因此，在 1 GHz 及以下的頻距設定時，MDO 根本不必「掃描」畫面。頻譜從單次擷取中就能產生，其時間頻距由 RBW 設定來確定。傳統掃頻分析儀或窄頻 FFT 分析儀需要大量的時間 (掃描時間) 才能擷取到與頻距相關的頻率範圍。例如：

- 在頻距設定爲 40 MHz，RBW 設定爲 30 KHz 時：
 - MDO4000C 頻譜時間：74.3 μ s
 - 典型頻譜分析儀掃描時間：116.4 ms⁵

可以看到，MDO4000C 混合域示波器能夠擷取必要的資料，速度比頻譜分析儀快 1000 倍！這大幅改善了瞭解快速變化訊號在特定時點上頻譜內容的能力。

傳統掃頻分析儀可以更快地進行掃描，但在掃描速度提高時，其振幅或相位準確度會變差。相較之下，MDO4000C 混合域示波器將在沒有失真的情況下，在最短時間內擷取整個頻距的資料。直接提高 RBW 設定會降低擷取資料的時間頻距。我們將在下一節「時域和頻域關聯」中討論這種關係。

如果想進一步瞭解這些關係，請參閱「擷取原始射頻時域資料記錄」一節。

爲了處理這些現代應用中訊號隨時間而變化的特性，MDO 提供了一個跨域的觸發擷取系統，全面整合了時域類比、時域數位與頻域的觸發擷取系統，使用者可以在相關頻域事件發生的時刻點上，精確擷取所有目前的時域類比波形、時域數位與匯流排的時序、狀態與編碼，以及射頻通道的頻譜和訊號隨時間的變化。

值得一提的是，若需要時，可關閉頻域觸發，當頻域資料是連續的，但是與時域中所發生的事件無關的時候，這種功能非常合用。

⁵ 安捷倫 CSA

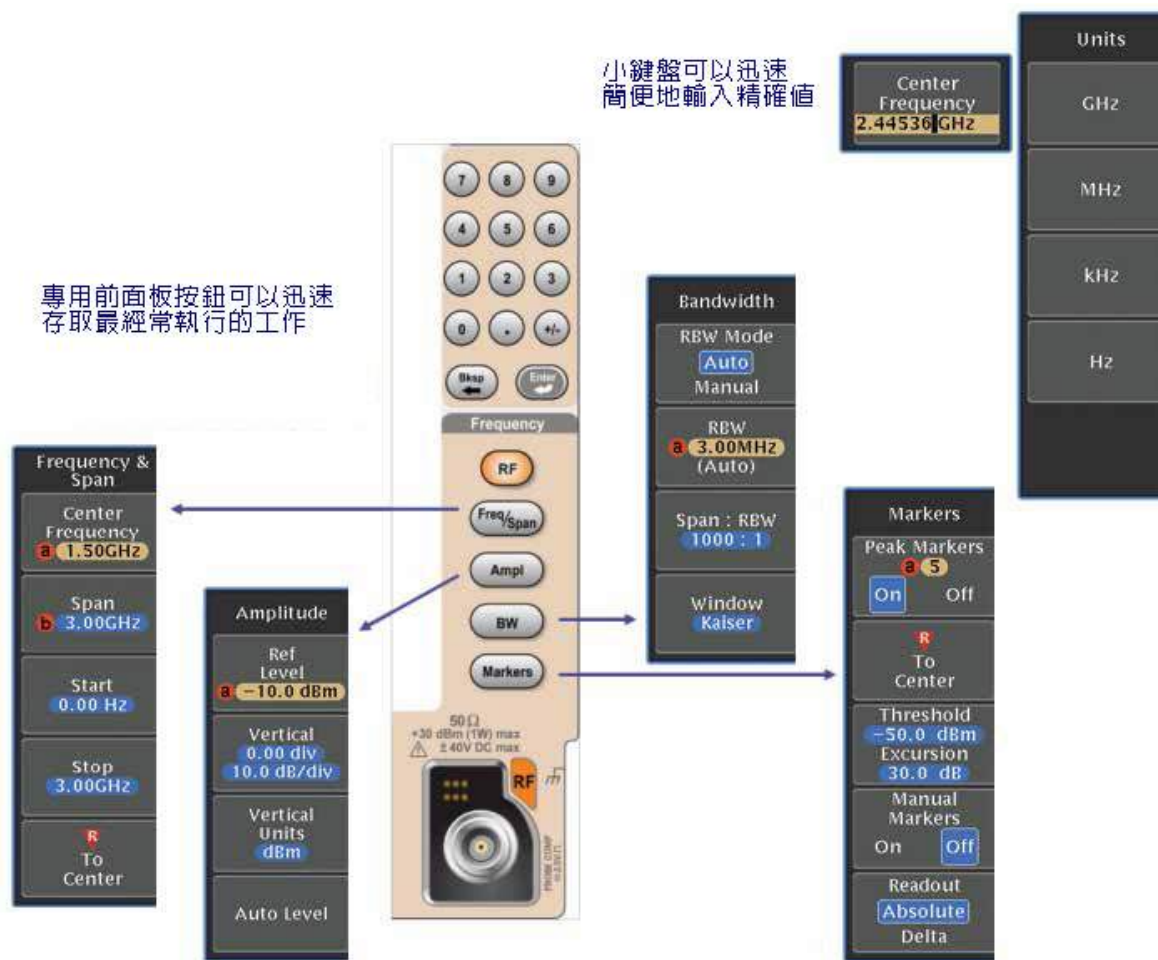


圖 11. MDO4000C 混合域示波器的前面板。

MDO4000C：強大的功能組合

如前所述，MDO4000C 混合域示波器提供了獨特的功能組合，本節將重點介紹這些功能。

應該注意的是，本節所介紹的功能是除了 MSO4000C 系列混合訊號示波器提供的全套時域量測功能以外的，專屬於 MDO4000C 混合域示波器的獨特功能。

專用頻譜使用者介面

與任何以示波器為基礎的其他頻譜分析工具不同，MDO 為進行頻譜量測提供了專用前面板旋鈕和最佳化的功能表架構。

前面板按鈕可以直接存取下述功能表：

- 射頻；用來打開頻域軌跡，控制頻譜圖畫面，定義偵測方法。

- Freq / Span；用來定義頻譜畫面的中心頻率和頻距或開始頻率和終止頻率。
- Ampl；用來設定頻譜畫面的參考位準、垂直刻度和位置以及垂直單位。
- BW；用來設定解析度頻寬和 FFT 視窗類型。
- Marker；用來打開峰值標記和手動標記，在相對標記讀數和絕對標記讀數之間變化，將參考標記移到中心，定義所謂峰值的垂直位準。

此外，可以使用數字鍵盤，簡便地輸入精確值。

顯示畫面根據需要自動管理時域和頻域視窗。射頻時域資料顯示在時域視窗中，一同顯示的還有類比或數位通道的其他時域資料。頻譜資料一直顯示在獨立的頻域視窗中。



圖 12. MDO4000C 混合域示波器的顯示要素

這個螢幕擷取畫面顯示了下列要素：

1. **時域軌跡**：「Normal」示波器軌跡。在本例中，黃色軌跡（通道 1）是控制跳頻的訊號（作為觸發源使用），藍色軌跡（通道 2）是用於改變振盪器頻率的 SPI 序列匯流排資料。
2. **射頻時域軌跡**：這是一個專用時域軌跡，是從頻譜分析儀輸入中導出，允許使用者觀察射頻訊號振幅、相位或頻率隨時間變化的情況。橙色軌跡「f」顯示了頻率隨時間的變化，刻度為 5.00 MHz/division。所有射頻時域軌跡都是從為射頻通道擷取的時域 IQ 資料中導出。這些軌跡與其他類比通道和數位通道相關，代表連續的時域資料串。如需進一步瞭解如何計算和顯示這些射頻時域軌跡，請參閱「產生射頻時域資料」。

3. **頻譜軌跡**：典型頻譜分析儀軌跡。與傳統頻譜分析儀軌跡一樣，可以觀察不同的軌跡類型：Max Hold、Average、Normal 和 Min Hold。如需更多資訊，請參閱「頻譜軌跡」一節。
4. **頻譜時間指標**：表示頻譜擷取發生的時點位置。這個軌跡是從單次的擷取中導出，代表了一連續的時域資料串，這時域資料串與其他時域類比和時域數位通道所擷取的時局，在時間上是關聯的。
5. **峰值標記**：自動給出峰值的頻率和振幅讀數。如需更多資訊，請參閱「標記」一節。
6. **頻域設定**：關鍵頻域參數讀數，包括 Ref Level、中心頻率、頻距和 RBW 設定。
7. **觸發設定**：關鍵觸發參數讀數。如需更多資訊，請參閱「觸發」一節。

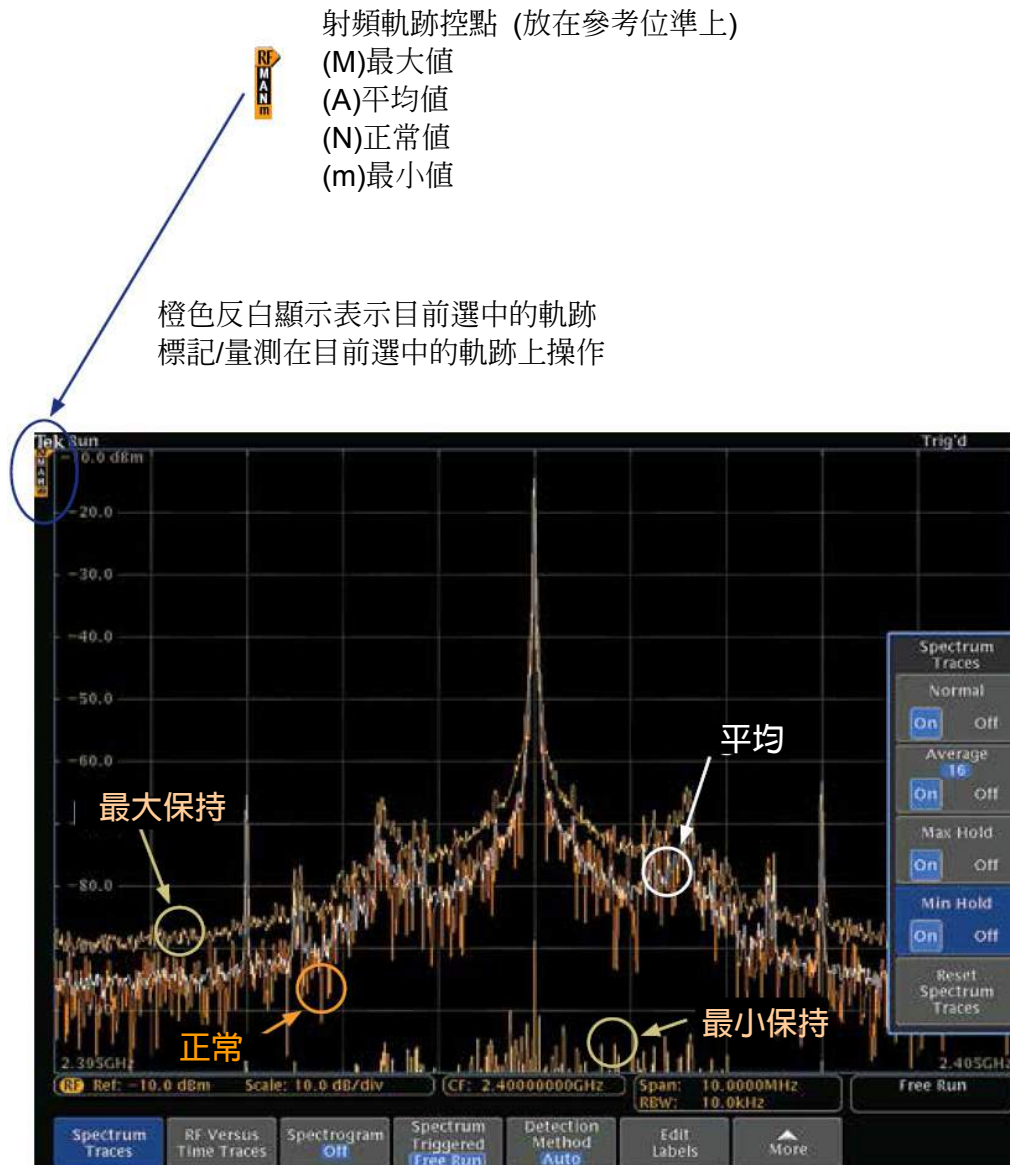


圖 13. 頻譜軌跡。

頻譜軌跡

頻域視窗支援四種頻譜軌跡，包括：

- 正常：每次新擷取都會替換「正常」軌跡。
- 平均：「平均」軌跡代表最後 N 個「正常」軌跡的平均值。
- 最大保持：多次擷取累積的「正常」軌跡中的最大資料值。
- 最小保持：多次擷取累積的「正常」軌跡中的最小資料值。

每個軌跡都可以獨立打開和關閉，也可以同時顯示全部四條軌跡。

圖 13 顯示了量測 CW 訊號的四個軌跡。標記和量測可以參考任何軌跡，因此可以使用射頻軌跡控點表示軌跡參考源。

在擷取參數變化時，Max Hold、Min Hold 和 Average 軌跡自動重設，消除了使用不同擷取設定獲得的多個軌跡合成時產生的畫面混淆問題。

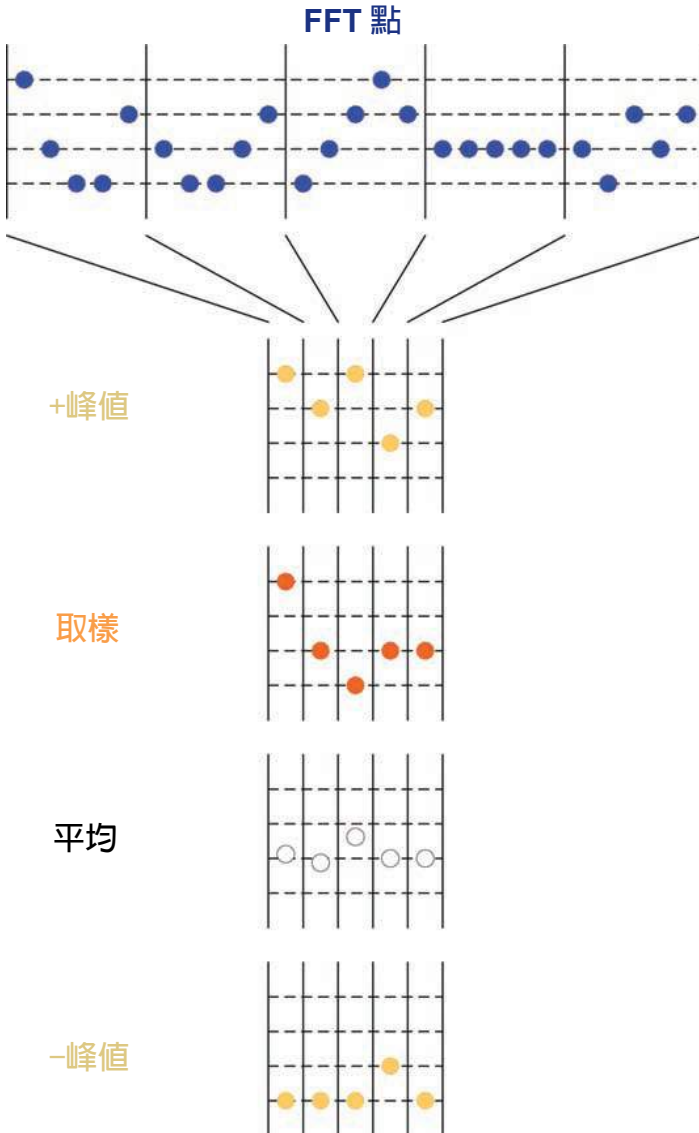


圖 14. 建立頻譜軌跡使用的偵測方法。

偵測器

偵測器在輸入訊號分析和量測及軌跡產生中發揮著重要作用。有四種基本偵測方法：**+峰值**、**平均**、**取樣**和 **-峰值**。與傳統頻譜分析儀不同，MDO 的頻譜軌跡取決於所擷取的射頻訊號的時間樣本資料，再進行 FFT 計算而得出。向量訊號分析儀一般會採用兩種取樣類型。取樣率的資料抽取量會保持剛好可支援所需頻距的足夠取樣點，且 FFT 的資料抽取量會移除可能使顯示畫面雜亂的多餘資料。由於 FFT 的大小可能達到 2,000,000 點，MDO4000C 會在計算 FFT 之前，使用程序來減少或抽取的取樣資料量。

MDO4000C 混合域示波器可以在任何地方執行 1000 點到 ~ 2,000,000 點的 FFT 計算，具體位置視擷取的頻距和解析度頻寬設定而定。偵測方法用來確定如何將 1000-2,000,000 點 FFT 輸出壓縮到 1,000 像素寬的畫面上。壓縮因數決定著每組資料壓縮中使用多少個資料樣點。壓縮工作方式如下：

- **+峰值 (+Peak)** – 使用一組 FFT 資料中振幅最高的點
- **取樣 (Sample)** – 使用每組中第一個點。
- **平均 (Average)** – 平均一組中所有點。
- **-峰值 (-Peak)** – 使用一組 FFT 資料中振幅最低的點。

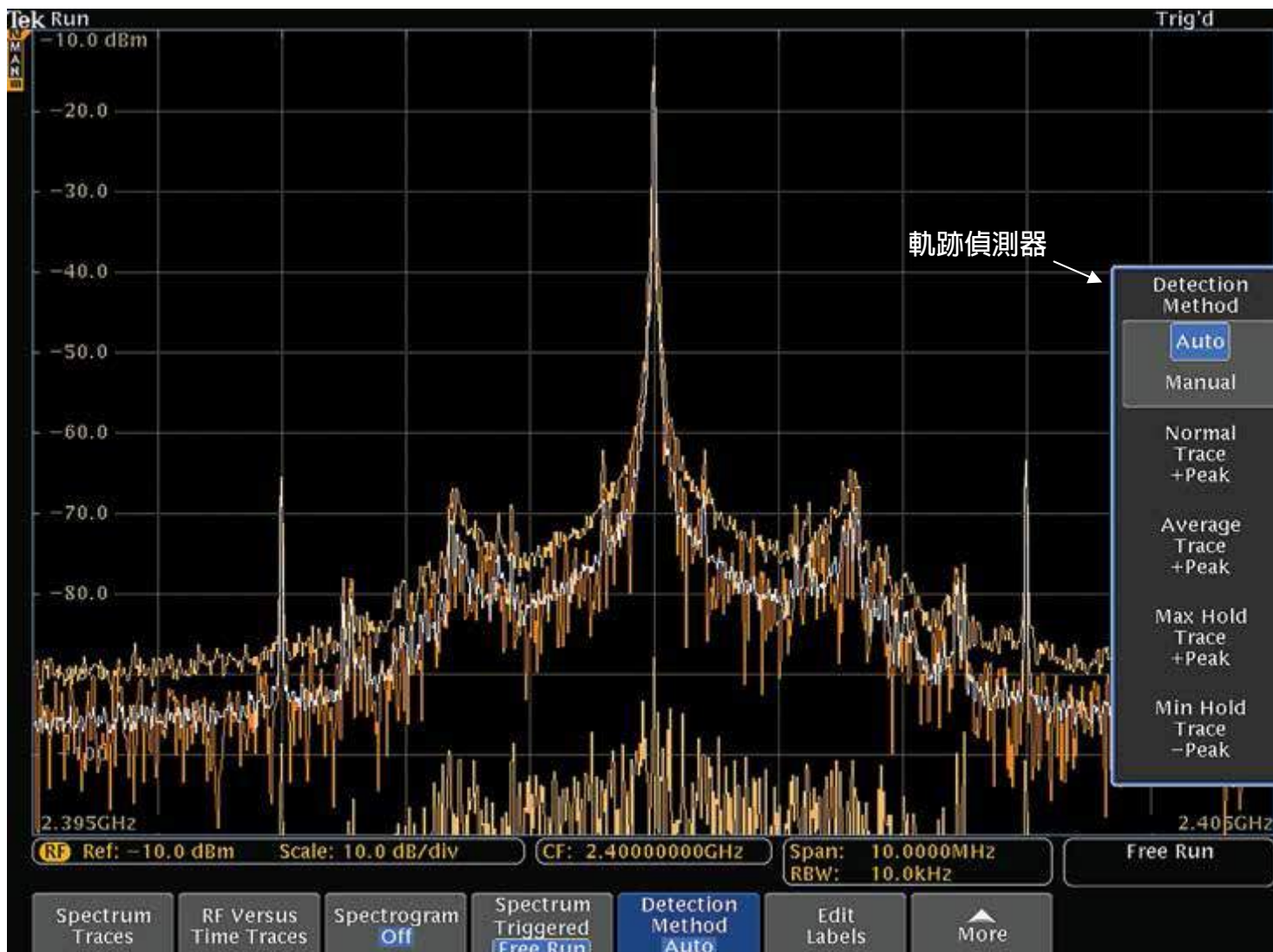


圖 15. 偵測方法的控制。

MDO4000B 混合域示波器可以靈活地手動控制偵測方法，但應該注意的是，每個軌跡都有設定的預設值，具體視射頻量測是打開還是關閉 (如需詳細資訊，請參閱「射頻量測」一節)。

在射頻量測關閉時，每個軌跡預設的偵測器如下：

- Normal: +Peak
- Average: +Peak
- Max Hold: +Peak
- Min Hold: -Peak

在射頻量測打開時，每個軌跡預設的偵測器如下：

- Normal: Average
- Average: Average
- Max Hold: Average

- Min Hold: Average

在所有情況下，使用者在需要時都可以使用手動控制功能。

射頻時域軌跡

除所有普通類比通道和數位通道外，時域視窗還支援三種射頻時域軌跡，這些軌跡從頻譜分析儀輸入的底層時域 IQ 資料中導出，可以分析射頻訊號的關鍵參數，包括：

- **Amplitude (振幅)**；輸入訊號在現今頻率範圍 (由中心頻率和頻距設定所確定) 經過帶通濾波後的暫態振幅。
- **Frequency (頻率)**；輸入訊號相對於中心頻率的暫態頻率。
- **Phase (相位)**；輸入訊號相對於中心頻率的暫態相位。

每個軌跡都可以獨立打開和關閉，可以同時顯示三個軌跡。

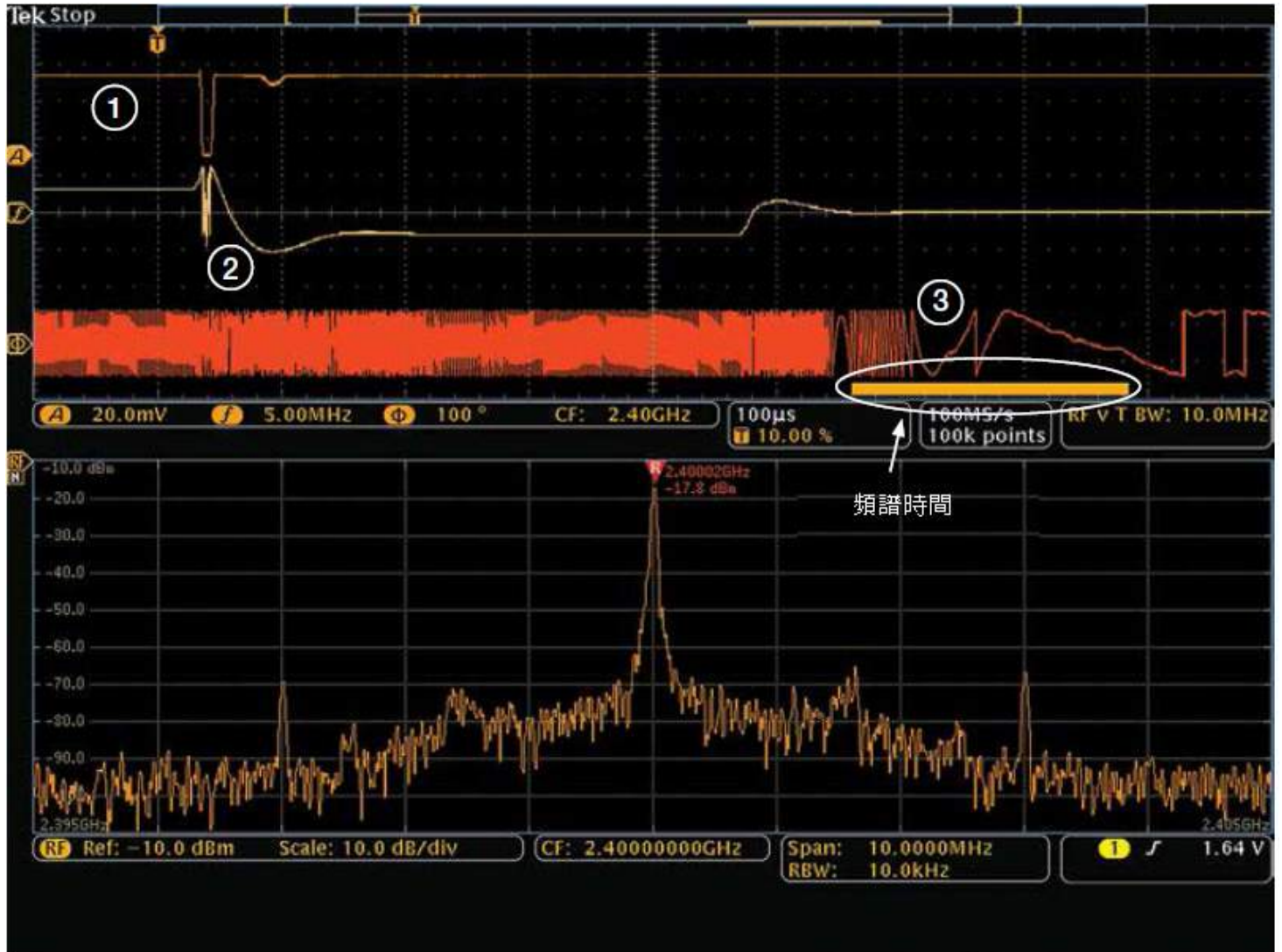


圖 16. 射頻時域軌跡。

圖 16 螢幕擷取畫面 (附頻率振鈴的跳頻訊號) 中顯示了下列幾種軌跡：

1. **振幅隨時間變化的軌跡**：注意在訊號在不同頻率之間跳動時，振幅基本不變。
2. **頻率隨時間變化的軌跡**：縱軸是相對於中心頻率的頻率。訊號從低於中心頻率的頻率 (螢幕左邊邊緣上的訊號) 跳到約略位於中心頻率的頻率，再跳到高於中心頻率的頻率。注意使用這個軌跡，可以很容易看到訊號在不同頻率之間跳動時出現嚴重的頻率振鈴。

3. **相位隨時間變化的軌跡**：縱軸是相位，以大約 $\pm 180^\circ$ 包起。注意中間跳頻與中心頻率之間略微不匹配，因此在跳頻期間，相對於中心頻率的相位緩慢變化。為分析相位隨時間變化，最好在待測裝置與 MDO 之間採用鎖相參考。在餘下的跳頻期間，頻率不匹配非常大，相位變化以實心條顯示。

所有這些軌跡都是從頻譜分析儀輸入所擷取的時域 IQ 資料中導出，與其他類比通道和數位通道所擷取的資料具有時間關聯，也代表了這個射頻訊號在時域的連續資料串。

如需進一步瞭解如何計算和顯示這些射頻時域軌跡，請參閱「產生射頻時域資料」。



圖 17. 頻譜時間指標

時域和頻域關聯

如前所述，所有時域資料和頻域資料都時間關聯。所有類比通道、數位通道和射頻時域軌跡都一起顯示在上方的時域視窗中。與任何 MSO/DPO 系列示波器一樣，這些軌跡在時間上都是關聯的，可以使用 Wave Inspector 多功能標記、量測和游標等進行分析。

我們在畫面中增加了一個新的指標，表示產生頻譜畫面使用的資料的時間位置。這個橙色條稱為頻譜時間指標，在圖 17 的螢幕擷取畫面中的時域視窗底部可以看到這個指標：

從頻率隨時間變化軌跡（時域視窗中的橙色軌跡「f」）中可以看到，這是圖 16 射頻時域軌跡中顯示的相同的跳頻訊號。

請注意下面幾點：

- 在頻率隨時間變化畫面和頻譜畫面中可以清楚地看到訊號從一個頻率跳到另一個頻率時的頻率振鈴，兩個圈選的軌跡段反白顯示這一點。
- 在頻譜時間上（用橙色條顯示），訊號在大多數時間位於最低頻率。在 1 處可以看出這一點，其在 4 處導致了一個高振幅峰值。
- 訊號位於中間頻率（接近中心頻率）的時間最短（由於振鈴）。在 2 處可以看出這一點，其在 5 處導致了一個低振幅峰值（超過振鈴看不到）。
- 訊號有相當一部分時間位於最低頻率點。這在 3 處可以看出這一點，其在 6 處導致了一個中等振幅的峰值。另外注意，在這個頻率上沒有表現出任何振鈴。這是因為訊號進入頻譜時間區間後開始變得穩定。由中頻跳變到高頻所引起的相關振鈴超出了頻譜時間的範圍。

應用摘要

當我們比對圖 16 與圖 17，我們會發現圖 16 的時基比圖 17 的時基要快 10 倍 (由 2 ms/div 加快到 200 us/div)。這是一個快得多的跳頻訊號。在圖 17 中，RBW 是 2 KHz，頻譜時間比任何一個頻率點上所停留的時間都要長。希望看到某一個跳頻點上的頻譜，必須更寬的解析度頻寬來縮短總體的擷取時間。

Wave Inspector 旋鈕控制著頻譜時間 (用橙色條表示) 相對於其他時域軌跡的位置：

- 頻譜時間的預設位置在時域視窗中心。
- 在啟動縮放功能時，頻譜會隨縮放視窗調整。
- 在關閉縮放功能時，如上圖所示，可以使用捲動旋鈕，移動頻譜時間的相對位置。

頻譜時間指標有助於精確量測暫態和短時長射頻訊號的功率。透過保證訊號在整個頻譜時間中是穩定的，在頻譜畫面上的振幅將是準確的。這個可以在時域視窗中簡便地被驗證。

本應用摘要附錄 A 中更詳細地闡述了 RBW 與 FFT 視窗函數的關係。

觸發

由於 MDO4000C 混合域示波器將頻譜分析儀整合到以時域為基礎的擷取系統中，因此整個擷取過程可以啟動於一個被滿足的跨域觸發條件。在上面的實例中，跳頻訊號在畫面中是穩定的，因為示波器是由跳頻的控制訊號所觸發的 (黃色軌跡 CH1 上的窄脈衝，圖 17 中頻譜時間指標)。

頻譜分析儀選配為 MDO4000C 系列觸發系統中增加了下述功能：

- 能夠在降頻後，根據頻譜分析儀輸入的整體功率位準進行邊緣觸發 (如需詳細資訊，請參閱下面的「模組降頻」)。
- 能夠在下面的觸發類型中使用頻譜分析儀輸入作為觸發源：
 - 邊緣
 - 順序 (B 觸發)
 - 脈衝寬度
 - 矮波脈衝
 - 邏輯，結合其他類比和數位輸入



圖 18. 頻譜瀑布圖。

頻譜瀑布圖

MDO4000C 混合域示波器提供了頻譜瀑布圖畫面。這個畫面可以提供以相對較低速率改變頻率的射頻訊號中有關頻率隨時間變化的重要資訊。

頻譜瀑布圖是一系列「被垂直豎立起來」的頻譜軌跡「片段」的堆疊，並使用顏色對應訊號的振幅進行編碼。在單獨的「片段」中，若訊號振幅低時，用藍色來表示，在訊號振幅高時，用紅色來表示。然後，將這些「片段」都垂直被堆疊起來，最新的頻譜位於頻譜圖的底部。如需進一步瞭解這一畫面是怎樣產生的，請參閱「產生頻譜圖」。

的頻譜位於頻譜圖的底部。如需進一步瞭解這一畫面是如何產生的，請參閱「產生頻譜圖」。

圖 18 螢幕擷取畫面顯示頻譜瀑布圖的畫面。

請注意，即使沒有任何一個頻譜軌跡顯示所有跳頻，但頻譜瀑布圖仍清楚地表達了訊號的跳頻特性。一旦停止擷取，透過捲動所擷取的頻譜軌跡資料歷史記錄，可以檢視以前發生的頻譜。

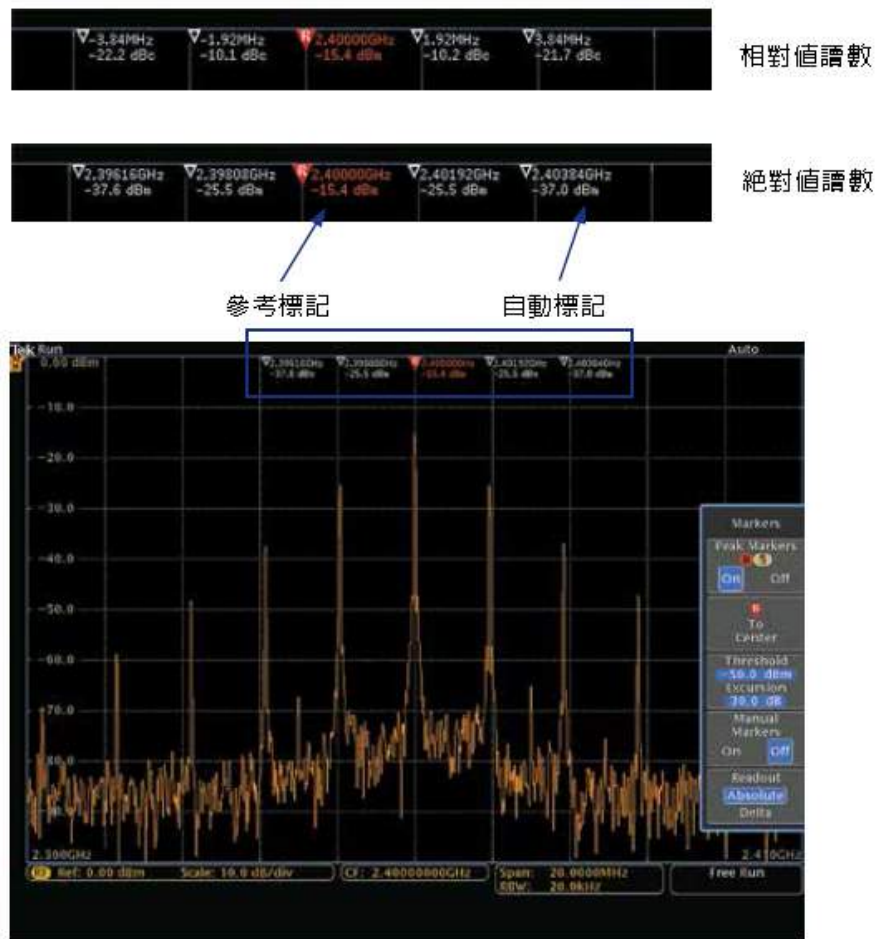


圖 19. 自動峰值標記。

標記

MDO4000C 混合域示波器同時利用頻譜分析儀和示波器的最佳模式，讓您能在頻域視窗中執行標記功能。

利用 Tektronix MSO/DPO 系列示波器強大的搜尋功能，提供自動峰值標記功能。這種功能在預設情況下打開，不僅自動識別單個最高峰值，還識別滿足使用者指定標準的另外 10 個峰值，如圖 19 所示。

「參考標記」自動設定成最高峰值。參考標記在圖 19 螢幕擷取畫面中用紅色表示，之後的四個標記自動設定成後面四個次高峰值。使用者可設定最高 11 個標記。

峰值讀數可以設定成絕對值或增量 (相對值)。在設定為相對值時，其相對於參考標記測得。

在提供相同資料前提下，我們將 MDO4000C 混合域示波器的標記功能與傳統的頻譜分析儀的操作做一下比較：在傳統的頻譜分析儀上，您需要

- 打開標記。
- 使用標記到峰值瀏覽控制功能 (如有)，移動到相對應的峰值。
- 對其他標記重複這一過程。

另外注意峰值標記會持續自動更新。如果訊號頻率變化，峰值標記會一直附著在峰值上。這與某些頻譜分析儀上的追蹤功能類似，但同時適用於所有峰值標記。

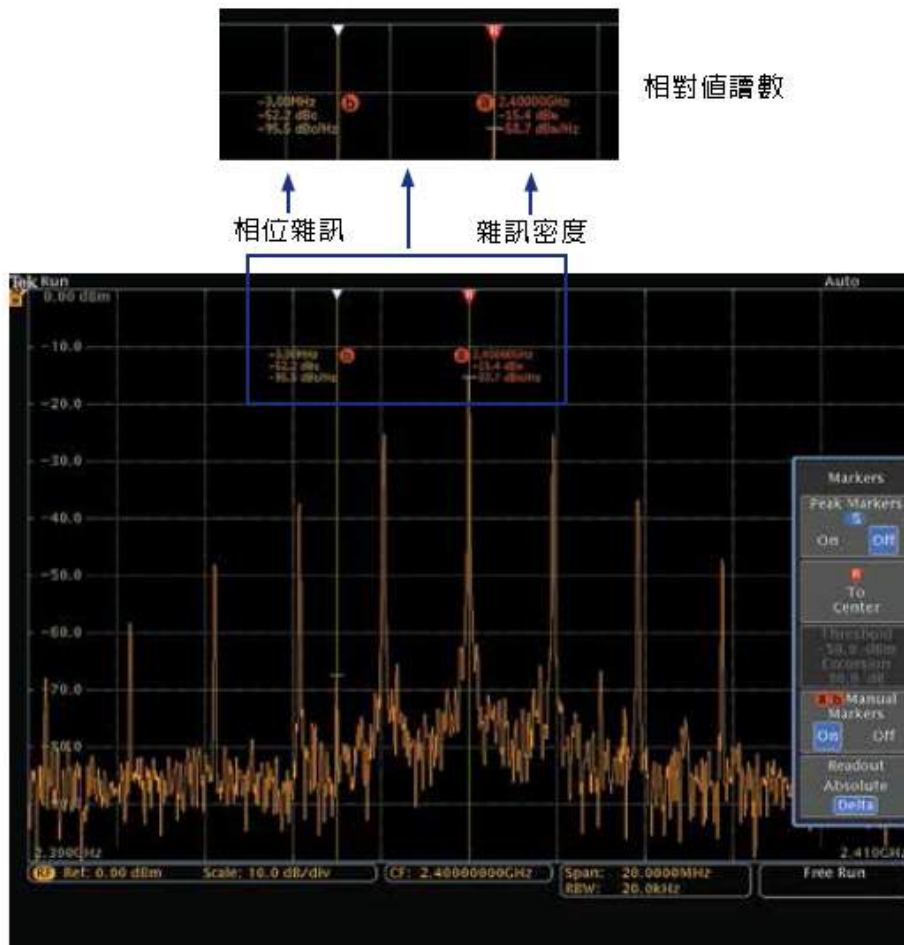


圖 20. 手動標記

透過增加手動標記，使用者可以手動量測偏離訊號峰值的頻譜內容。圖 20 說明這一功能。

注意已經打開兩個手動標記。參考標記自動變成 **a** 標記。

與峰值標記一樣，手動標記可以讀出絕對值資料或增量資料。在這個螢幕擷取畫面中，其設定成相對值。注意參考標記振幅為正的峰值讀數，量測的是頻譜振幅相對較低的部分。

此外，**a** 標記和 **b** 標記都為進行雜訊密度量測 (絕對值讀數) 和相位雜訊量測 (相對值讀數) 提供了頻譜密度讀數。

提供了 Marker to Center 功能，以調整中心頻率，將參考標記帶到螢幕中心。

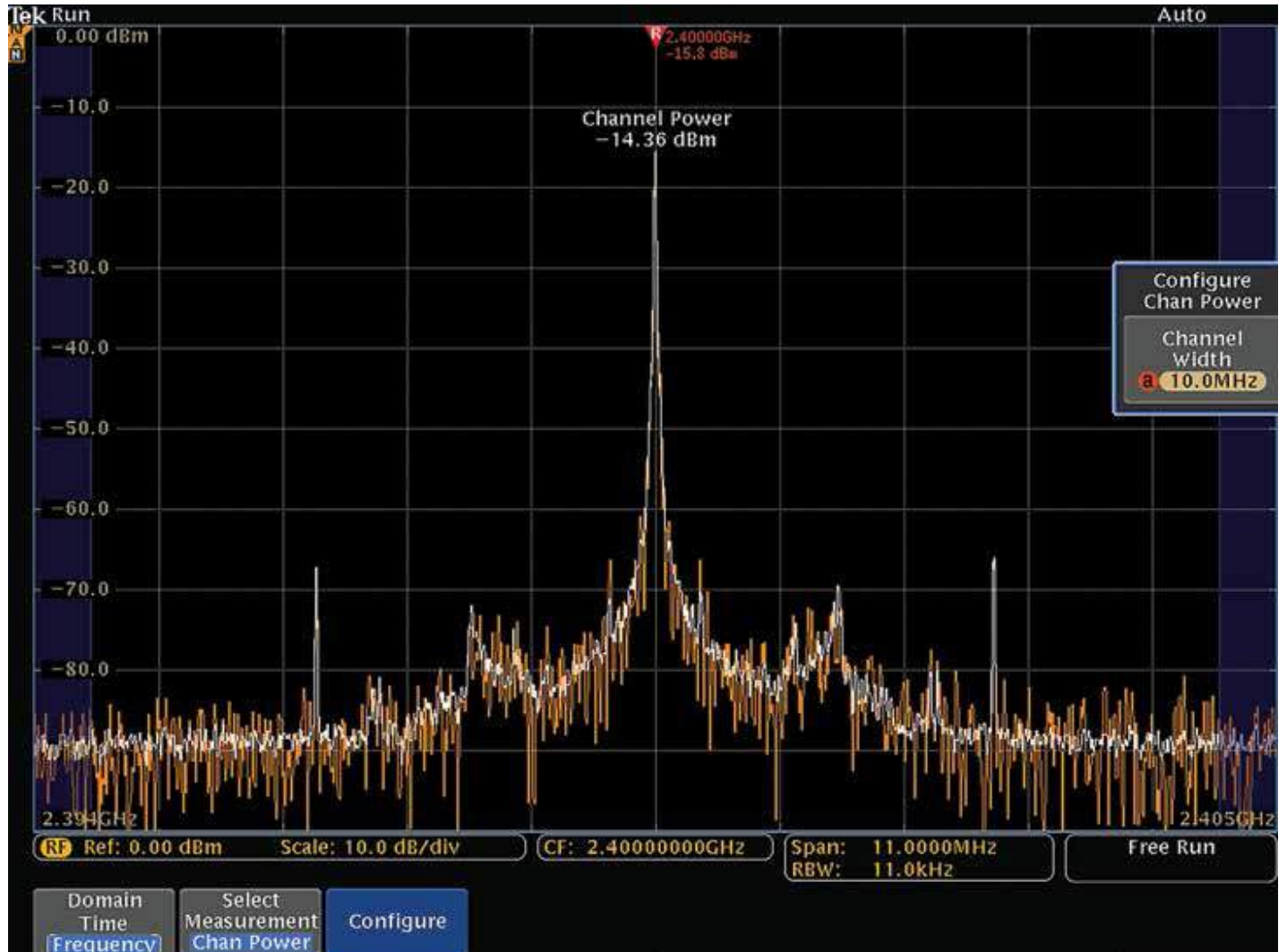


圖 21. 通道功率量測。

射頻量測

MDO4000 混合域示波器支援大量的專用射頻量測，包括通道功率、鄰道功率比和佔用頻寬量測。

通道功率

通道功率能夠在使用者定義的頻寬範圍內量測總功率。圖 21 畫面中不帶陰影的部分表示通道寬度。在這一量測啟動時，頻距自動設定成比通道寬度寬 10%。

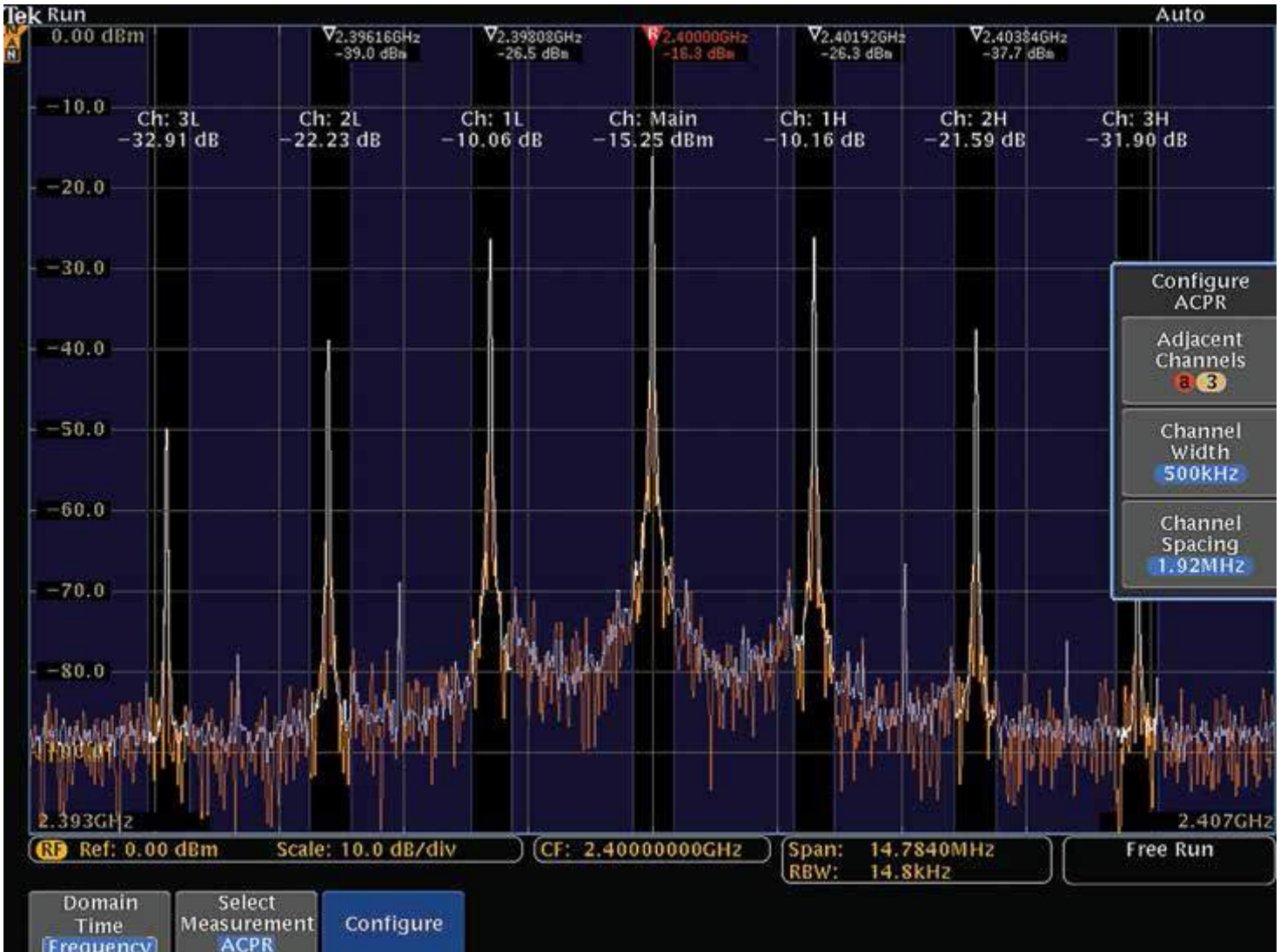


圖 22. ACPR 量測。

鄰道功率比

鄰道功率比 (ACPR) 量測返回主通道中的功率及通道功率與主通道相鄰的上方通道和下方通道的主功率之比。

使用者可以定義通道，用畫面中不帶陰影的部分表示通道。在這一量測啟動時，頻距自動設定成比擷取所有通道要求的頻距大 10%。

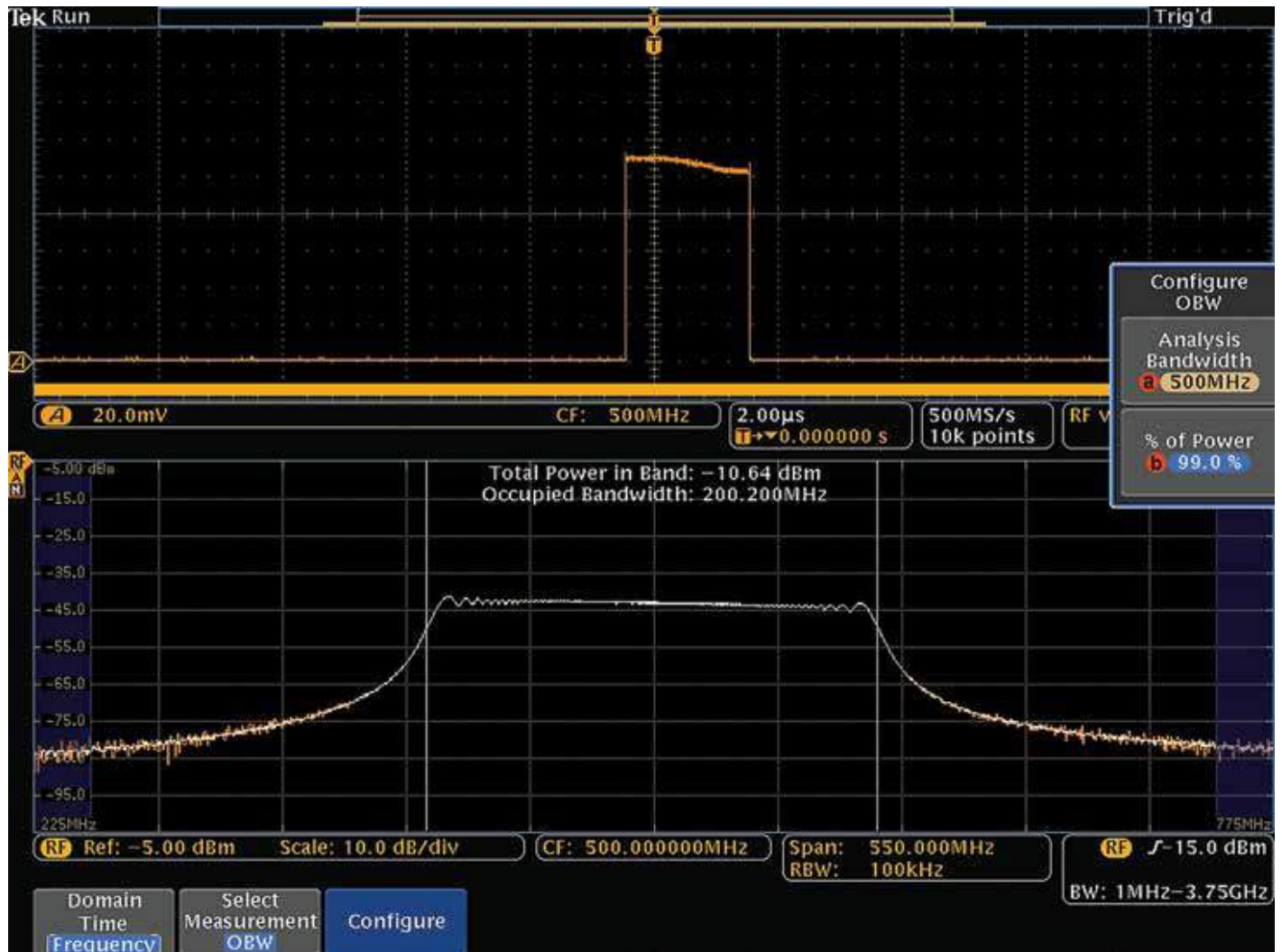


圖 23. OBW 量測。

佔用頻寬

佔用頻寬或 OBW 能夠量測使用者定義的分析頻寬內包含指定功率百分比的頻寬。

在 OBW 量測啟動時，頻距自動設定成比分析頻寬寬 10%，分析頻寬用頻譜畫面中不帶陰影的部分表明。

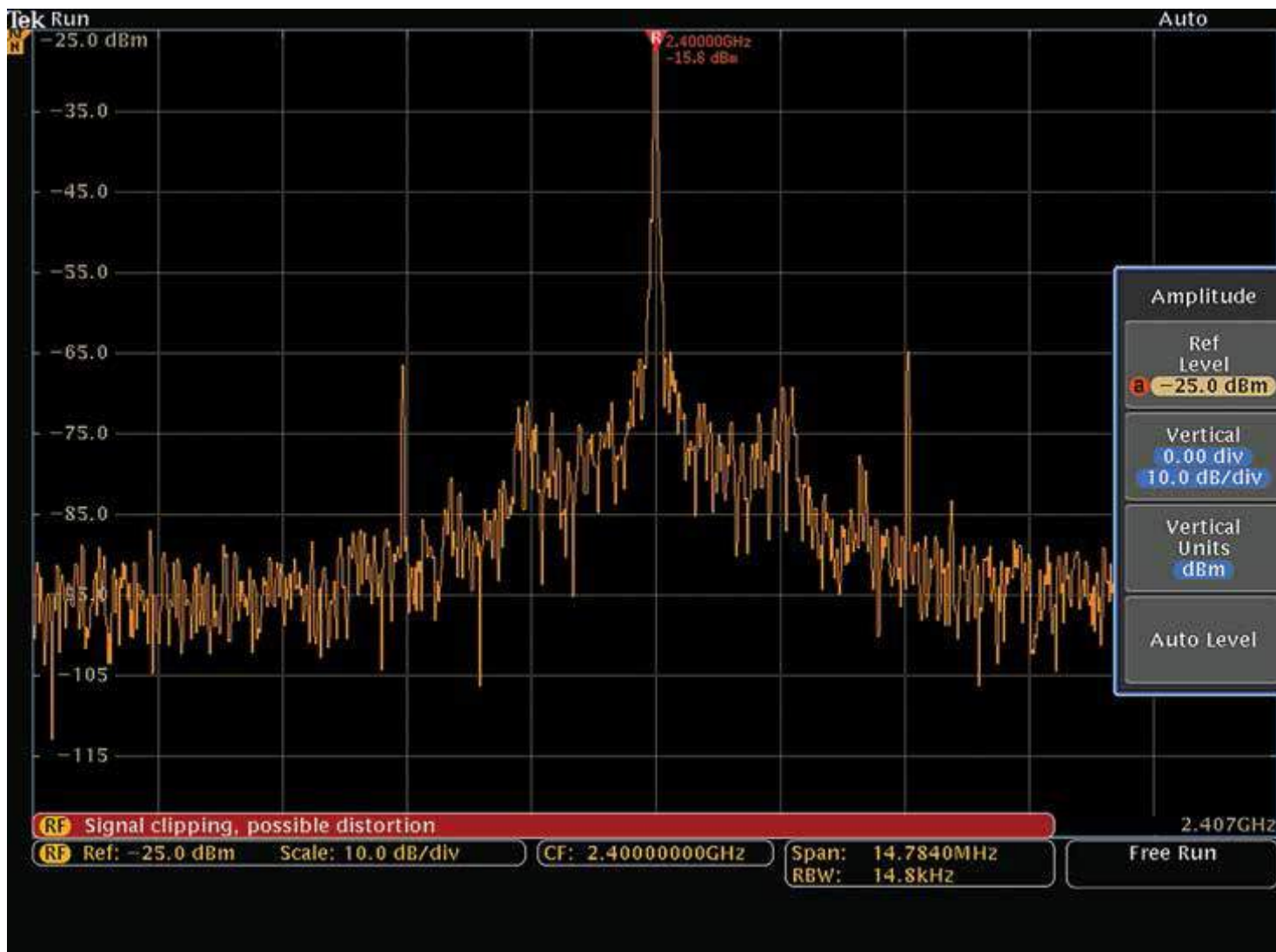


圖 24. 限幅指標。

限幅指標

由於頻譜分析儀上的畫面顯示了多個頻率上的功率位準，因此很難區分什麼時候擷取系統會限幅、進而導致失真。搜尋超過參考位準的峰值，並不足以偵測到這一情況，因為每個峰值只包含模數轉換器 (ADC) 看到的部分功率。多個峰值匯聚在一起，可能會導致模數轉換限幅，即使沒有任何一個峰值超過參考位準。

由於 MDO4000C 混合域示波器採用以示波器為基礎的擷取架構，因此在頻譜分析儀輸入上可以簡便地提供一個限幅指標。該儀器搜尋模數轉換器上的任何限幅，在偵測到時表示可能發生的失真。

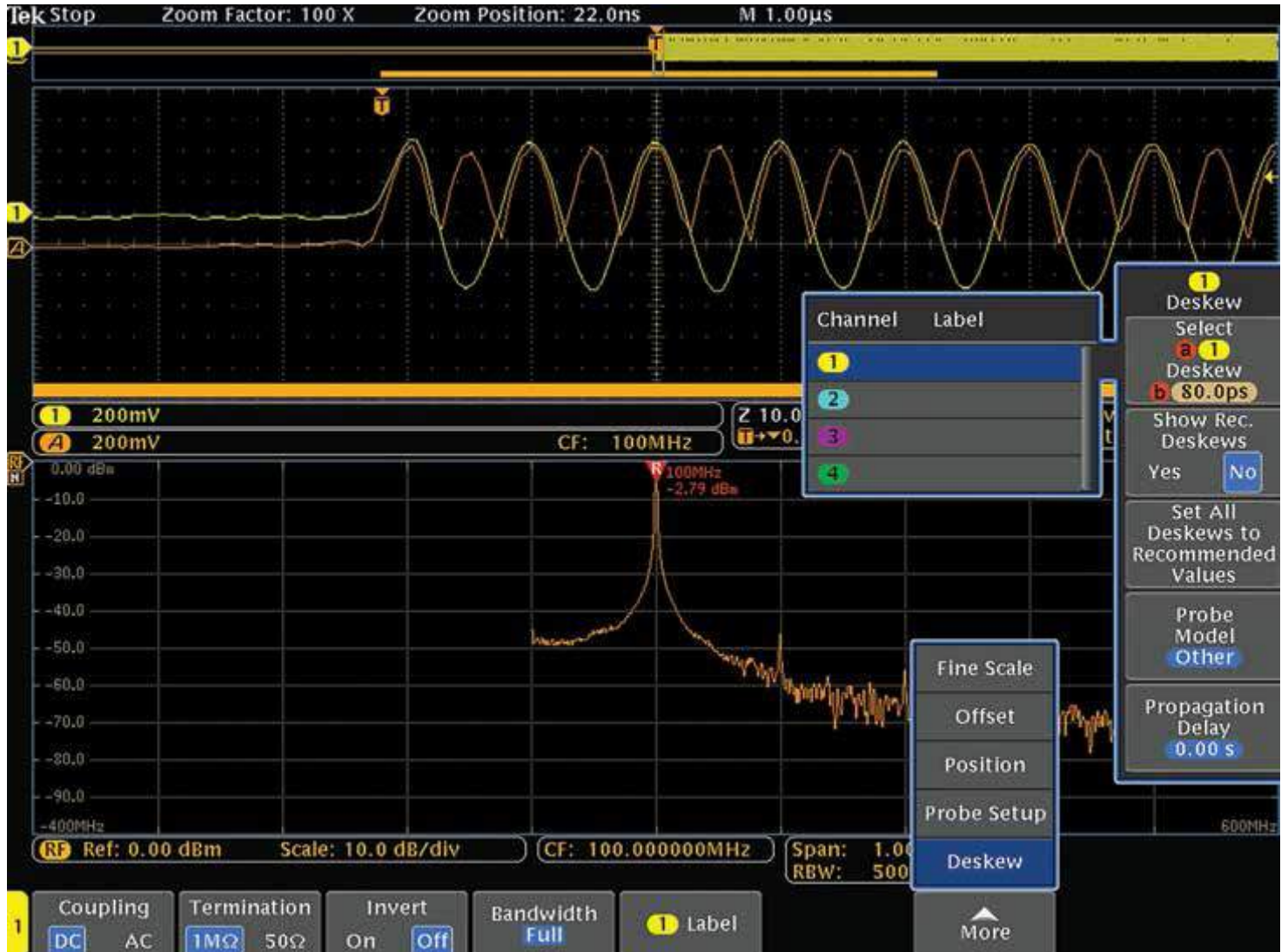


圖 25. 射頻到類比通道偏移校正。

射頻到類比通道對準

在 RF to Analog Channel Skew (射頻到類比通道的偏移) 指定數值遠低於 5 ns 時，MDO4000C 混合域示波器允許使用者在射

頻通道與任意類比通道之間執行偏移校正調整，以更精確地進行對準。

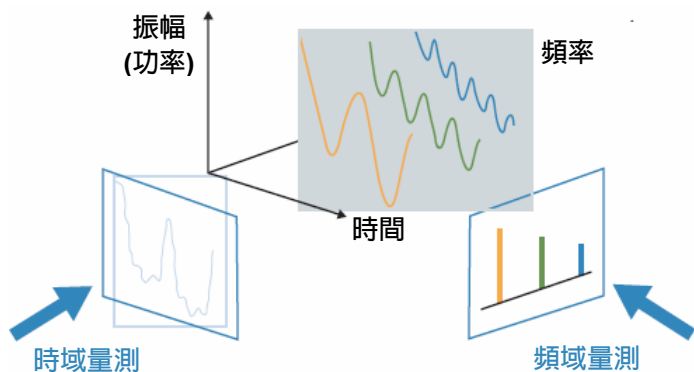


圖 26. 時域和頻域。

頻譜分析基礎

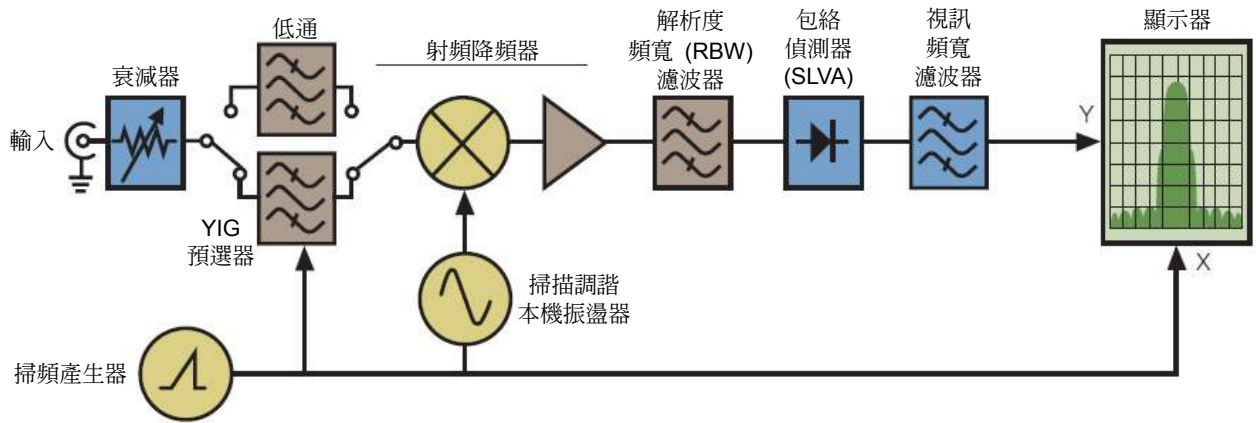
如圖 26 所示，可以在時域或頻域中觀察訊號。

在時域中，傳統上示波器被作為觀測振幅隨時間變化的儀器。在頻域中，傳統上頻譜分析儀被作為觀測振幅隨頻率變化的儀器。

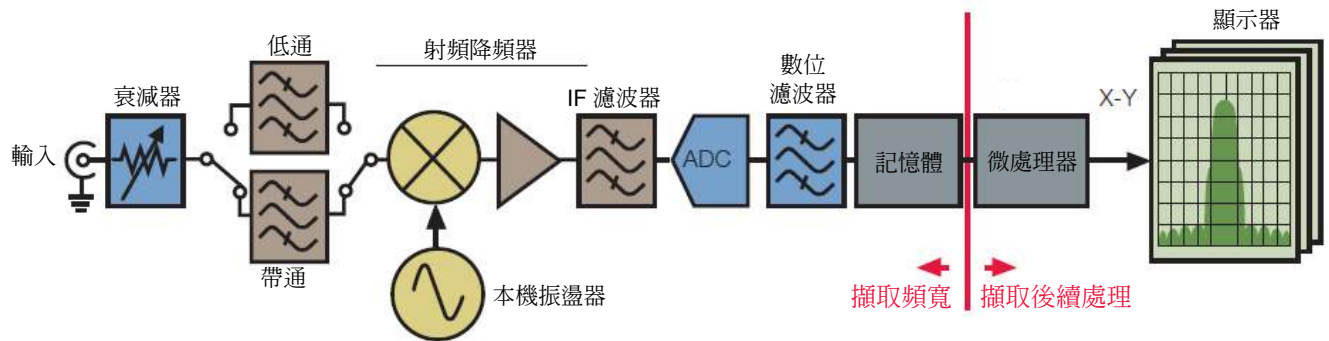
我們可以看出，在這兩種情況下，訊號是相同的。時域訊號是大量離散的正弦波的複合體，每個正弦波都有自己的振幅和相對相位。頻譜分析儀中顯示的「頻譜」只是簡單地將訊號分解成構成的頻率成分。

第三章：深入瞭解相關知識

為了提供上述功能，MDO4000C 混合域示波器擁有獨特的架構，傳統頻譜分析儀或示波器使用者可能並不熟悉這一架構。本章將闡述 MDO4000C 混合域示波器的技術基礎。



a) 掃描調諧頻譜分析儀 (SA)



b) 向量訊號分析儀 (VSA)

圖 27. 頻譜分析儀架構概況：(a) 掃頻分析儀；(b) 向量訊號分析儀。

圖 27 (a) 是傳統掃頻分析儀簡化的區塊圖。

掃頻超外差式頻譜分析儀，是幾十年前第一次使得工程師能夠進行頻域量測的傳統架構。頻譜分析儀最初是使用純類比裝置構建的，之後與所應對的應用一起不斷演變。現今一代頻譜分析儀包括各種數位元件，如 ADC、DSP 和微處理器。但是，基本掃描方法仍大體相同，最適合觀察受控的靜態訊號。掃頻式頻譜分析儀透過降頻器所輸入的射頻訊號，在解析度頻寬 (RBW) 濾波器的通帶範圍內掃描，來量測功率隨頻率的變化。RBW 濾波器後面有一個偵測器，偵測器計算選定頻距中每個頻率點上的振幅。儘管這種方法可以提供高動態範圍，但其缺點是每一次只能計算

一個頻率點的振幅資料。這種方法基於的假設是，分析儀在完成至少一次掃描的時間內，待測訊號在此其間沒有明顯的變化。結果，量測只對相對穩定不變的輸入訊號有效。如果訊號快速變化，那麼在統計概率上說，部分變化極可能會被遺漏。

本應用摘要前面的「同時的時域和頻域視圖」簡單討論了這些局限性。在該節中，圖 7 討論了由於不能同時看到時域和頻域視圖，而給正確瞭解隨時間變化的訊號帶來的限制。本節將進一步考察為什麼傳統頻譜分析儀和向量訊號分析儀會以不同方式觀察隨時間變化的快速訊號。

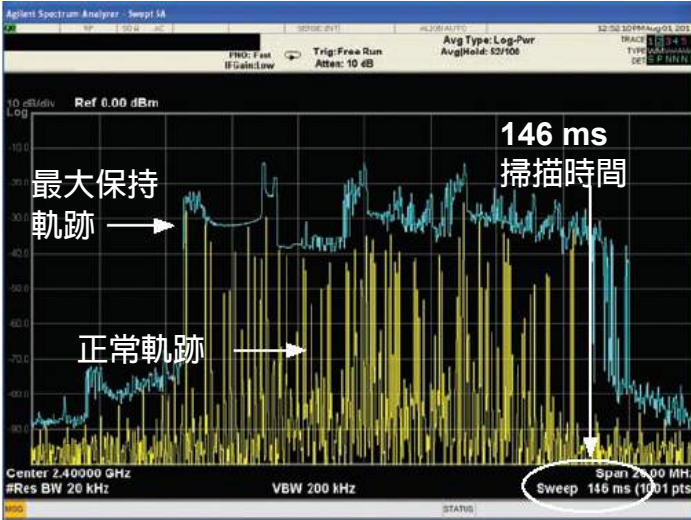


圖 28. 頻譜分析儀以 20 KHz RBW 量測 20 MHz 頻譜中的訊號。

傳統頻譜分析儀掃描通過預定義的頻帶。在圖 28 所示的實例中，傳統頻譜分析儀設定成以 20 KHz RBW 掃描通過 20 MHz 的頻譜。預設掃描時長為 146 ms，我們打開 Max Hold 軌跡（藍色軌跡）和 Normal 軌跡（黃色軌跡），觀察頻譜回應。

圖 29 是在 MDO4000C 上使用時域畫面和頻域畫面觀察的相同的訊號。在顯示 Max Hold 軌跡和 Normal 軌跡時，訊號 Normal 軌跡顯示的訊號看上去要乾淨得多。Normal 軌跡顯示了隨時間變化的訊號非常簡短的部分的 FFT。在 20 KHz RBW 下，頻譜時間不到 115 μ s。

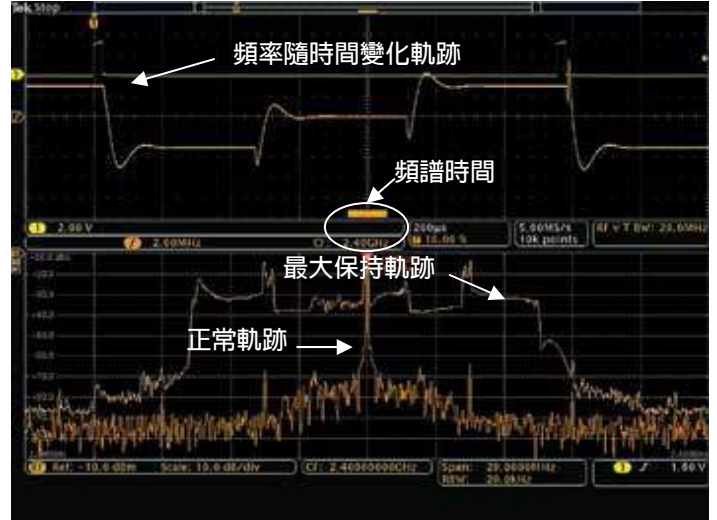


圖 29. 應用到 MDO 的相同訊號和設定及時域視圖和頻域視圖。

時域畫面顯示了標為「f」的橙色軌跡代表的訊號的頻率隨時間變化。頻率刻度設定為 2.00 MHz/格。頻率隨時間變化畫面的粗略視圖顯示了這個訊號在大約 1.4 ms 時間週期上似乎在三個不同的頻率之間跳動。每個頻率似乎穩定了大約 400 μ s，而頻率之間的跳變用了大約 100 μ s。這些事件要比傳統掃頻分析儀的掃描時間快得多。根據圖 28 中選擇的設定，頻譜分析儀每個掃描期間（146 ms 掃描時間）已經有 100 多個這樣的事件集合發生。

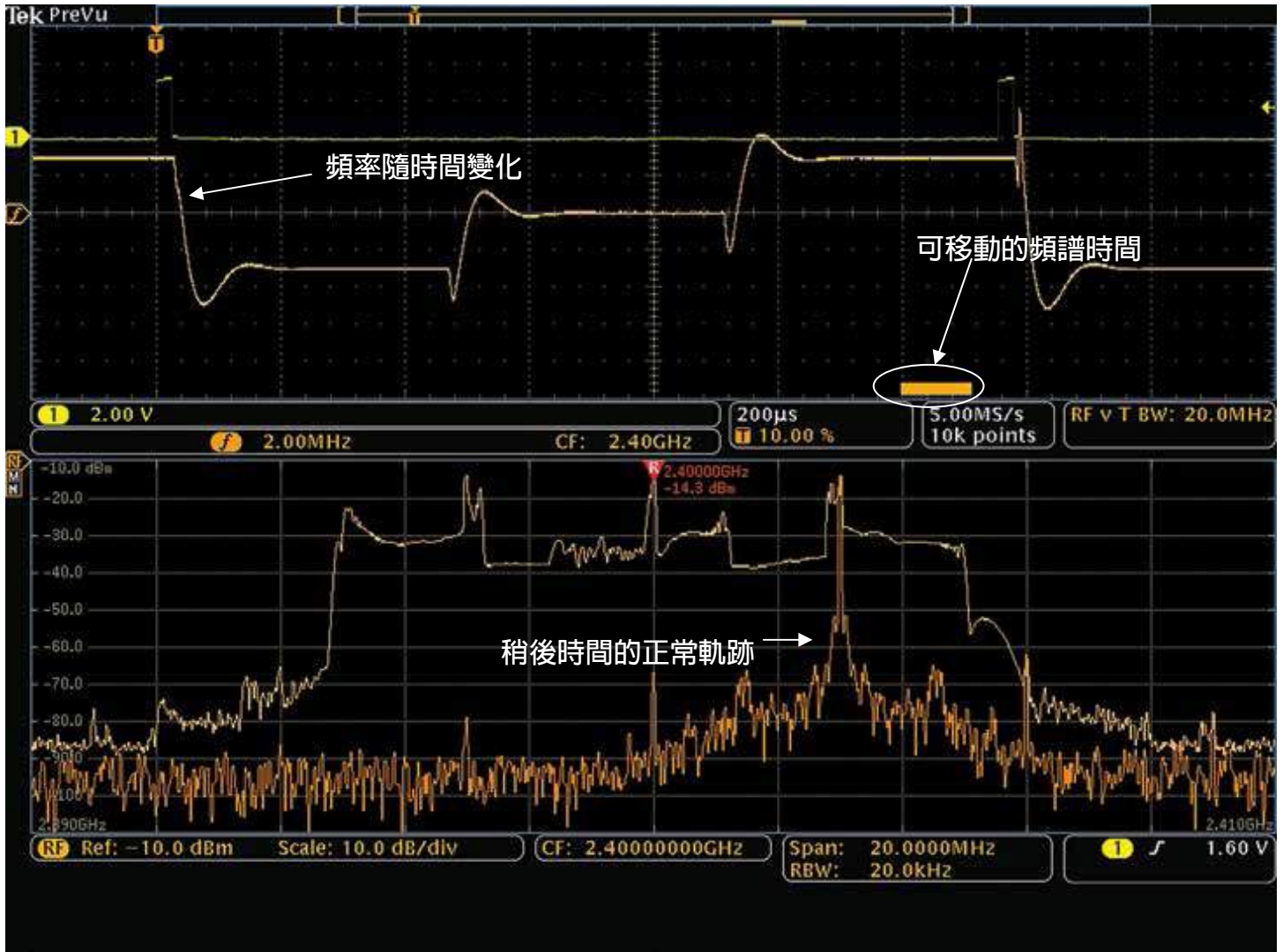


圖 30. 正常軌跡現在位於跳頻訊號較高頻率上。

透過使用 MDO4000C 混合域示波器前面板上的 Wave Inspector 旋鈕，可以在頻域內檢視擷取到的整個時間。圖 30 是擷取到的相同訊號，但現在，頻譜畫面視圖表示的是頻率隨時

間變化的不同時點。現在，頻譜時間移動到這個射頻訊號三個跳頻順序中較高的頻率，已經重新計算與這個新時點相關的頻譜。

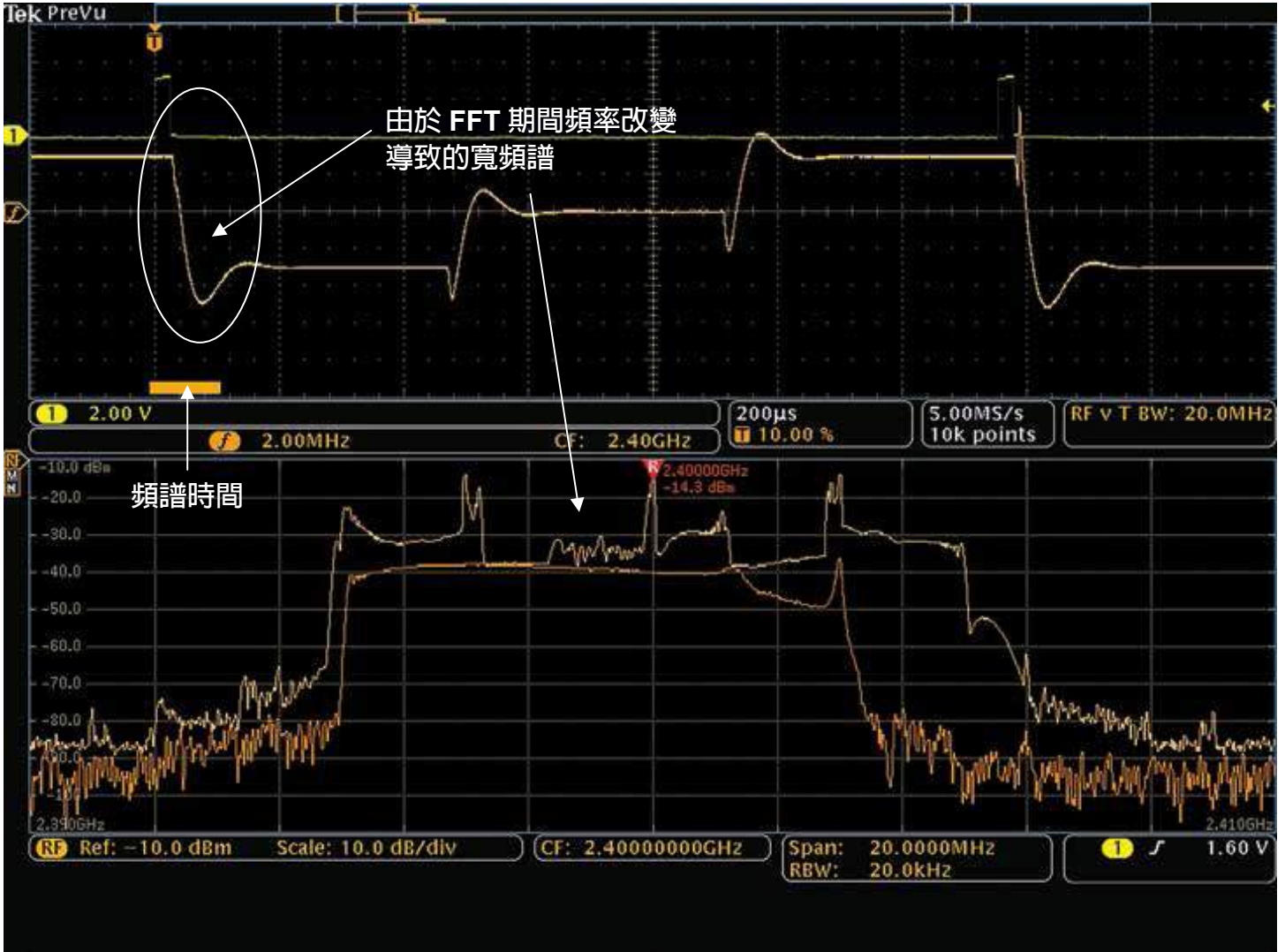


圖 31. 在跳頻期間顯示訊號的寬頻譜能量。

在圖 31 中，頻譜時間被移動到跳階順序中最高頻率與最低頻率之間的瞬變。使用寬頻頻譜分析儀可以清楚地看到這麼寬的頻譜，而使用傳統頻譜分析儀很難解析這一頻譜，後者在掃描感興趣的頻譜時採用了窄頻偵測器。

對圖 28 中傳統掃頻分析儀上顯示的訊號，寬頻譜在掃頻分析儀時會表現為架構性的假訊號，因為緩慢掃描快速移動的訊號。我們在前面確定，在傳統頻譜分析儀的掃描時間 (146 ms) 期間，

發生了 100 多個跳頻週期。在持續時間大約 1.4 ms 的單一跳頻週期期間，由於三次頻率跳變，共有三個寬頻頻譜事件。傳統頻譜分析儀的窄頻偵測器只將事件表示為偵測器頻率上掃描期間接收的能量，因此除 300 個穩定的頻率事件之外，還發生了多達 300 個雜訊事件。從圖 28 中的軌跡可以看出，不可能瞭解這個訊號的特性。傳統分析儀頻譜視圖顯示的雜訊尖峰不代表實際寬頻雜訊，而只是使用了錯誤的工具 (即傳統的掃頻分析儀) 檢視寬頻譜事件時所產生的假訊號而已。

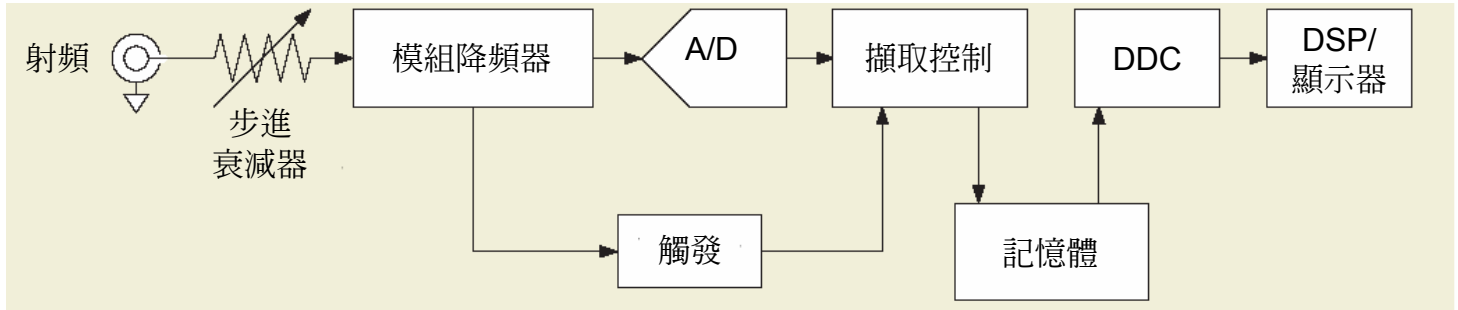


圖 32. 簡化的 MDO4000C 混合域示波器區塊圖。

圖 27 (b) 是向量訊號分析儀 (VSA) 架構，圖 32 是 MDO4000C 混合域示波器簡化的區塊圖，代表著更加現代的頻譜分析儀，本機振盪器是步進的，而不是掃描的。得到的訊號被濾波，然後被數位化。這會產生頻帶受限的時域訊號，透過使用 DFT (離散傅立葉轉換)，可以將訊號從時域轉換到頻域。在這些變換中，最著名的轉換是 FFT (快速傅立葉轉換)。然後將所得到的頻域資訊顯示在畫面上，在本機振盪器頻率周圍畫出頻譜的一小部分，顯示在畫面上。然後本機振盪器步進到下一個更高的頻率，重複上述過程，直到畫出整個頻譜。步進分析儀在處理隨時間變化的射頻時至少要比掃頻分析儀更優越，但因其範圍有限，感興趣的頻距位於通常很窄的步進內。

MDO4000C 系列混合域示波器的頻譜分析儀功能的核心也採用這一過程，即在時域中擷取訊號，然後使用 DFT 將訊號轉換到頻域。MDO 混合域示波器的獨特之處在於，其擁有非常寬的擷取頻寬和多通道時間關聯架構。普通步進頻譜分析儀的頻譜擷取頻寬在 10 MHz 左右，而 MDO4000C 系列混合域示波器保證提供 >1 GHz (在某些情況下可高達 3.75 GHz) 的即時頻譜擷取頻寬，是一般 VSA 10 MHz 頻譜擷取頻寬的 100 到 300 倍！

圖 32 是 MDO4000C 混合域示波器上射頻通道簡化的區塊圖。與傳統的掃頻分析儀和向量訊號分析儀的架構不一樣，MDO4000C 混合域示波器採用了高取樣率 (10 GS/s) 的模數轉換器，允許射頻輸入訊號，在降頻時可以不需要變頻到一個窄頻的中頻 (IF 頻率)，在 MDO4000C 混合域示波器的前端採用了寬頻的模組降頻器，並寬頻的觸發檢測器，在滿足觸發條件時 (觸發條件可以是射頻事件或任何時域的事件)，MDO4000C 混合域示波器就開始擷取各通道上的訊號，從而得到所有通道上各訊號的時域資料記錄，將這些資料都記錄到記憶體上。

然後，數位降頻器 (DDC) 從記憶體中讀取資料，其基本上會將訊號邊帶限制在與現今頻距和中心頻率設定對應的頻率範圍內。然後得到的資料輸送到 DSP/顯示系統中，進一步進行處理和顯示。

下一節將更詳細地討論這個區塊圖的各個要素。

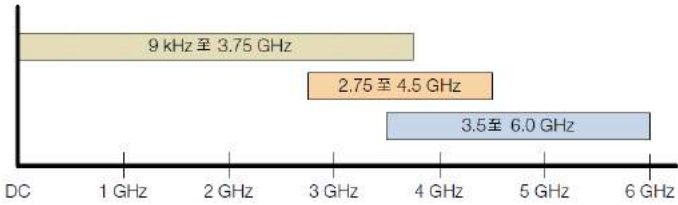
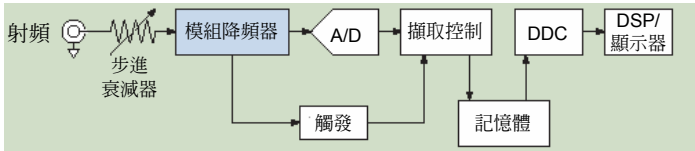


圖 33. 模組降頻器頻率範圍。

降頻



由於 MDO4000C 混合域示波器採用以示波器為基礎的擷取系統，因此直接使用寬頻的模組降頻器，就可以將感興趣的頻率頻距帶到模數轉換器可以接收的範圍內。

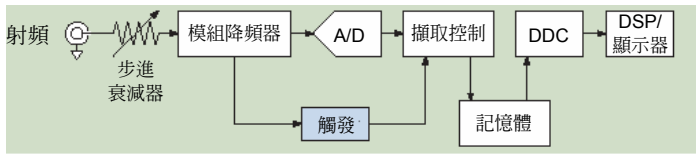
如圖 33 所示，模組降頻器在多個範圍之間切換。

請注意三個 1 GHz 頻帶重疊，使得 MDO4000C 混合域示波器能夠在任何中心頻率設定下提供不少於 1 GHz 的單次頻譜擷取頻寬。這大幅超過了典型現代頻譜分析儀 10 MHz 的頻譜擷取頻寬。與（一些非常昂貴的頻譜分析儀選項）將這些分析儀中的頻譜擷取頻寬擴展到 40 MHz、80 MHz、甚至 160 MHz 的選項相比，MDO4000C 混合域示波器的寬頻譜擷取頻寬仍有非常大的優勢，是現今沒有一台頻譜分析儀可以做到的。

另外注意，頻譜擷取頻寬經常會超過 1 GHz 這個最小值（這個是保證值）。事實上，在 3.0 GHz 頻率範圍的 MDO4000C 中，儀器一直在任何頻距設定下，保證在單次擷取中，都能擷取全頻寬（即 3GHz）的頻譜。

在顯示的頻距超過一個降頻器頻帶的限制時，可以將兩個頻帶無縫地縫合在一起，從兩個記錄中建置一個頻譜。

頻域觸發

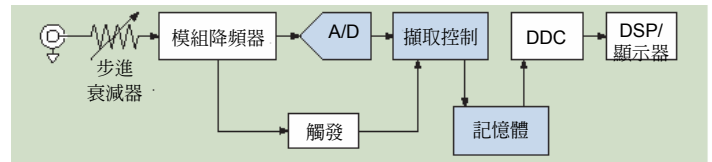


以示波器擷取系統為基礎的 MDO4000C 混合域示波器內建了一個跨域的觸發擷取系統，在一次的擷取中，同時擷取各通道上的訊號，形成一個連續的時域資料記錄。然後這個記錄以數位方式降頻 (下面進行了詳細介紹) 到希望的頻距，然後透過 DFT 運行，將其轉換到頻域。結果，在一次擷取中所得到的整套頻域資料可以與其他的類比與數位資料在時間上對準以及關聯，因為這些資料都來自於同一套的觸發系統所擷取的資料記錄。

這一過程與傳統頻譜分析儀中典型的選通掃描形成了鮮明的對比。門訊號可以「觸發」掃描，但觀察的訊號在掃描時間內仍可能會變化。結果，顯示的頻率資訊在時間上一致的確定性很低。通過更加完善的時間選通功能，可以從多個觸發事件中累積量測期間的頻譜，但結果仍不能表示一次連續時間週期中的資料，而後者對診斷嵌入式系統中的間歇性漏洞通常至關重要。因此，這種傳統掃頻與觸發技術只能用於重複事件。

MDO4000C 混合域示波器還為頻譜顯示提供了一個自由運行選項，避免顯示同步到 DUT 中某個事件的頻譜。這種模式仍是「已觸發」模式，顯示的頻譜仍從相鄰資料記錄中提取，因此在時間上是一致的。不同之處在於，觸發事件在內部以最快速度產生，避免了與 DUT 中的事件相關。

擷取原始的射頻時域資料記錄



為了瞭解擷取時域資料、然後轉換到頻域的過程，我們有必要簡單討論一下這兩個域中資料之間的關係。

首先，建立單個頻譜所取樣的時間量取決於 RBW 設定和視窗選項。這個擷取時間稱為頻譜時間。為簡化起見 (忽略視窗項)，頻譜時間的公式如下：

$$\text{頻譜時間} > 1 / \text{RBW}$$

RBW 設定表示頻率軸上可以區分的最小的頻率差異。例如，將 RBW 設定成 1 Hz，要求擷取分析 1 秒 (1/1Hz) 的資料。如果有人指出，需要 1 秒的時間區分 1000 Hz 和 999 Hz 訊號之間的差異，這理解起來就很簡單。這需要很長時間「數」第一個訊號中完整的 1000 個週期及第二個訊號中 999 個週期。在這個時間間隔上，將不能區分低於 1 Hz 的差異。

| 視窗 | 視窗因數 | 頻譜時間 |
|-----------------|------|-------------|
| Kaiser (預設值) | 2.23 | 223 μ s |
| 矩形 | 0.89 | 89 μ s |
| Hamming | 1.30 | 130 μ s |
| Hanning | 1.44 | 144 μ s |
| Blackman-Harris | 1.90 | 190 μ s |
| Flat-Top | 3.77 | 377 μ s |

表 4. 10 KHz RBW 的視窗因數和頻譜時間。

視窗函數 (如需進一步瞭解視窗函數，請參閱產生頻譜) 本身的濾波形狀會影響 FFT 轉換過程的頻寬，將能量塗抹到相鄰二元組中。視窗因數用 FFT 二元組數量指明視窗的 -3dB 頻寬。視窗因數的影響是通過視窗因數擴展要求的擷取時間，公式如下：

$$\text{頻譜時間} = \text{視窗因數} \times (1 / \text{RBW})$$

MDO4000C 混合域示波器中各種 FFT 視窗的視窗因數如表 4 所示。

第二，最低取樣率取決於頻距和中心頻率設定。Nyquist 定理指出，取樣率最低必須是數位化訊號中最高頻率成分的兩倍。如果取樣率不足，會發生假訊號，導致訊號中不存在的假頻率指示。

爲了避免這個假訊號，在感興趣的最高頻率之上，必須對輸入訊號進行低通濾波，如圖 34 所示。

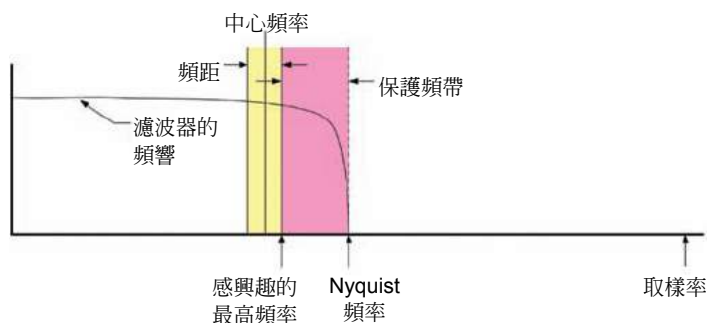


圖 34. 低通濾波 Nyquist 頻帶。

因此，要求的最低取樣率如下：

$$\text{取樣率} = 2 \times \text{濾波因數} \times (\text{中心頻率} + \frac{1}{2} \times \text{頻距})$$

濾波因數 (FF) 是相對於感興趣的最高頻率的一個項目，定義了一個保護頻帶，保證訊號衰減到儀器在 Nyquist 頻率上的 SFDR 以下。

與許多新的向量訊號分析儀不同，MDO4000C 混合域示波器不需要提供可變輸入濾波或調整擷取取樣率，因爲模數轉換器以 10 GS/s 恆定速率取樣。這對提供模組降頻器所需的 3.75 GHz 輸入頻寬已經足夠高了。

以快速取樣率取樣，在考察一定頻距內訊號的雜訊功率時提供了數位處理增益。處理增益會降低雜訊功率，降低振幅是 Nyquist 頻寬除以解析度頻寬之比的對數乘以 10。

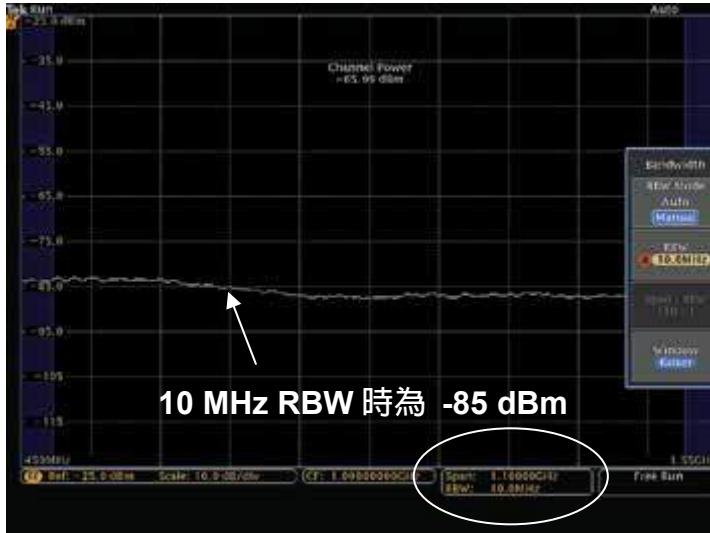


圖 35. 1 GHz 通道，10 KHz RBW 的雜訊功率與頻譜軌跡。

例如，圖 35 所示的 1 GHz 通道的雜訊功率測得為 -65.99 dBm。在量測感興趣的訊號時，必須將雜訊功率視為量測不確定性的一個組成部分。理論上，以恆定取樣率擷取一固定的頻寬時，減小 RBW 解析度頻寬可以增加數位處理增益。圖 35 顯示了 1 GHz 頻距 10 MHz RBW 的雜訊層位準大概是 -85 dBm。在圖 36 中，所使用的 RBW 是 10 KHz，是圖 35 中的 RBW 的 1/1000，雖然在 1 GHz 通道中的雜訊總功率仍為 -64.04 dBm，但是在 1 GHz 頻距 10 KHz RBW 的雜訊層位準卻降低為 -115 dBm。

與傳統示波器不同，在特定的頻率點上能夠選擇感興趣的頻距也可以降低量測中的總雜訊功率，進而降低量測低位準訊號時的不確定性。

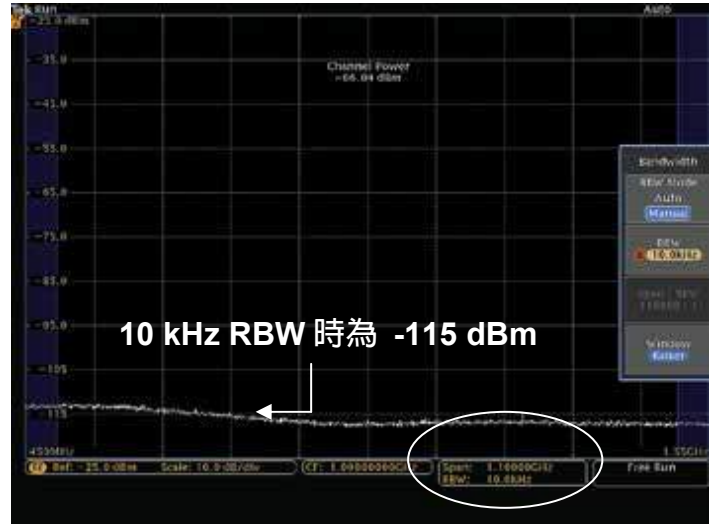


圖 36. 1 GHz 通道的雜訊功率。

最後，為頻譜分析儀通道所擷取的時間長度定義為射頻擷取時間。射頻擷取時間與取樣率和儲存容量有關。由於取樣率固定在 10 GS/s，在頻譜分析儀路徑中擁有 1 GB 儲存容量，在理論上能夠在頻譜分析儀通道中應達成 100 ms 的擷取時間。但是，除了儲存射頻資料外，記憶體還用來為擷取計算射頻隨時間變化，包括計算振幅、頻率和相位隨時間變化以及複雜的 IQ 資料。頻距越寬，這些時域記錄的取樣（資料壓縮）越小，因此這會影響射頻擷取可以使用的時間量。

射頻擷取時間長度至少要和頻譜時間相同，在大多數情況下，射頻擷取時間要長得多。還應知道的是，可以在整個射頻擷取時間中捲動頻譜時間，然後在頻域視圖中重新計算和顯示 FFT。

要考慮的另一個重要變數是類比時間。類比時間是類比通道和數位通道擷取的時間長度，透過水平刻度旋鈕來直接控制。由於類比通道和數位通道上擷取的時間量完全獨立於頻譜分析儀，因此有必要瞭解這兩個功能之間的相互關係。

| 頻距 | 射頻擷取時間 |
|---------------------|--------------|
| > 2 GHz | 5 ms |
| > 1 GHz – 2 GHz | 10 ms |
| > 800 MHz – 1 GHz | 20 ms |
| > 500 MHz – 800 MHz | 25 ms |
| > 400 MHz – 500 MHz | 40 ms |
| > 250 MHz – 400 MHz | 50 ms |
| > 200 MHz – 250 MHz | 80 ms |
| > 160 MHz – 200 MHz | 100 ms |
| > 125 MHz – 160 MHz | 125 ms |
| < 125 MHz | 158 ms (最大值) |

表 5. MDO4000C 系列中的射頻擷取時間與頻距比較。

表 5 提供了 MDO4000C 中的射頻擷取時間與射頻頻距的關係。明顯窄頻距加上更多的取樣 (可以達成最長的時間記錄)。當暫態頻寬提高時，分配給射頻時域軌跡的資料將主導了記憶體的空間分配。

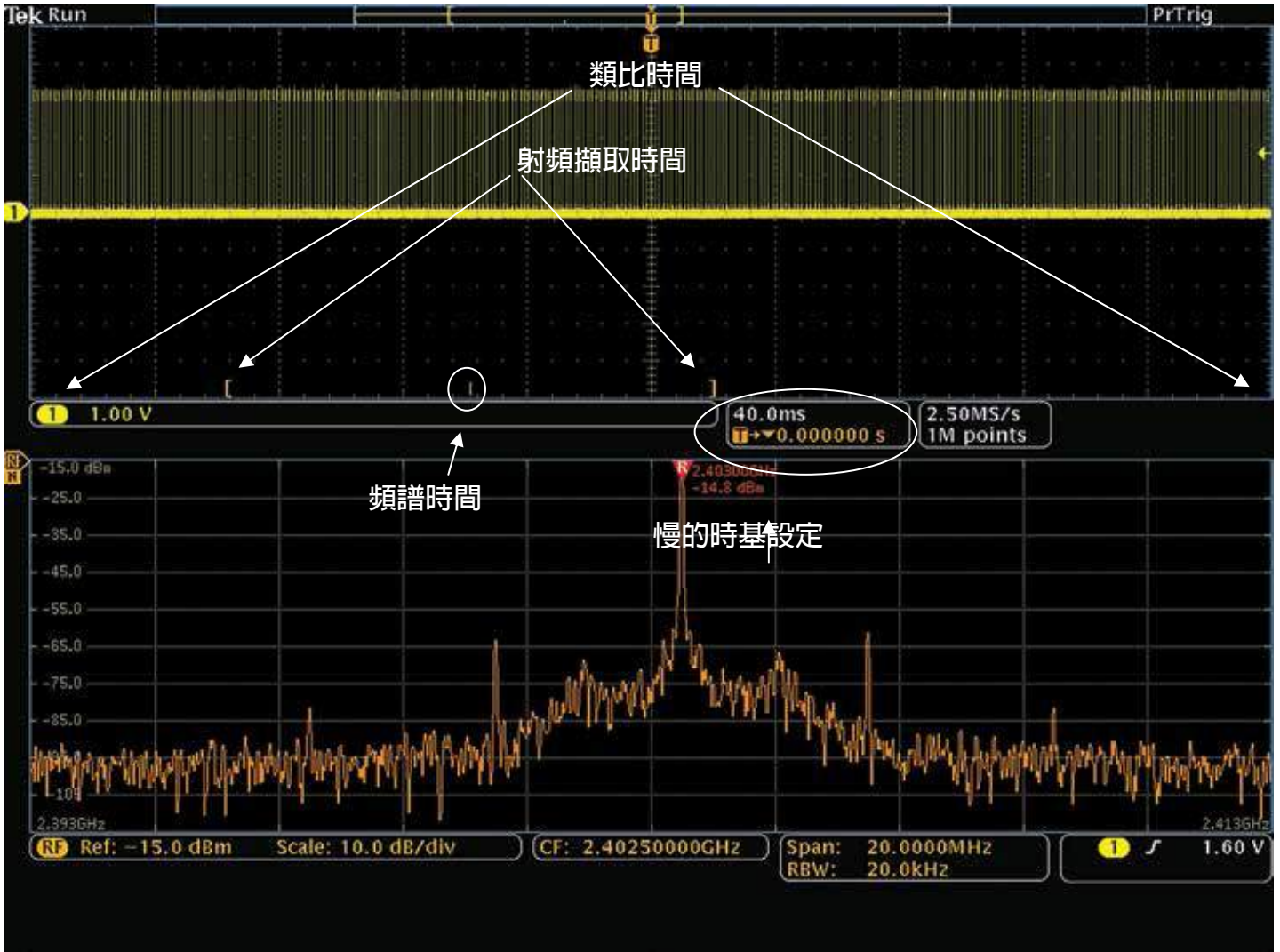


圖 37. 類比時間、射頻擷取時間和頻譜時間。

對中速及快速時基設定，射頻擷取時間和類比時間相等，使用者可以在整個擷取中移動頻譜時間。但是，在使用較慢的時基設定，類比通道的有效取樣率下降時，類比時間可能會超過射頻擷取時間。在這些情況下，使用者有必要瞭解那個部分的類比時間正代表著射頻擷取時間。圖 37 顯示時域視圖中超低時基設定時的類比時間、射頻擷取時間和頻譜時間之間的關係。

應瞭解射頻擷取必須有一個觸發事件，將頻率視圖與時域視圖關聯起來。觸發事件可以發生在射頻擷取最後，如圖 37 所示。射頻擷取也可以發生在觸發後的任意時間。

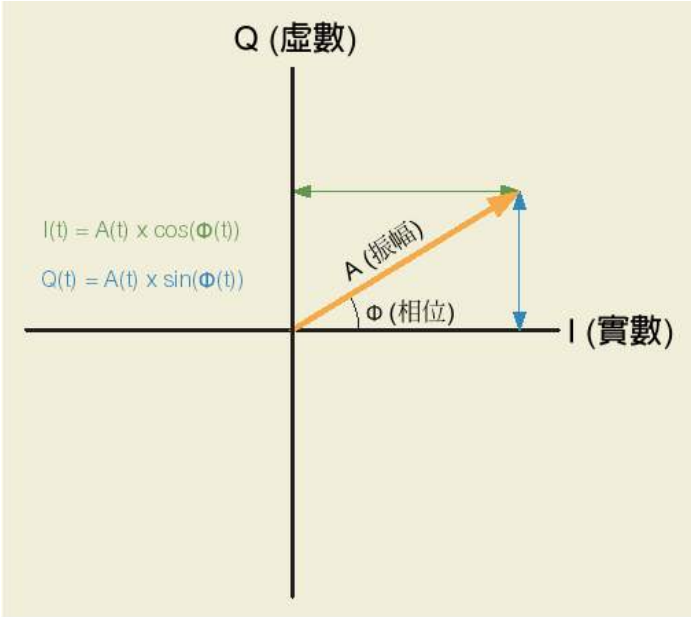
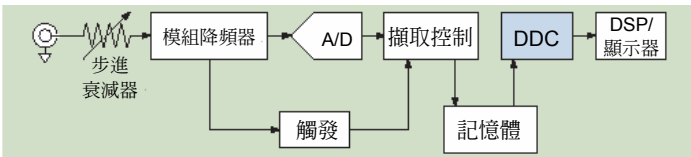


圖 38. IQ 資料平面。

數位降頻



表示帶通訊號的一種常用的、計算高效的方式是採用波形的複數基頻表示。轉換到頻域的第一步，是在原始射頻時域記錄上執行數位降頻。這一過程完成了三件事：

- 資料記錄被轉換成複數 I (同相) 和 Q (正交) 資料格式。
- 中心頻率移動到 DC，這種中心頻率的轉移允許將 IQ 取樣率降低到沒有轉移前的一半的速率。
- 資料被濾波和壓縮到足以覆蓋頻距的取樣率。

為產生 IQ 資料及將中心頻率 (CF) 移到 DC，將射頻時域資料乘以正弦項和餘弦項，如下面的公式所示：

$$I = RF(t) \times \cos(CF)$$

$$Q = RF(t) \times \sin(CF)$$

得到的 IQ 資料是複數，表示射頻訊號在量測期間如何偏離中心頻率 (如圖 38 所示)。

在任意時點降頻的訊號可以視為 IQ 平面中畫出的向量。訊號的暫態振幅確定了向量的長度。訊號相對於中心頻率的暫態相位確定了向量的極角。I 值和 Q 值是這個向量投射到 I (實數) 軸和 Q (虛數) 軸上的投影。

必須理解訊號的相位是相對於現今中心頻率設定的值。為更全面地瞭解這一點，我們看一下下面的實例：

- 如果輸入是連續波或 CW 訊號，其頻率與中心頻率設定完全相同，得到的向量在 IQ 平面中將是固定的。向量的相位只是訊號與中心頻率之間的相位偏置。
- 如果輸入訊號是振幅調變 CW 訊號，頻率與中心頻率設定完全相同，那麼得到的向量也有一個恆定的相角，但長度會隨著振幅變化而變化。
- 如果輸入訊號是 CW 訊號，頻率與中心頻率設定不同，那麼得到的向量將圍繞 IQ 平面中心旋轉，旋轉速率表示 CW 訊號與中心頻率之間的頻率差。

一旦完成到 IQ 資料的這種轉換，那麼感興趣的頻距將以 DC 為中心。然後可以濾波 IQ 資料，消除落在頻距以外的任何頻率成分，進行壓縮 (以 MAX、MIN、AVERAGE 等為基礎的方式進行取樣)，減少資料內容。與上面的取樣過程類似，想要的頻距設定決定著得到的最低取樣率：

$$\text{取樣率} = 2 \times \text{濾波因數} \times (\frac{1}{2} \times \text{頻距})$$

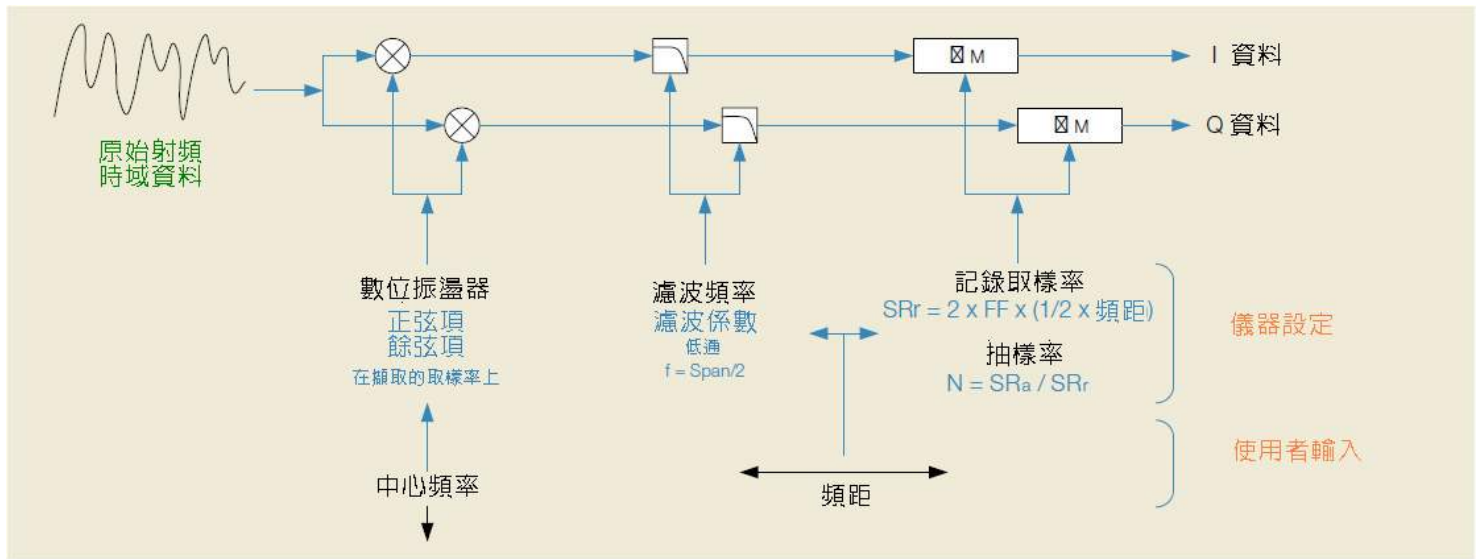


圖 39. 產生 IQ 資料。

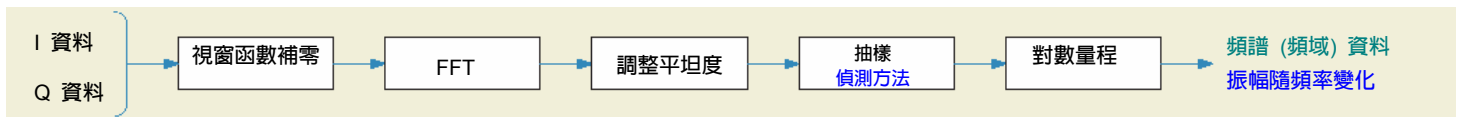


圖 40. 產生頻譜資料。

由於中心頻率現在是零，因此從公式中取消。取樣率只需根據頻距的 1/2，因為複數 IQ 資料是作為實數資料有效載頻資訊的兩倍。在 IQ 資料中，Nyquist 頻率等於取樣率。

在 MDO4000C 混合域示波器中，濾波因數一般約等於 1.5。

圖 39 說明這種降頻過程。

產生頻譜

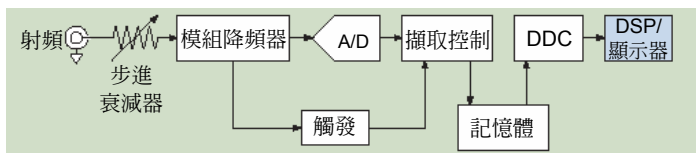


圖 40 說明產生顯示頻譜軌跡的過程。

在這個過程中，首先將資料乘以視窗函數。由於 FFT 假設訊號在整個期間不變，因此取樣間隔最後的不連續點將在得到的頻譜中表現為頻譜洩漏。視窗函數是為了減少這些不連續點。如需進一步瞭解各種視窗函數及其使用，請參閱附錄 A。

訊號在整個期間不變的假設的其中一個含義，在射頻時域資料覆蓋的時間間隔期間內，若訊號改變振幅的話，將以降低的功率位

準顯現在所得到的頻譜中。避免這種結果的唯一途徑是調整 RBW 設定，保證訊號在整個時間間隔期間是穩定的。

由於 FFT 處理在 2 的冪數的資料長度中更加有效，因此輸入資料會加上補零，直到最近的 2 的冪數。補零增加了頻譜解析度，而不會改變頻率內容。

應該指出的是，使用的 FFT 長度完全取於頻距/RBW 之比。上述公式中可以很容易看出：

$$\text{FFT 長度} = (\text{視窗因數} \times \text{濾波因數} \times (1/2 \times \text{頻距})) / \text{RBW}$$

對 MDO4000C 混合域示波器，預設 Kaiser 視窗的視窗因數是 2.23。如上所述，濾波因數約等於 1.5。預設的頻距/ RBW 之比為 1000:1。在這些預設設定下，得到的 FFT 長度約為 3,345 點。這將零襯墊直到 4,096 點 FFT。

每個轉換訊框中樣點數越多，變換完成後頻率解析度越好。遺憾的是，這也意味著變換訊框所需的資料計算數量越多。FFT 這個轉換過程也因密集計算要求而聞名。

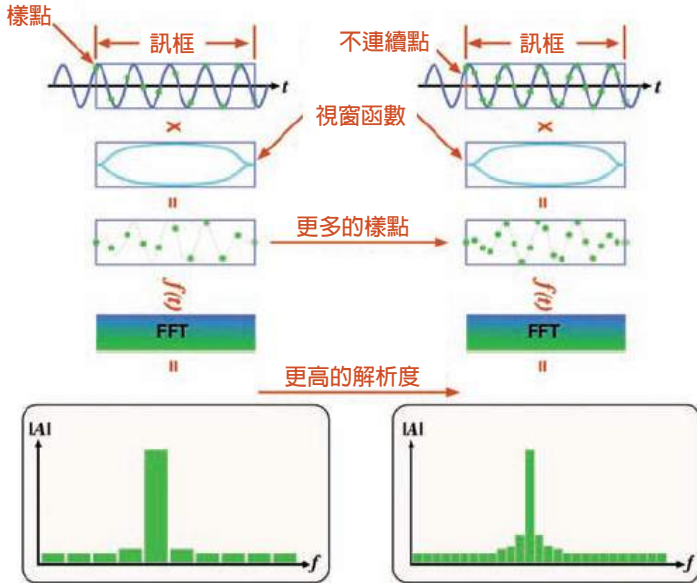


圖 41. 提高時間樣點數改善了頻域解析度。

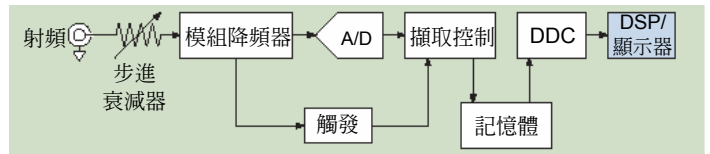
然後我們使用 FFT，以頻譜形式將射頻時域資料轉換成頻域資料。然後進一步修改這個頻譜：

- 整個頻譜乘以一套調整平坦度和相位的係數。這些係數在出廠校準時確定。
- 如前所述，FFT 過程可以涉及 1,000 - 2,000,000 點。因此，頻譜記錄可壓縮以適應 1,000 點畫面。這種資料壓縮 (取樣) 過程稱為偵測，用來將多個 FFT 二元組聚合成一個顯示的二元組。使用者可以控制選擇的偵測方法，壓縮方式如下：
 - + Peak：保留壓縮間隔中最大的資料點
 - - Peak：保留壓縮間隔中最小的資料點
 - Average：平均整個壓縮間隔中的資料
 - Sample：保留壓縮間隔中最後一個資料點
- 然後可以對最終頻譜求對數，得到最終畫面。



圖 42. 產生射頻時域資料。

產生射頻時域資料



IQ 資料的另一個用途是產生射頻時域資料。回憶一下，在上面的數位降頻中，IQ 資料只是在虛數 IQ 資料平面中作為向量繪製的訊號的笛卡爾 (Cartesian) 表示。因此，IQ 資料可以作如圖 42 所示變換。

可以在時域格線中，與其他時域軌跡一起繪製得到射頻時域資料圖。所有時域資料 (包括類比資料、數位資料和頻譜分析儀通道) 在格線中都時間對準，允許使用者評估各個通道之間的時序關係。

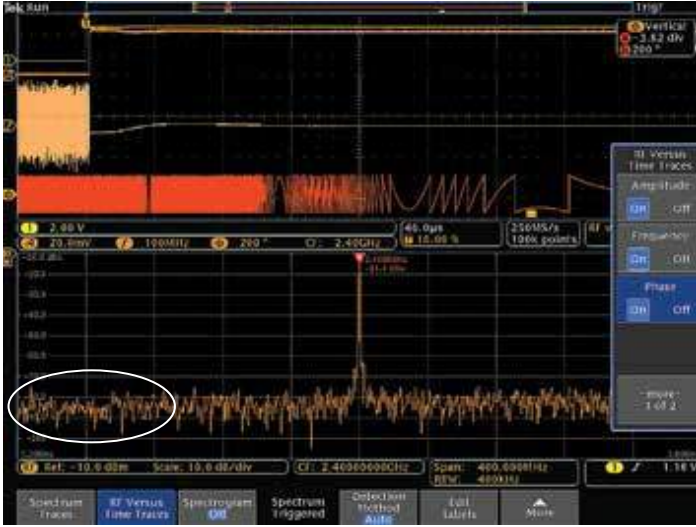


圖 43. 沒有消隱的頻率和相位隨時間變化。

注意相位計算和頻率計算都獨立於振幅計算。如果振幅低，那麼 IQ 資料會越來越以雜訊為主，圖 43 的螢幕擷取畫面中顯示了這種效應。

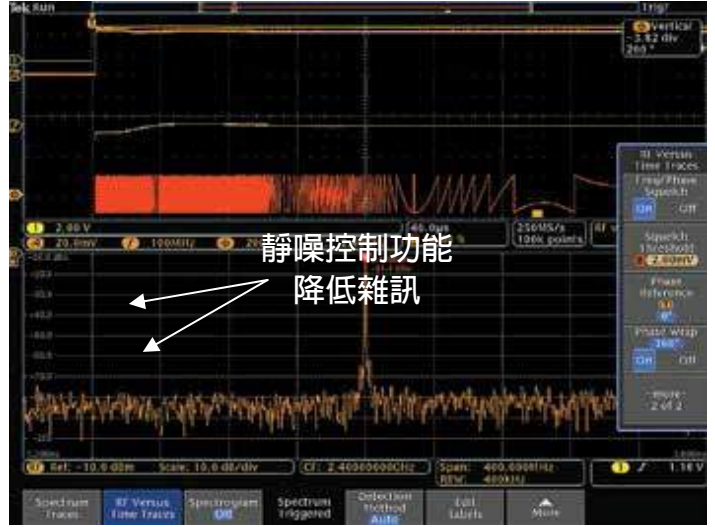


圖 44. 消隱的頻率和相位隨時間變化。

爲了避免這個問題，MDO4000C 混合域示波器擁有靜噪控制功能，允許使用者在振幅降到使用者定義的臨界值以下時消隱相位和頻率軌跡。圖 44 螢幕擷取畫面顯示了這一結果。

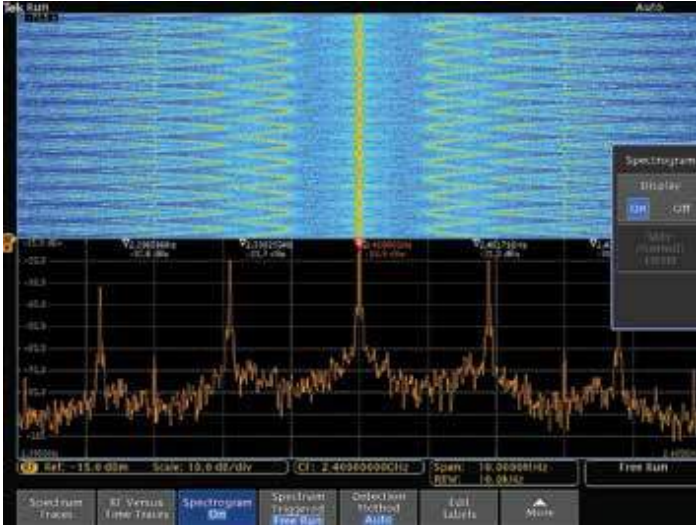


圖 45. 頻譜瀑布圖畫面顯示了訊號記錄的頻譜歷史。

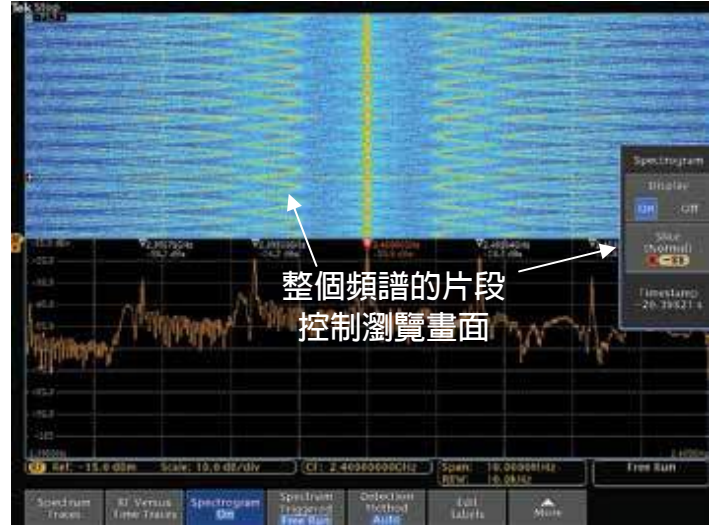
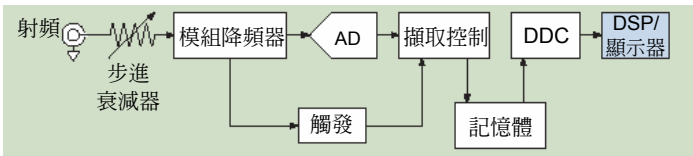


圖 46. 「片段」顯示了以前記錄的訊號。

產生頻譜瀑布圖



頻譜的另一個用途是繪製頻譜瀑布圖。

這個過程相對簡單，使用顏色對頻譜振幅編碼，在頻譜瀑布圖畫面中作為多個像素組成的一條直線繪製結果。每個新的「片段」會將畫面中現有的資料向上推，直到畫面最上面的資料被丟棄。一個「片段」表示已經根據頻譜畫面中的頻距和 RBW 設定所處理的一個 FFT 訊框。

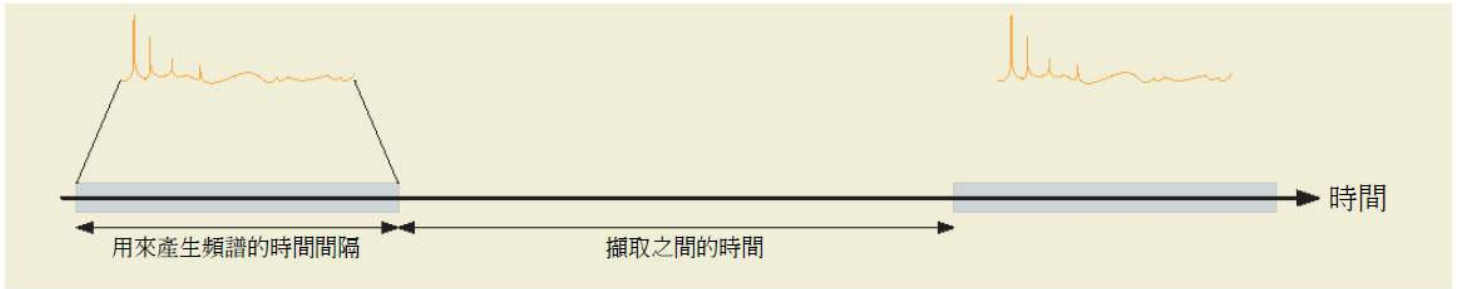


圖 47. 時間解析度。

時間解析度

要討論的最後一個議題是資料的時間解析度。

頻譜的時間解析度相對較差，圖 47 中可以看出其原因。

首先，如上面「產生頻譜」所述，FFT 是從覆蓋 RBW 設定定義的時間間隔的資料中產生的。因此不能區分訊號頻譜成分在這個時間間隔內的變化，而是聚合成一個頻譜。

第二，從圖 47 中可以看出，在擷取事件之間有延遲。擷取事件之間發生的變化將看不到。

爲了縮短計算頻譜的時間，應提高 RBW。由於預設設定將 RBW 與頻距關聯起來，提高頻距可以得到想要的效果。此外，這還會縮短擷取之間的時間，因爲進行數位降頻要求的時間被縮短了。

爲進一步縮短擷取之間的時間，應降低頻距/RBW 之比，從而可以加快 FFT 處理時間。

與頻譜相較，射頻時域資料的時間解析度相對較好。如前面「數位降頻」中所述，IQ 資料的取樣率取決於頻距設定，因此比頻譜時間解析度精細得多。這是射頻時域軌跡的主要優勢之一。

爲改善振幅、相位或頻率隨時間變化軌跡的時間解析度，應提高頻距。

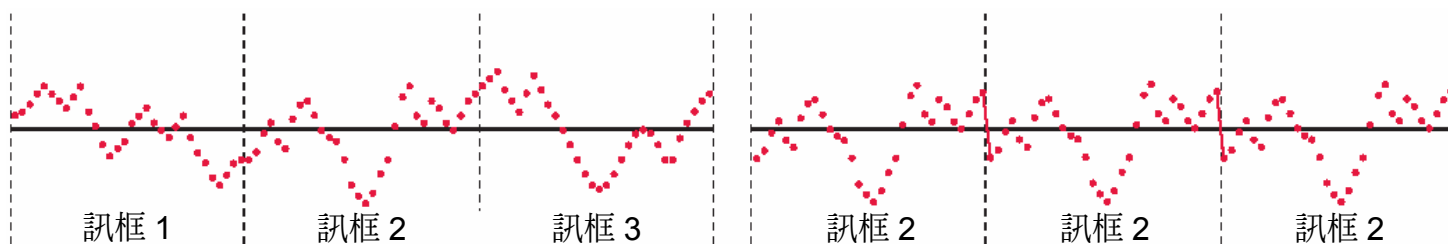


圖 A1/A2. 被取樣的時域訊號的三個訊框 (a) 和一個訊框中定期擴展樣點導致的不連續點(b)。

| 視窗 | 視窗因數 | 最適合用於： |
|-----------------|------|--|
| Kaiser (預設值) | 2.23 | 最佳旁瓣位準，形狀因數最接近傳統高斯 RBW |
| 矩形 | 0.89 | 量測突發的暫態訊號，其中事件前的訊號位準與事件後的訊號位準接近相等 |
| Hamming | 1.30 | 量測正弦、定期或窄頻隨機雜訊，其中事件前的訊號位準與事件後的訊號位準明顯不同 |
| Hanning | 1.44 | 量測振幅準確度 (低於解析頻率)，其中事件前和事件後的暫態訊號或突發訊號位準明顯不同 |
| Blackman-Harris | 1.90 | 量測頻率振幅，量測以單頻率為主的波形，搜尋高階諧波 |
| Flat-Top | 3.77 | 量測在時域資料訊框開頭或結尾附近擷取的簡短事件的振幅準確度，頻率解析度差 |

表 A1. MDO4000C 混合域示波器中提供的不同的視窗函數。

附錄 A：視窗函數

視窗

離散傅立葉轉換 (DFT) 分析的數學計算本身有一個假設，即要處理的資料是周期性重複的訊號的一個週期。

圖 A1 描繪了一系列時域樣點。例如，在對圖 A1 中的第二個訊框應用 DFT 處理時，將對訊號進行周期性擴展。多個連續訊框之間一般會發生不連續點，如圖 A2 所示。

這些假訊號不連續點產生原始訊號中不存在的頻譜假訊號。這一效應會產生訊號的不準確表示結果，稱為頻譜洩漏。頻譜洩漏不僅在輸入中產生輸入中不存在的訊號，還會降低附近有大訊號時觀察小訊號的能力。

MDO4000C 系列頻譜分析儀功能應用視窗技術，降低頻譜洩漏的影響。在執行 DFT 之前，先逐個樣點以相同長度將 DFT 訊框乘以視窗函數。視窗函數通常呈鐘形，減少或消除了 DFT 訊框尾的不連續點。

視窗函數的選擇取決於頻率響應特性，如旁瓣 (side-lobe) 位準、等效雜訊頻寬和振幅誤差。視窗形狀還決定著有效的 RBW 濾波。

與其他頻譜分析儀一樣，MDO 混合域示波器允許使用者選擇 RBW 濾波器。MDO 混合域示波器還允許使用者在多個常用視窗類型之間進行選擇。增加了直接指定視窗形狀的靈活能力，使用者可以最佳化特定量測。例如，應特別注意脈衝或暫態射頻訊號的頻譜分析。表 A1 就不同的視窗函數的使用提供了部分建議。

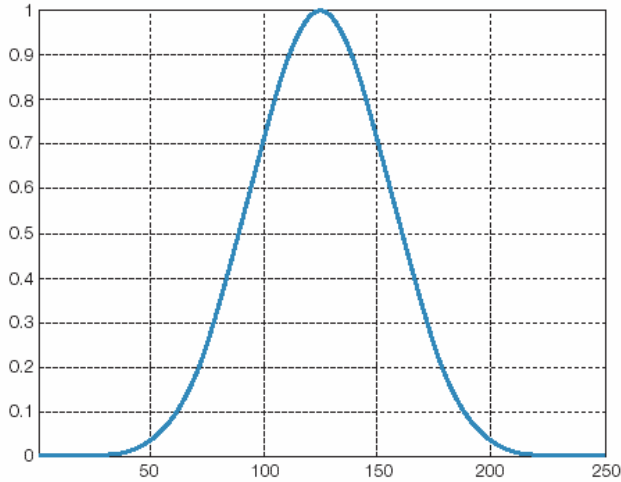


圖 A3. 時域中的 Kaiser 視窗 — 水平是時間樣點，垂直刻度線性刻度值。

視窗函數的率頻響應振幅決定著 RBW 形狀。例如，MDO 混合域示波器上的 RBW 定義為 3 dB 頻寬，與 DFT 中取樣頻率和樣點數的相對關係如下：

$$RBW = \frac{k * F_s}{N} \quad \text{公式 1}$$

$$N = \frac{k * F_s}{RBW} \quad \text{公式 2}$$

垂直線性刻度

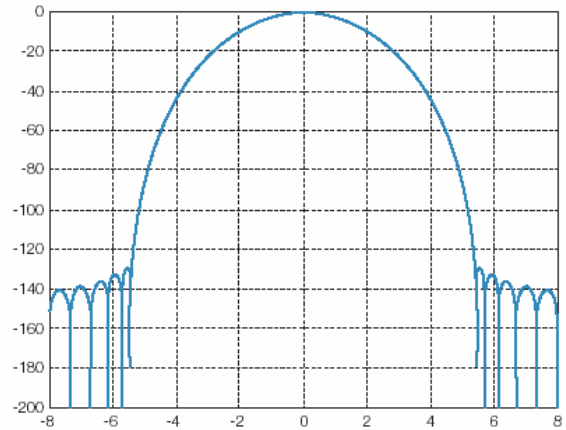


圖 A4. Kaiser 視窗的頻譜，水平刻度單位是頻率箱 (frequency bin, F^s/N)。垂直刻度以 dB 單位表示。

其中 k 是與視窗有關的係數， N 是 DFT 計算中使用的時域樣點數， F_s 是取樣頻率。對 Kaiser 視窗， k 約為 2.23。RBW 形狀因數定義為 60 dB 和 3 dB 時的頻譜振幅的頻率比，約為 4:1。在 MDO 混合域示波器上，頻譜分析量測使用公式 2，根據輸入頻距和 RBW 設定計算 DFT 要求的樣點數量。

圖 A3/A4 顯示了 MDO 混合域示波器頻譜分析中使用的 Kaiser 視窗的時域和頻譜。這是 MDO4000C 混合域示波器在頻譜分析中使用的預設視窗。



圖 A5. 2 KHz RBW 時的 Kaiser 視窗。

圖 A5 中的跳頻訊號實例說明了不同的視窗如何影響隨時間變化的訊號的頻譜表示。在使用預設的 Kaiser 視窗時，與這一擷取有關的頻譜時間為 1.12 ms。頻率隨時間變化畫面顯示了在跳頻大多數時間內，頻譜時間以三個跳頻順序的中間頻率為中心。上方頻率和下方頻率「開點頻率」週期相關的時間大體相等，圖

A3 中描述的視窗函數顯示，擷取開頭和邊緣附近的時間樣點水平下降，因為視窗函數在擷取中心使用的樣點呈高斯分佈。看一下頻域畫面中四個峰值的振幅（中心頻率、高頻、低頻和最大過激量峰值），中心峰值超過其他訊號近 30 dB。



圖 A6. 750 Hz RBW 時的矩形視窗。

在圖 A6 中，現在選擇的視窗類型是矩形。由於矩形視窗的視窗函數不同於 Kaiser 視窗，RBW 變成了 750 Hz，因此頻譜時間與上一個實例中的擷取時間大體相等。

頻譜時間再次與三個跳頻順序中相同的點對準，但頻譜表示有很大的差別。

由於矩形視窗函數基本上在擷取時間中不濾波時間樣點，且在三個頻率每個頻率上的駐留時間大體相等，因此採用矩形視窗的頻譜顯示三個峰值訊號的頻譜振幅大體相等。

使用者還可以選擇其他視窗（如 Blackman-Harris、矩形、Hanning），滿足特殊的量測要求，在執行儀器中提供的部分量測時，儀器也可以使用這些視窗。

附錄 B：術語

辭彙表

擷取 – 整數數量的時間相鄰樣點。

振幅 – 電訊號的量級。

振幅調變 (AM) – 正弦波 (載波) 的振幅根據第二個電訊號 (調變訊號) 的暫態電壓變化的過程。

類比時間 – 水平刻度旋鈕直接控制的類比通道和數位通道擷取的時間數量。

分析時間 – 來自一個模組的時間相鄰樣點的子集，作為分析視圖的輸入使用。

載波 – 調變駐留的射頻訊號。

載頻 – 載波訊號 CW 成分的頻率。

中心頻率 – 與分析儀顯示的頻譜的頻率頻距中心對應的頻率。

CW 訊號 – 連續波訊號，一種正弦波。

dBc – 為參考載波或參考訊號分貝中用來表示功率位準的單位。

dBfs – 一種單位，使用參考滿刻度的分貝表示功率位準。根據上下文，這可以是顯示幕滿刻度，或 ADC 的滿刻度。

dBm – 使用參考一毫瓦的分貝表示功率位準的單位。

dBmV – 使用參考一毫伏的分貝表示電壓位準的單位。

分貝 (dB) – 一個電力功率與另一個電力功率之比的對數乘以 10。

DFT-離散傅立葉轉換 – 計算取樣的時域訊號的頻率頻譜的數學運算過程。

顯示線 – 波形畫面上的橫線或豎線，作為參考源使用，用來與給定位準、時間或頻率進行目視 (或自動) 比較。

失真 – 訊號劣化，通常是由非線性操作引起的，會導致不想要的頻率成分。諧波失真和互調變失真是常見的失真類型。

動態範圍 – 可以以指定準確度量測、輸入上同時存在的兩個訊號的位準的最大比。

FFT - 快速傅立葉轉換 – 一種計算離散傅立葉轉換 (DFT) 的高效計算方法。常用的 FFT 演算法要求輸入樣點數與輸出樣點數相等以及 2 的冪數 (2、4、8、16、.....)。

頻率 – 訊號振盪速率，用赫茲或每秒週期數表示。

頻域視圖 – 表示訊號頻譜成分功率隨頻率變化；或訊號的頻譜。

頻率漂移 – 在其他條件保持不變的情況下，訊號頻率在指定時間內的逐漸位移或變化。用每秒赫茲表示。

頻率調變 (FM) – 電訊號 (載波) 的頻率根據第二個電訊號 (調變訊號) 的暫態電壓變化的過程。

頻率範圍 – 設備工作的頻率範圍，含上限和下限。

頻率頻距 – 在兩個頻率極限之間擴展的連續的頻率範圍。

標記 – 波形軌跡上可以目視識別的一個點，用來提取該點表示的域和範圍值讀數。

調變 – 改變訊號特性，一般是為了傳送資訊。

雜訊 – 重疊在訊號上的不想要的隨機干擾，一般會該訊號變得模糊。

基準雜訊 – 系統本身的雜訊位準，代表著輸入訊號可以觀察的最低極限，最終受到熱雜訊 (kTB) 限制。

雜訊頻寬 (NBW) – 用來計算雜訊或雜訊類訊號絕對功率的濾波器的具體頻寬，單位為 dBm/Hz。

參考位準 – 分析儀畫面最上面的格線表示的訊號位準。

解析度頻寬 (RBW) – 頻譜分析儀畫面中可以量測的最窄頻帶的寬度。RBW 決定著分析儀解析相距很近的多個訊號成分的能力。

應用摘要

射頻擷取時間 – 射頻通道中一個擷取代表的時間長度。時間長度會隨著頻距變化。

靈敏度 – 這個指標用來衡量頻譜分析儀顯示最低位準訊號的能力，通常表示為顯示的平均雜訊位準 (DANL)。

頻譜圖 – 頻率隨時間和振幅變化畫面，其中頻率用 x 軸表示，時間用 y 軸表示，功率用顏色表示。

頻譜 – 訊號的頻域表示，表明其頻譜成分隨頻率分佈情況。

頻譜分析 – 確定射頻訊號頻率成分的一種量測技術。

頻譜時間 – 為頻域視圖執行 FFT 所要求的時間量。頻譜時間取決於 RBW 和視窗因數。

向量訊號分析 – 檢定射頻訊號的時域特性使用的一種量測技術。向量分析同時考慮振幅和相位。

參考縮略語

ACP：鄰道功率

ADC：模數轉換器

AM：振幅調變

BW：頻寬

CW：連續波

dB：分貝

dBfs：dB 滿刻度

DDC：數位降頻器

DFT：離散傅立葉轉換

DSP：數位訊號處理

FFT：快速傅立葉轉換

FM：頻率調變

FSK：頻移鍵控

IF：中間頻率

IQ：同相正交

LO：本機振盪器

NBW：雜訊頻寬

RBW：解析度頻寬

RF：無線電頻率

RMS：均方根

SA：頻 譜分析儀

SFDR：無雜散動態範圍

VSA：向量訊號分析儀

Tektronix 聯絡方式：

東南亞國協/大洋洲 (65) 6356 3900
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
義大利* 00800 2255 4835
日本 81 (3) 67143010
盧森堡 +41 52 675 3777
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
挪威 800 16098
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
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
英國與愛爾蘭*00800 2255 4835
美國 1 800 833 9200

* 歐洲免付費電話，若沒接通，請撥：+41 52 675 3777

最後更新日 2013 年 6 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



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。

2016 年 5 月

48T-26923-5

Tektronix[®]