

# R&S®RTO 示波器

## 數位觸發技術優點

技術應用文章

**產品：**

R&S®RT2000 系列



## 您所面臨的挑戰...

現代電子設計的趨勢是將更多的功能融入到更小的空間。與此同時，處理器速度、時鐘和數據速率在提升，而信號電平在逐步降低。

所有這些發展都推動著元器件、電路板以及系統級測試需求的持續增長。

此宣傳單簡要概述了可滿足開發、驗證和優化電子設計時各項測試要求的羅德施瓦茨解決方案。

如需詳細了解這些解決方案，請訪問我們的網站：

[www.rohde-schwarz.com/electronic-design](http://www.rohde-schwarz.com/electronic-design)

觸發功能是示波器的關鍵性能，它使示波器能夠捕獲特定信號事件以便進行詳細分析，並提供重複波形的穩定顯示。

自上世紀 40 年代誕生以來，示波器觸發功能不斷得到增強。R&S®RTO 系列數字示波器的全數字觸發功能樹立了創新的里程碑，它在測量精度、波形捕獲密度和功能性方面為示波器用戶帶來顯著優勢。

本技術應用文章為您介紹了傳統觸發系統的工作原理，並闡釋了 RTO 示波器實時數字觸發的優點。

# 1 傳統觸發系統原理

## 1.1 示波器的觸發功能的作用

示波器的觸發系統基本上有兩個主要應用：

### 1. 確保穩定顯示

對於電氣和電子信號測量調試工具的示波器，觸發功能的發明是一項突破。觸發功能能夠穩定地顯示重複的周期性信號。

### 2. 顯示具有特定特徵的信號

觸發可以對特定波形事件做出反應。這有利於隔離和顯示特定信號特徵，諸如未達到脈衝高度的邏輯電平（“矮脈衝”），由串擾引起的信號干擾（例如“毛刺”），低邊緣觸發（“上升沿時間”）或通道間的無效定時（“Data2Clk”）。觸發功能的數量和觸發設置靈活性多年來一直在加強。

觸發系統的精度以及靈活性，決定了示波器是否能夠準確地顯示和分析測量信號。

## 1.2 傳統觸發系統應用

如今，大多示波器為數位示波器，這意味著測量信號被採樣，並且作為連續的一組數字值被保存。然而，負責檢測信號電平的觸發器仍然使用處理原始測量信號的模擬電路。

圖 1 顯示簡化的數位示波器方框圖。

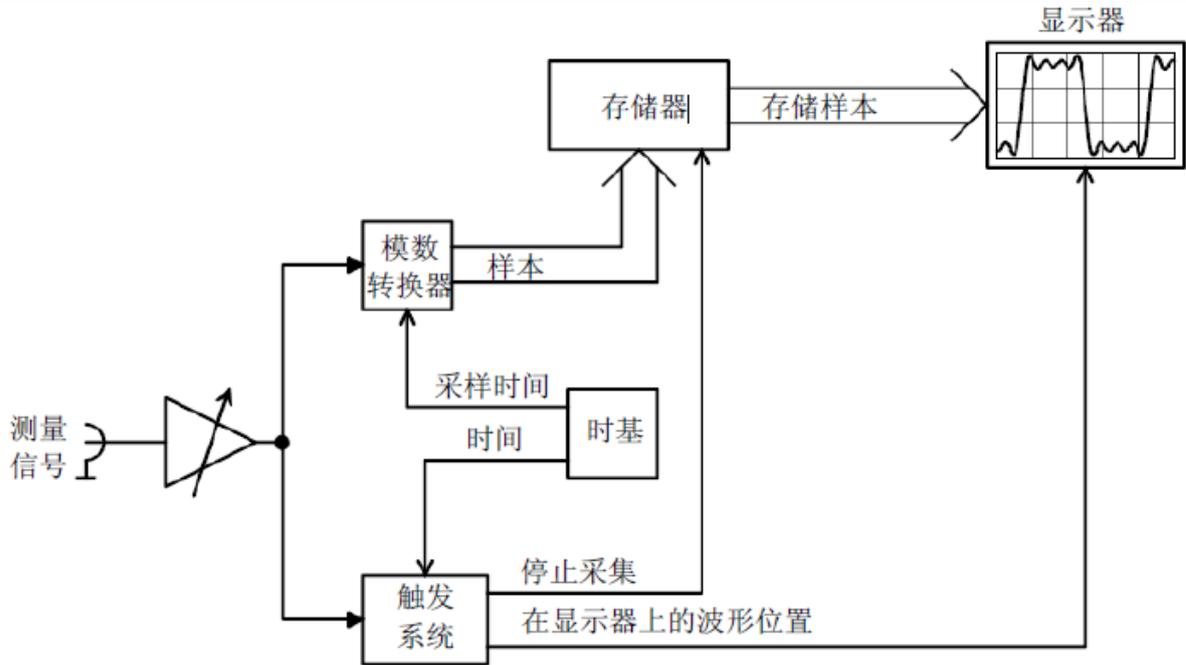


圖 1：採用模擬觸發單元的數字示波器的簡化方框圖

輸入放大器用於調節被測信號，以便分別將被測信號的幅度調整到 A/D 轉換器的工作範圍，並適合示波器顯示。調節後的信號經放大器輸出，並行傳遞到 A/D 轉換器和觸發系統。A/D 轉換器在一條路徑上採樣測量信號，數字化的樣本值被寫入採集儲存器。觸發系統在另一條路徑上將該信號與有效觸發條件（例如，採用“邊沿”觸發的觸發電平）進行比較。

當有效觸發條件發生，完成記錄 A/D 轉換器樣本，採集的波形被進一步處理和顯示。

圖 2 舉例顯示採集樣點和顯示的波形。A/D 轉換的數字化樣本點在圖中以圓圈標註。

本例中使用具有正斜率的觸發事件“邊沿”。測量信號跨越觸發電平產生合法觸發事件。

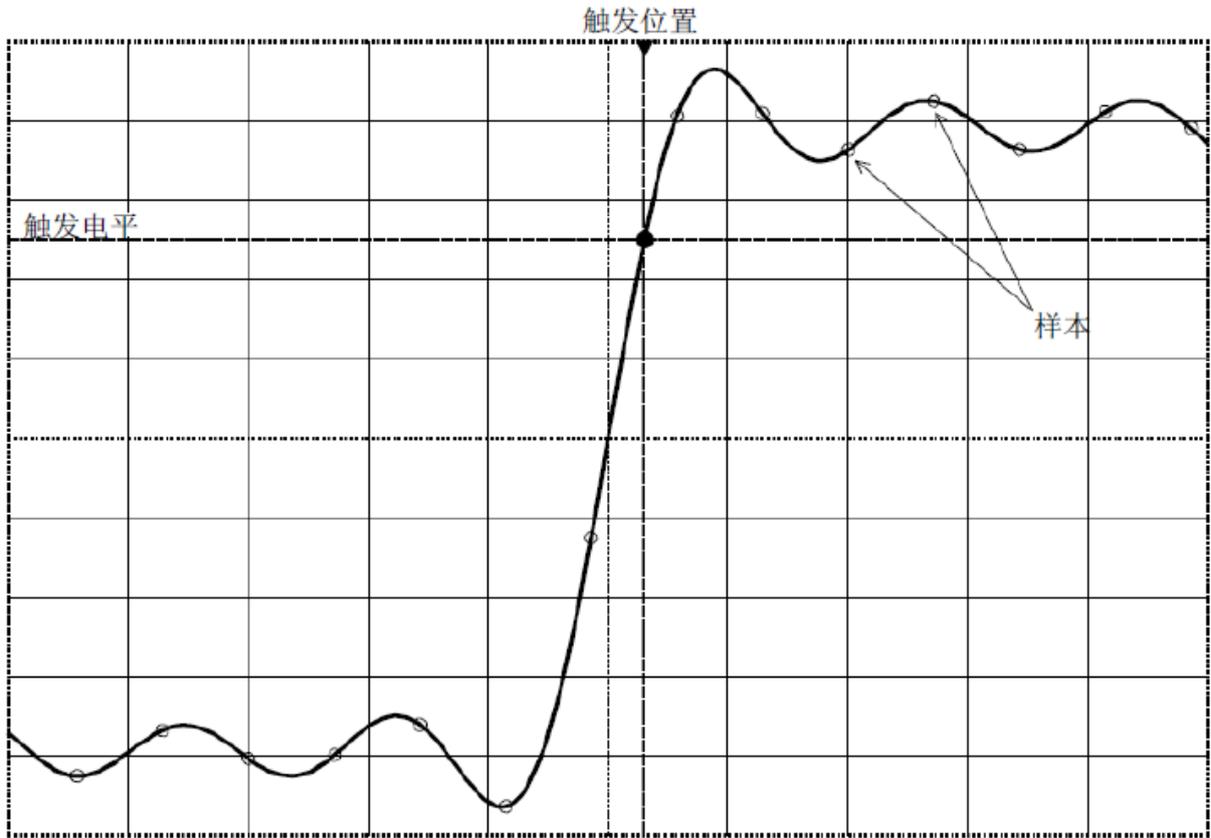


圖 2：具有 A/D 轉換器樣本和觸發點的測量信號舉例

### 1.3 模擬觸發器的缺點

為了在示波器上精確顯示信號，需要對觸發點進行精確定時。如果觸發時間測定不準確，顯示的波形不能與圖中的觸發點交叉（觸發電平和觸發位置的交叉點）。相關案例參閱圖 3。

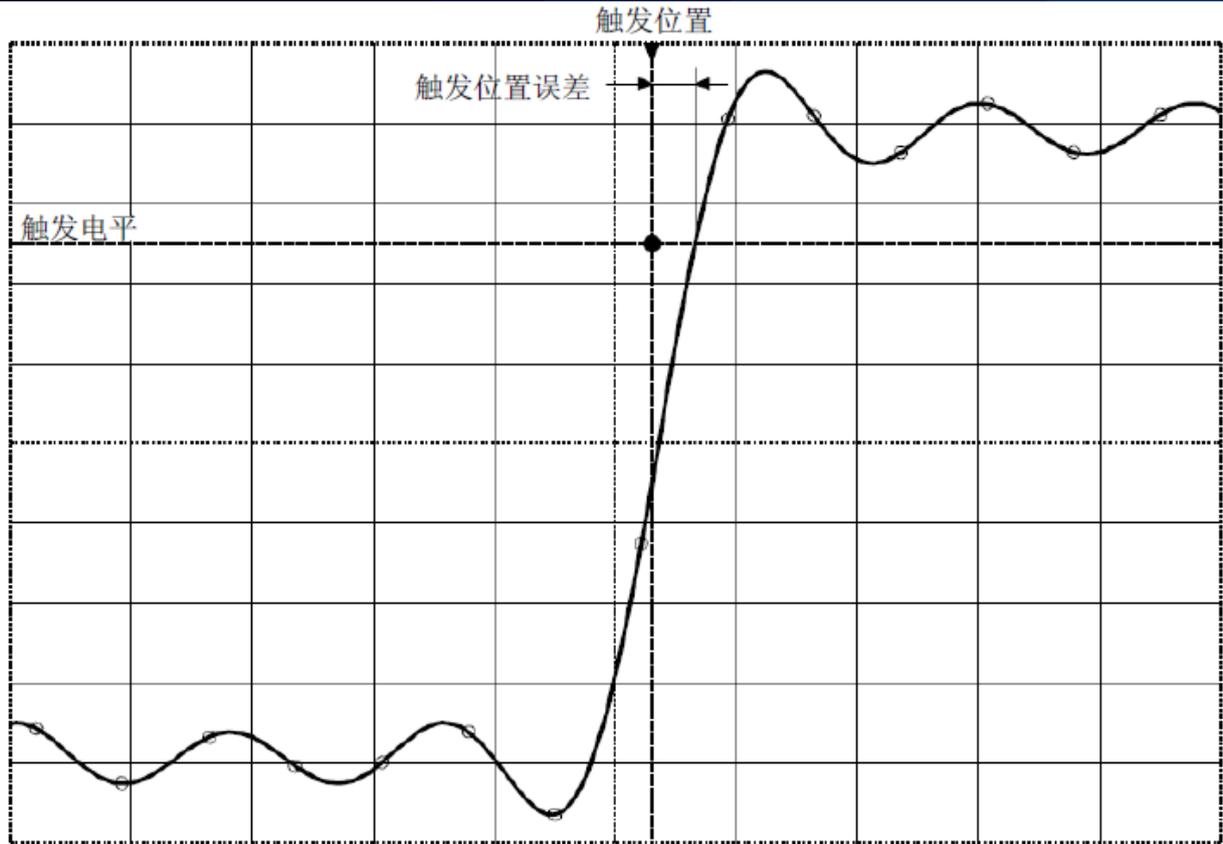


圖 3：顯示的波形和實際觸發位置不符的例子

下述原因會引起觸發位置失準：

1. 測量觸發邊沿不準確

在觸發系統中，測量信號經比較器與觸發門限進行比較。需要非常精確地測量比較器輸出中的邊沿定時。為此目的，我們應用時間數字轉換器（TDC）。TDC 不準確會導致個別顯示波形相對觸發點偏移。TDC 誤差的隨機分量引起在每個觸發事件上改變這個偏移，從而導致觸發抖動。

2. 測量信號兩條路徑中的系統誤差源

處理測量信號經過兩條不同路徑---使用 A/D 轉換器的採集路徑，以及觸發電路路徑（參閱圖 1）。兩條路徑包括不同的線性和非線性失真，這些失真引起顯示的信號和確定的觸發點間的系統性偏差。最糟糕情況是，觸發電路或許不響應有效觸發電平（儘管這些觸發電平可以在顯示器上看到），或者觸發電路對觸發事件做出響應，而這些觸發事件事實上不能被採集路徑捕獲和顯示。

測量兩條路徑中的信號噪聲源到 A/D 轉換器和到模擬觸發系統的兩條路徑上包括具有不同噪聲源的多個放大器。這再次導致在示波器屏幕上作為觸發位置偏移（觸發抖動）出現的延遲和幅度變異。觸發抖動，作為疊加的信號軌蹟的寬度和高度，

顯示在圖 4 右圖區域。

圖 4 的左圖顯示相對於理想觸發點，表現為隨機垂直和水平偏移的觸發抖動。

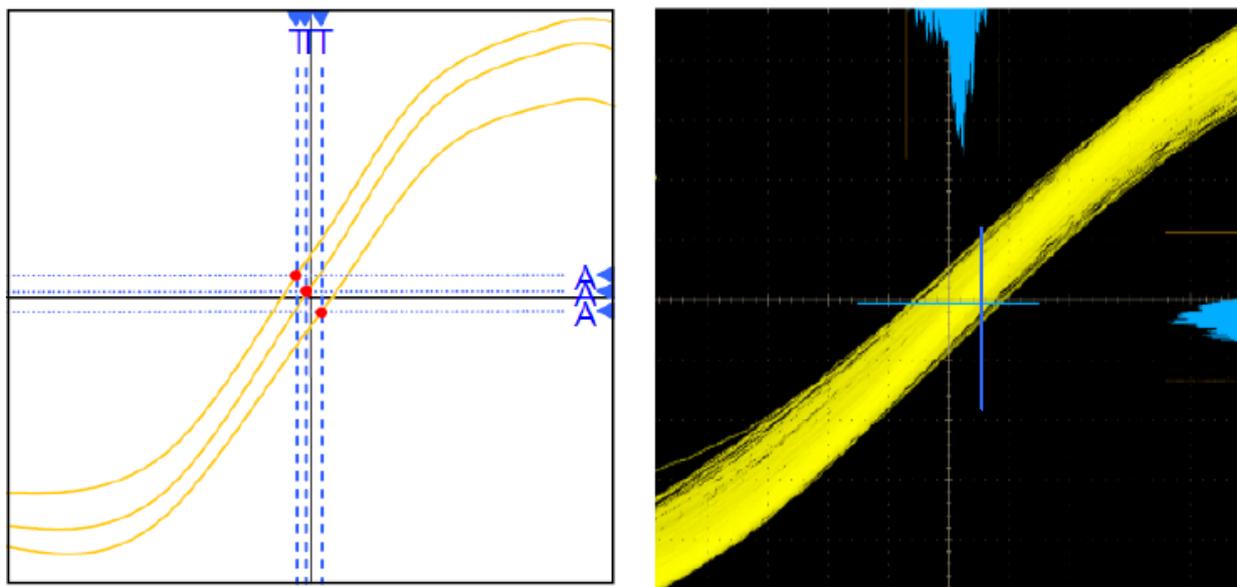


圖 4：在幾個波形採集期間的觸發抖動

下一章，我們將為您介紹數位方式實現的觸發系統。數位觸發由於不含上面討論的誤差項，因此能夠為示波器觸發提供更精確的方法。

## 2 數位觸發功能

### 2.1 數位觸發概念

圖 5 顯示採用數位觸發的數字示波器的簡化方框圖。

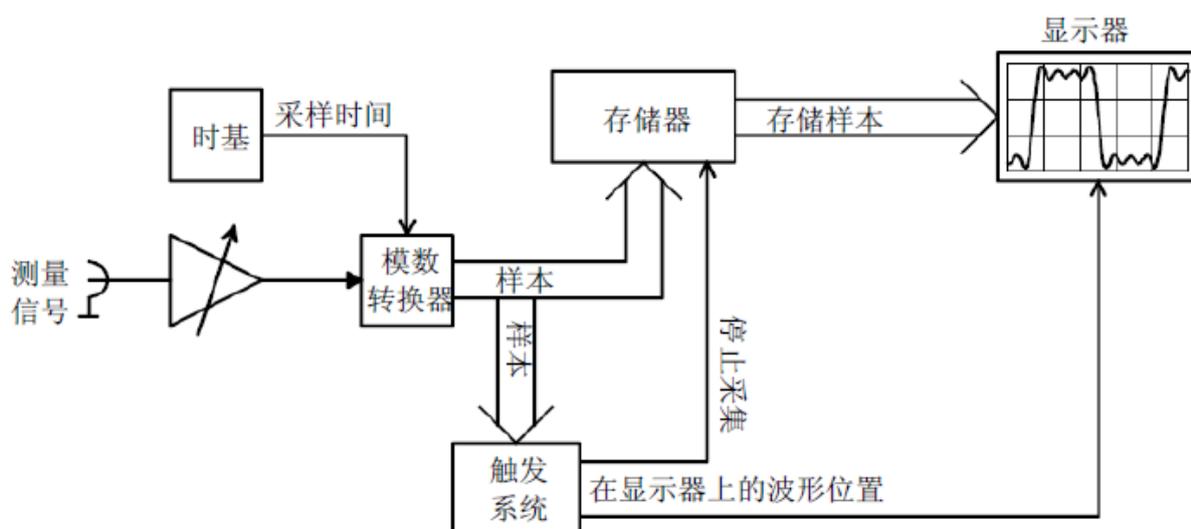


圖 5：採用數位方式實現觸發功能的數位示波器方框圖

與模擬觸發不同，數字觸發系統直接在 A/D 轉換器的樣本上工作。測量信號不會被分裂至兩個路徑上。因此，數字觸發處理的是被採集和顯示的同一信號。在第 1-3 節討論的模擬觸發系統誤差已在設計上消除。

數位觸發技術使用數字信號處理方法進行觸發點測定。以精確的算法檢測有效觸發事件並精確測量時間。

數位觸發技術面臨的挑戰是對測量信號無縫監測的實時信號處理能力。R&S®RTO 數位觸發器基於 10 Gsample/s 的 A/D 轉換器工作，因此必須處理 80Gbit/s 數據（8 位 A/D 轉換器）。

由於數位觸發技術使用與採集單元相同的數字化數據，因此要切記其只對模數轉換器範圍內的信號觸發。

## 2.2 採用數位觸發技術檢測觸發事件

對於選定的觸發事件，首先，比較器將測量信號與規定的觸發門限進行對比。在最簡單的情況下，“邊沿”觸發，當信號在要求的方向上（下降或上升）跨越觸發門限時，觸發事件被檢測到。

在數位系統中，信號由樣本表示。採樣理論規定採樣率需比最大信號頻率快至少兩倍。只有在這樣的條件下信號才有可能被完整重建。

從圖 2 和圖 3 可以看到，僅觀察 A/D 轉換器樣本並不足以看到所有信號細節。這種情況同樣適用於數位觸發器：純粹根據 A/D 轉換器樣本的觸發決策是不充分的，因為跨越觸發門限有可能被漏掉。因此，通過使用內插算法上調採樣信號採樣率到 20Gs/s，可以增加定時分辨率（參閱圖 6）。在內插器後面，比較器將樣本值與規定的觸發門限進行比較。如果檢測到觸發電平，比較器即改變輸出電平。

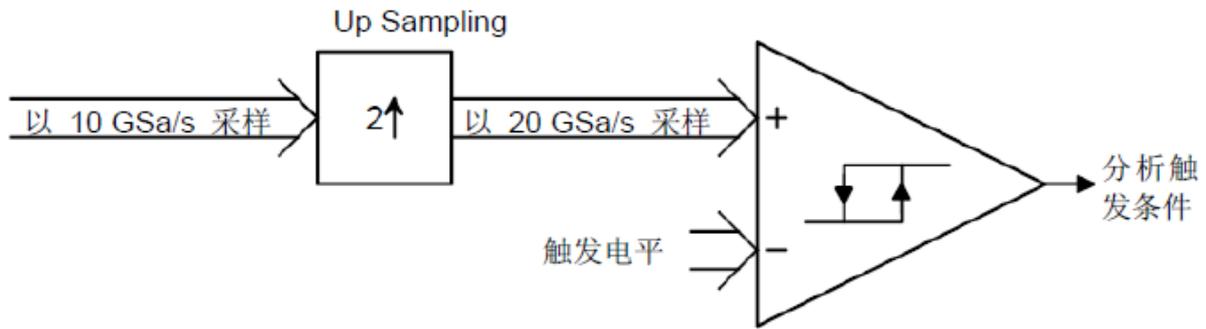


圖 6：在數位觸發系統中通過“up-sampling”方法增加採樣率

圖 7 通過採用 up sampling 方法將採樣分辨率提高 1 倍，信號中的“盲”區縮小。左側波形樣本不含過衝。高於 A/D 轉換器樣本的觸發門限無法檢測過衝。右側通過內插將波形採樣率實現翻倍。如此便有可能實現過衝觸發。

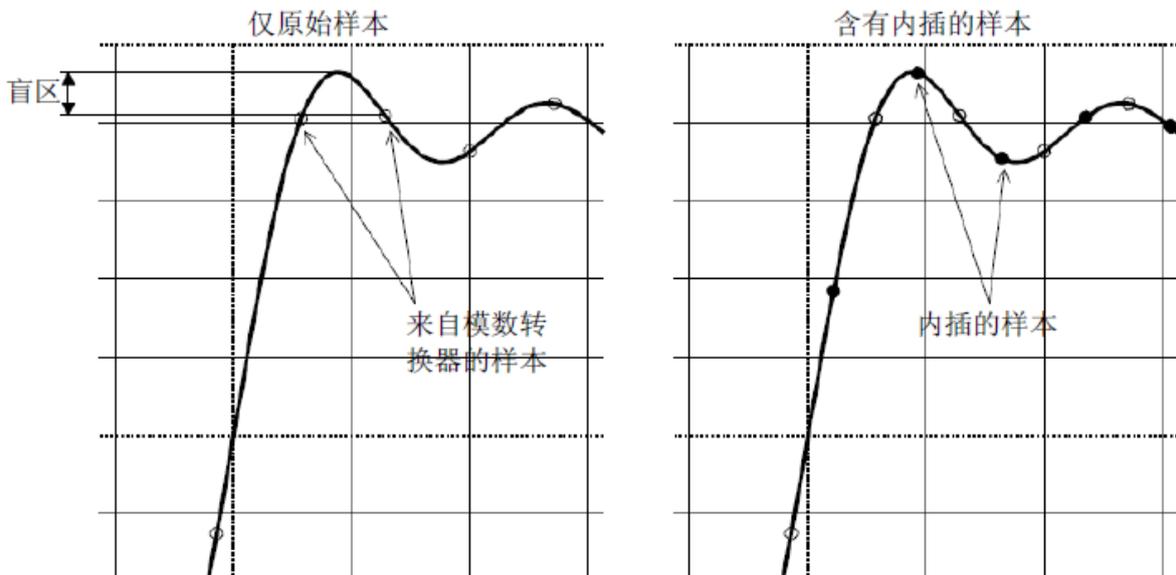


圖 7：增加採樣分辨率限制盲觸發區域舉例

此例中波形最大頻率為 3.5GHz。該例表明 R&S RTO 的數字觸發系統基於 10Gsample/s A/D 轉換器速率也能夠可靠檢測出的更高頻率分量信號。

## 2.3 用數位觸發系統確定觸發定時

在任意時間點有效重建測量信號的關鍵要求是滿足採樣定理（奈奎斯特准則）。RTO 使用多相濾波器，這些濾波器能夠在任何定時點，以大於 90dB 的信噪比（SNR）計算出測量信號。使用精度為 250fs 的迭代方法，實時計算出測量信號和觸發門限的交叉點。

某些諸如“毛刺”或“脈衝寬度”類觸發事件以定時條件為基礎。正如 RTO 實時確定門限中的交叉點一樣，RTO 支持對這類事件非常精確的觸發。能夠以 1ps 分辨率建立觸發事件定時，指定的最窄可檢測脈衝寬度為 100ps。

## 3 RTO 數字觸發技術的優點

### 3.1 實時採集中的低觸發抖動

在採集和觸發過程中使用相同樣本值，使 R&S RTO 僅可能出現低於 1ps rms 的超低觸發抖動<sup>1</sup>。圖 8 顯示在觸發點採用 10MHz 時鐘信號（該信號上升時間為 400ps）測定觸發抖動實例。

正如在第 2-1 節討論的，R&S RTO 實時數字觸發單元是在 A/D 轉換器和採集存儲器間的處理路徑中實現的。不像使用後處理方法實現的“軟件增強”觸發系統，在採集每個波形後 R&S RTO 實時數字觸發單元不需要額外的處理信號需要的盲區時段。

最低觸發抖動和每秒 1 百萬波形的最大採集和分析速率由 RTO 首次作為標準採集模式的一部分。

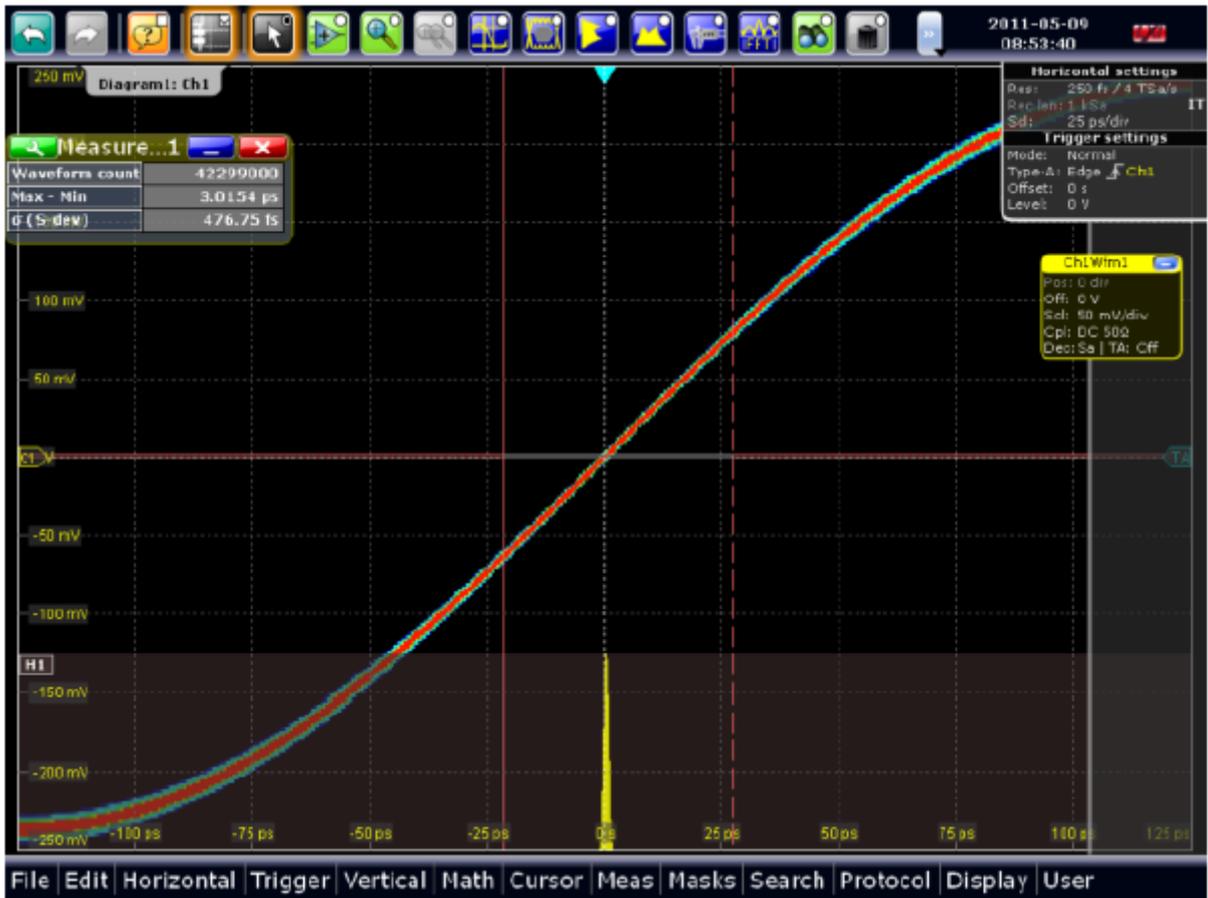


圖 8：採用 2GHz、峰峰值振幅 500mV 正弦波信號測定的內在觸發抖動



應用提示

R&S RTO 示波器的 OCXO 選件可將時基精度提高到  $\pm 0.2$  ppm。這對於需要長存儲採集，高觸發偏移的採集，或罕見觸發事件間的時間關係應用都是十分有效的。

### 3.2 優化的觸發靈敏度

對於觸發靈敏度有兩個相互矛盾的要求。噪聲信號的穩定觸發，要求觸發系統在觸發門限周圍實現一定遲滯（參閱圖 9）。另一方面，對於小振幅信號，較大的遲滯又會限制觸發系統的靈敏度。

傳統示波器的觸發靈敏度一般限制到一個垂直刻度以上。此外，噪聲信號的穩定觸發，採用“噪聲抑制”模式可以選擇較大的遲滯。

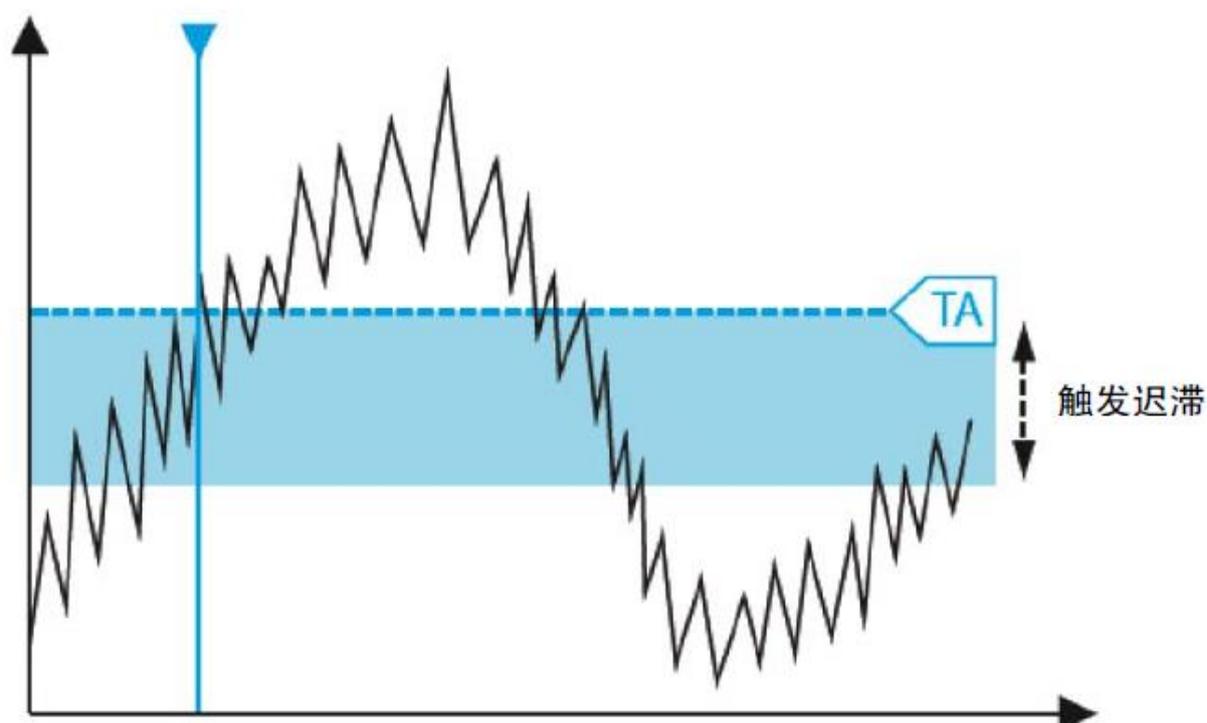


圖 9：觸發電平遲滯能夠實現對噪聲信號的穩定觸發

R&S RTO 的數字觸發系統允許從 0 到 5 個格的特殊觸發遲滯設置，以便根據圖 10 中的相應信號特徵優化觸發靈敏度。

- 採用“Auto”遲滯模式，R&S RTO 的固件根據使用垂直刻度確定相關遲滯。
- “Manual”遲滯模式支持手動增大遲滯，以便對具有高噪聲電平的信號進行穩定觸發（參閱圖 9）。
- 將遲滯設置為 0 可以為快速邊沿信號提供最高的觸發靈敏度。

提到觸發靈敏度，我們就不得不提到 R&S RTO 的另一個優點，即低噪聲前端使精確觸發下延到 1mV/div，且沒有帶寬限制。



圖 10：RTO 觸發門限遲滯可以自由設定。最高靈敏度設置為 0。

### 3.3 最小可檢測脈衝寬度

觸發系統的另一個關鍵參數是最小可檢測脈衝寬度。它與示波器能夠檢測到並產生觸發的最窄脈衝相對應。R&S RTO 系列支持對脈衝、毛刺、間隔和小至 100ps 的上升/下降時間進行穩定觸發。

圖 11 顯示對設置為窄於 100ps 的脈衝寬度進行穩定觸發的例子。在這個例子中，用頻率為 1GHz、小振幅為 +/-200mV 的正弦波演示 R&S RTO 的觸發靈敏度。在正弦波中，信號頂部和底部可以找到小脈衝寬度條件。這個特例的重要性在於因為正弦波頂部斜坡非常淺，需要將觸發遲滯設置為 0。

在圖 11 中，可以看到所有採集的波形滿足脈衝寬度窄於 100ps 的觸發條件。

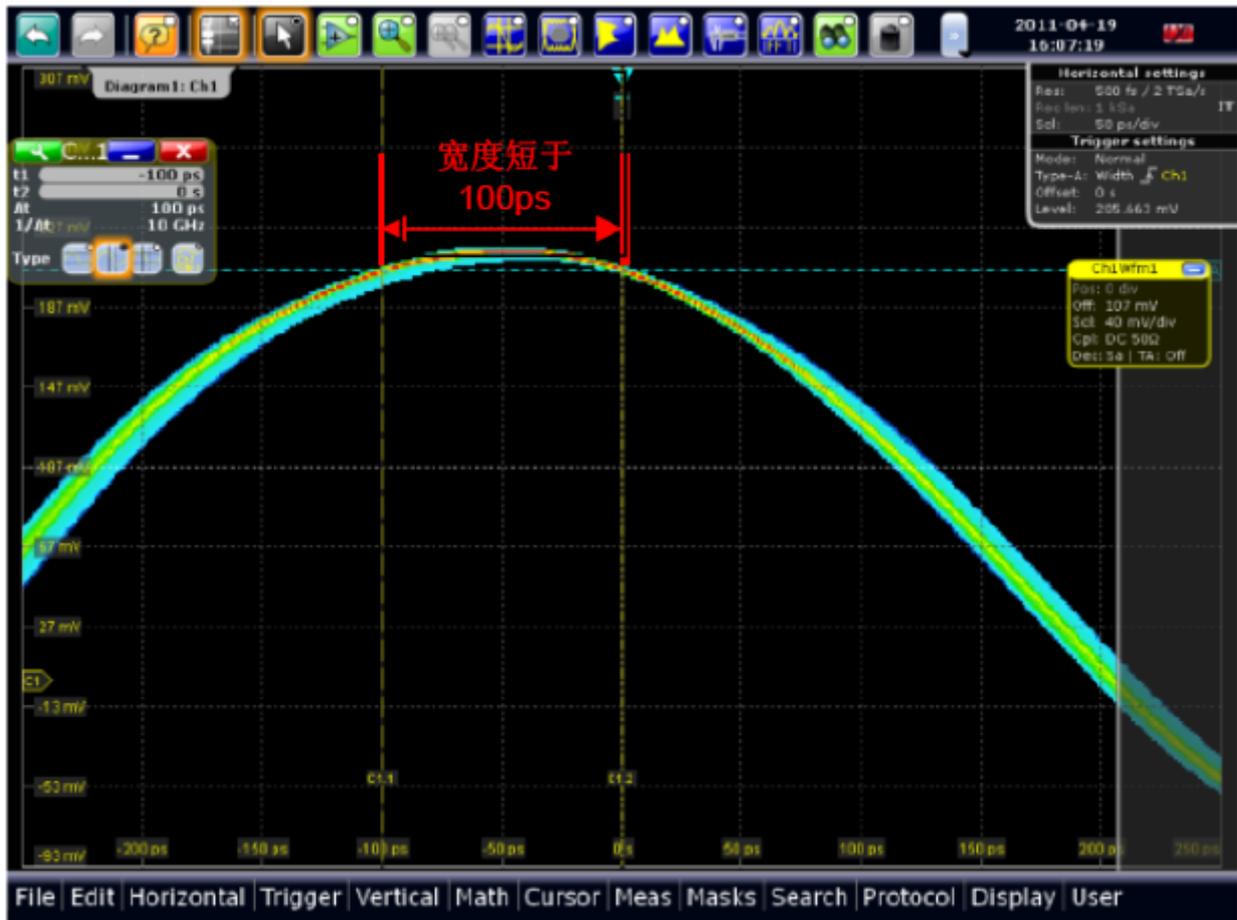


圖 11：採用設置到窄於 100ps 脈衝寬度觸發

### 3.4 觸發事件無遺漏

觸發判決後模擬觸發電路需要一些時間，以便在觸發電路能夠再次觸發前對其進行重新設置。在這個重新設置期間，示波器不能響應新的觸發事件---即重新設置期間發生的觸發事件被遺漏。

與之不同，R&S RTO 示波器的數字觸發系統能夠用時間數字轉換器

(Time-to-Digital-Converters, TDC) 在 400ps 間隔內 (參閱圖 12)，以 250fs 分辨率，測定各個觸發事件。這對於複雜觸發條件的應用很重要，例如使用事件計數條件的觸發釋抑 (hold-off)，或 A-B 觸發序列，觸發前需要若干 B 事件。

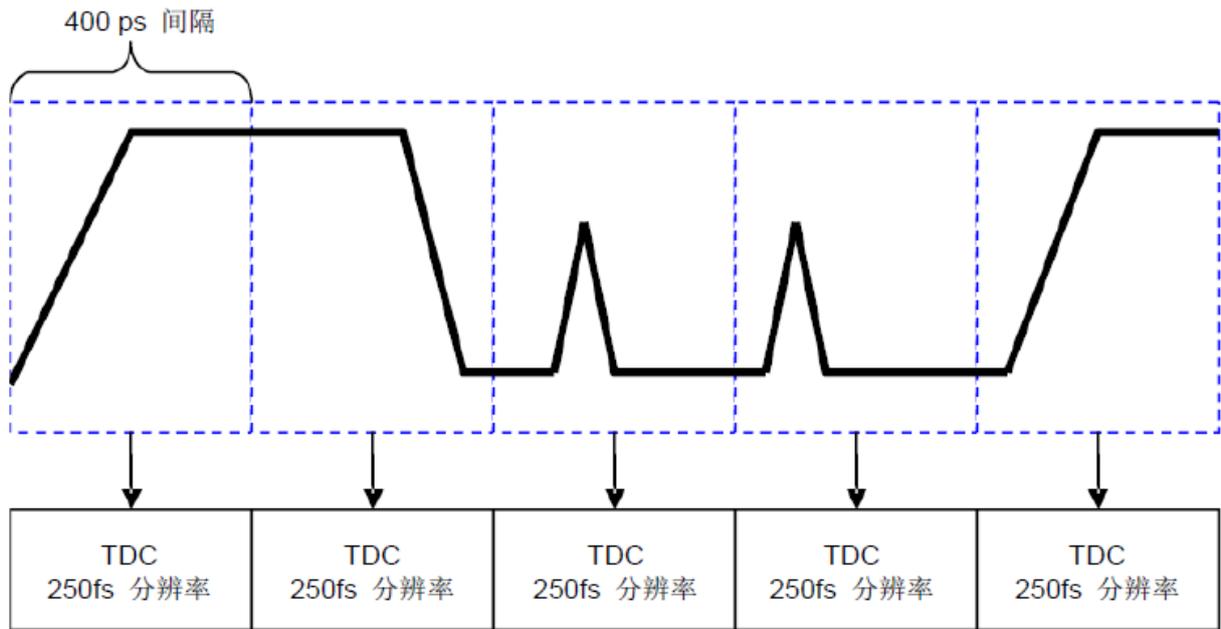


圖 12：RTO 觸發系統能夠在 400ps 間隔內，以 250fs 分辨率檢測觸發事件



應用提示

採用最小 300ns 盲區時間的超分割（ultra-segmented）模式支持快速重複觸發事件採集。

### 3.5 靈活的觸發信號濾波

R&S®RTO 示波器系列中的採集和觸發專用集成電路 (ASIC) 支持實時路徑中數位低通濾波器截止頻率的靈活設置。相同濾波器設置可用於觸發信號或測量信號（參閱圖 13）。出於觸發目的對觸發信號的低通濾波僅抑制高頻噪聲，而與此同時捕獲和顯示未濾波的測量信號。

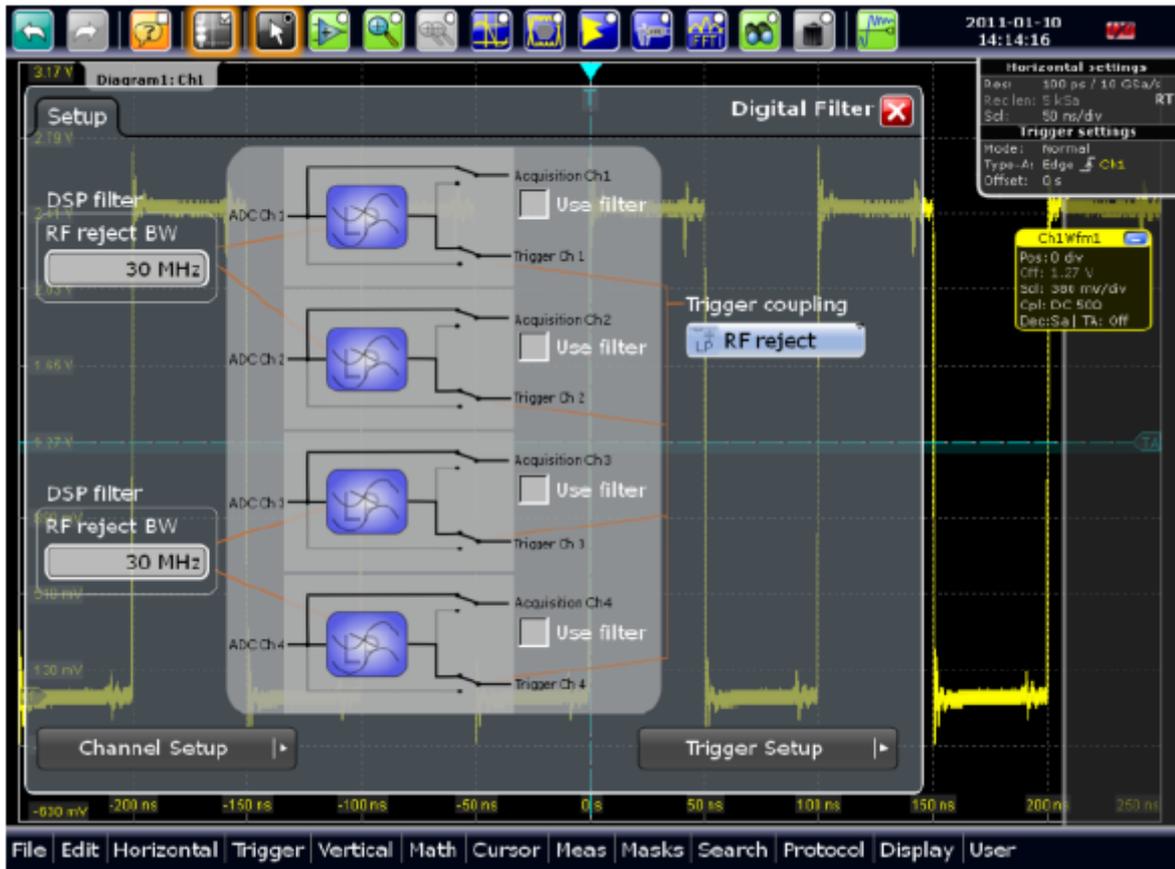


圖 13：靈活的採集和觸發信號濾波器定義

圖 14 為相關應用舉例。用戶在此施加矮脈衝 (Runt) 觸發來捕獲低於 1 邏輯電平的數據脈衝。因為跨越矮脈衝窗口的高定向上沖，設置 Runt 觸發門限是非常困難的。僅對觸發信號應用低通濾波器不失為一條解決途徑。這樣我們就可以對原始和未修飾的測量信號進行分析。

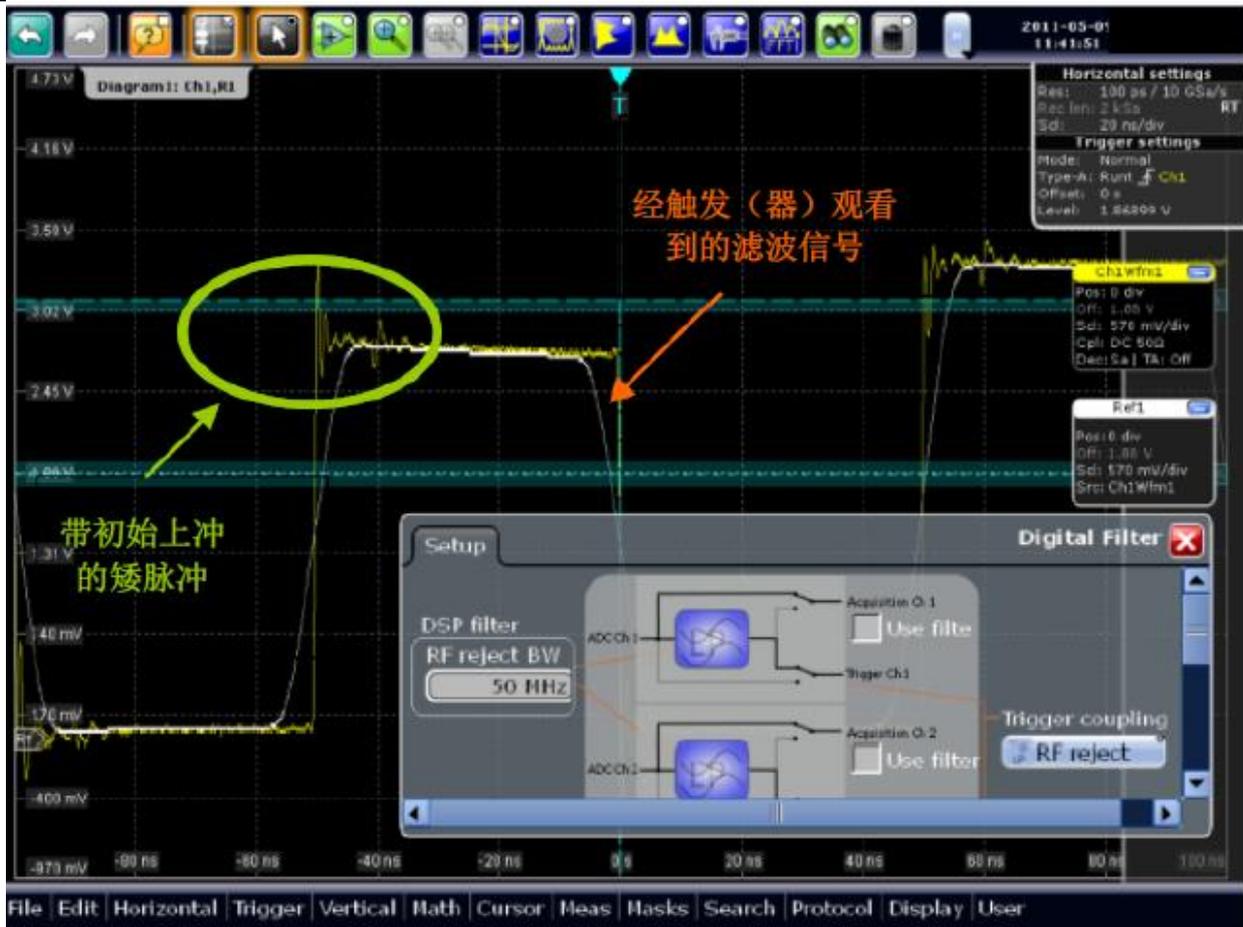


圖 14：矮脈衝觸發，通過對觸發信號應用低通濾波抑制快速定向上

### 3.6 由觸發單元辨別通道延遲

示波器輸入通道間的定時關係（延遲時間）對於測量以及對於兩個或多個信號間的觸發條件是至關重要的。不同電纜長度、探頭或探測點位置也會在通道間引起延遲。標準數字示波器提供信號延遲校準功能（De-skew），以補償在不同輸入上的延遲。延遲校準一般在 A/D 轉換器後的採集路徑中處理，因此不能被標準模擬觸發器看到。這會在屏幕中顯示不一致的信號，從而導致觸發系統測定信號不一致。

採用 R&S®RTO 數字示波器，採集單元和觸發單元使用相同的經過數字化處理的數據（參閱圖 15）。因此，即使使用通道延遲校準，顯示器上所看到的波形和由觸發單元處理過的信號也是一致的。因為 RTO 使用數字延遲濾波器，可以以 1ps 步長設置延遲校準。

多個通道間設定觸發條件的例子包括：對一條通道上（例如以“邊沿”為）觸發條件的觸發和對其他通道上某種電平組合（“高”或“低”狀態）的觸發。



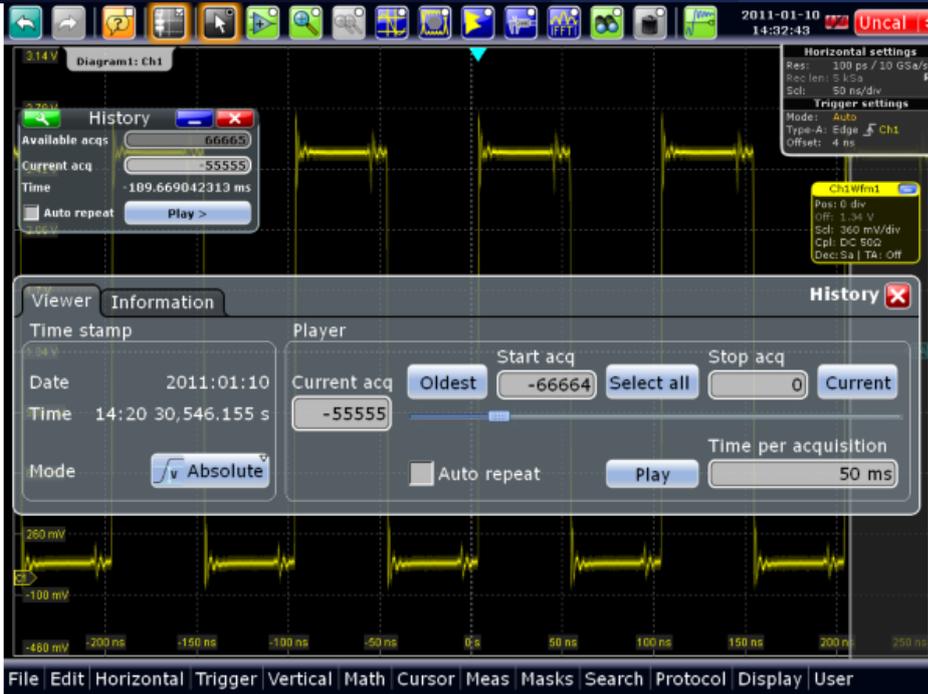


圖 16：歷史查看工具可訪問採集存儲器中所有波形

## 結論

本技術應用文章對比傳統模擬觸發，討論了數字觸發技術的優點。數字觸發技術可直接在 A/D 轉換器樣本上操作。這個架構為採集和觸發數據提供一致的定時，提供更精確的測量結果。

R&S®RTO 數字示波器的特點是實時數字觸發。在提供非常高的波形捕獲率和分析速率的同時，它產生的觸發抖動非常低。

由於在整個帶寬上的高觸發靈敏度以及使用針對觸發信號的可調數字濾波器，R&S RTO 數字觸發技術能夠實現更加精確的測量。

這些優點結合其他特點，如模擬前端的高動態範圍（ENOB）、高波形捕獲率和分析速率以及直觀的用戶界面，使 RTO 示波器成為強有力的測試和分析工具。