

時域與頻域的抖動測量

高速資料鏈路使得存取資訊的速度大幅提升。
這使得系統設計人員從初始設計、測試到標準遵從，
各個應用層都面臨著更種技術挑戰。

作者：Brijesh A Shah

在今天，我們存取資訊的速度大幅提升，如我們在實際網路上接入視訊流、利用各種雲端應用等。這個超快世界構建的基礎就是高速資料鏈路。系統設計人員在從初始設計及測試到標準遵從等各個應用層面臨著多種技術挑戰。

他們必須克服的挑戰之一，就是指定工作能力足以滿足多種相關串列通訊標準（如PCI-Express、USB、乙太網路、SATA及Infiniband）需求的時脈產生及分配元件。

市場上有不同類型的時脈源及分配元件。根據性能，這些元件通常可以分類如下：

1. 標準性能 - 針對消費性電子產品等應用，通常以時域抖動參數來指定；
2. 高性能 - 須以頻域參數來指定。時域參數在這類應用不適用，因為時域儀器呈現出更高的底噪。應用最廣泛的頻域參數是相位雜訊及相位抖動。

關鍵抖動技術

抖動可以定義為「數位信號在有效瞬間離其理想位置的短期非累積型偏移」或「時脈沿到達時間與其實際或預計到達時間的差值」。根據不同的測量技術及應用要求，高速設計中常用一系列的行業術語。

根據應用要求，抖動在時域或在頻域測量。

時域抖動參數包括：

1. 逐週期抖動 - 此參數測量一定數量週期（如1k或10k個週期）內相鄰週期的時脈週期差異。對於不能接受頻率或週期突然變化的應用而言，這是個重要參數；
2. 峰值至峰值抖動 - 這類抖動提供一定數量週期內最大週期與最小週期之間的差異；
3. 時間間隔誤差 (TIE) - 測量各個週期之時脈週期相對理想時脈週期的差異。

頻域抖動參數則如下：

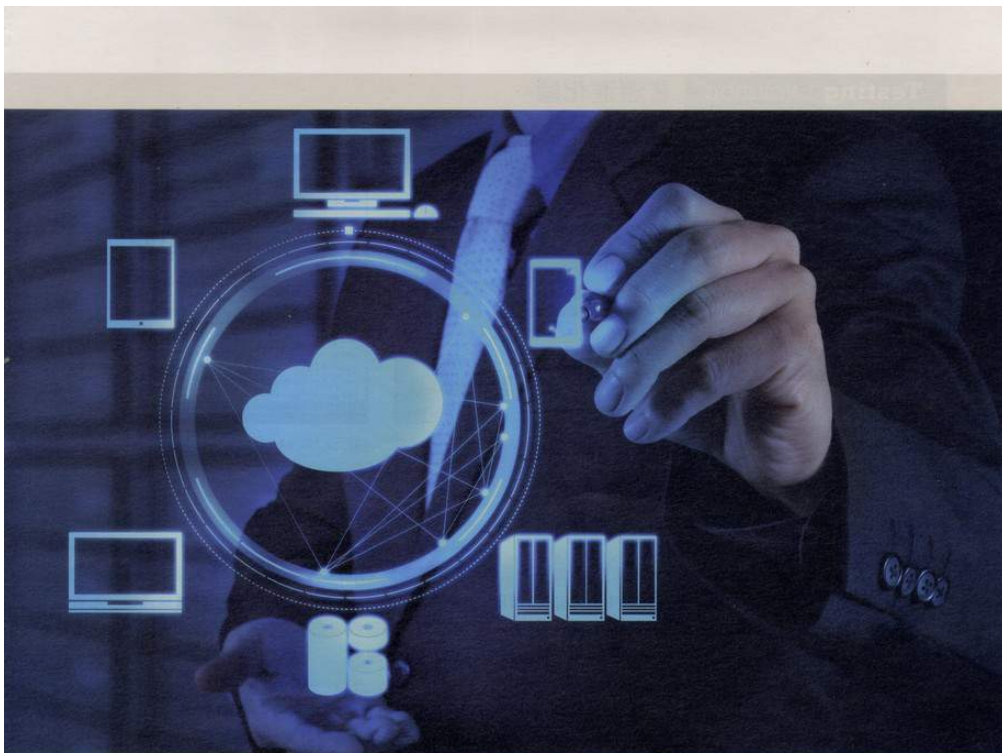
相位抖動 - 相位抖動是在一定偏移頻率範圍內在頻域測量的跟時域等同的整合相位雜訊。

測量裝置

時域裝置(如高頻示波器)可以測量逐週期抖動、週期抖動及TIE，以及進行逐週期、標準偏差等不同表徵之測量數據的統計分析。時域測量捕獲所有頻率的抖動(限制在時域的訊號在頻域無限制)，使用數學模型，可以基於時域參數近似獲得頻域參數。可以應用快速傅立葉變換(FFT)及濾波來進行這些近似計算。時域測量對數據相關型抖動(通常在本質上呈現週期性)有用，但前面提到的時域儀器底噪通常高於頻域儀器。相位雜訊分析儀及頻譜分析儀通常用於頻域測量。

抖動源

知道實際抖動源有利於弄清不同頻率範圍內的關鍵抖動來源因素，以及預測測量方法的準確度。時脈產生器本身可能



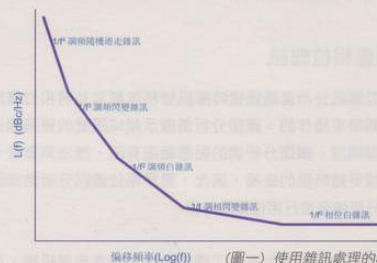
固有時脈訊號抖動，或者，它也可能被電路板、甚至是它正在被測量的環境中的周圍元件影響。

抖動的產生原因可以分為兩類：

1. 隨機抖動 - 隨機抖動成分是時脈產生元件的固有雜訊/抖動。它主要是由元件中的熱雜訊、散粒雜訊 (shot noise) 或閃變雜訊。數百飛秒 (fs) 的隨機抖動無法使用示波器來測量，因為儀器的底噪相比高得多 (約 1 ps)。當測量較低的隨機雜訊時，推薦使用訊號源或相位雜訊分析儀。
2. 確定性抖動 - 確定性抖動成分是由電源、交流磁場或時脈產生器印刷電路板 (PCB) 上運行的高速半導體元件的干擾導致的。確定性抖動通常是週期性及窄帶抖動。

相位雜訊圖

相位雜訊圖是單邊頻譜，顯示某個頻帶載波訊號的雜訊功率密度。它能使用冪律 (power-law) 雜訊處理來建模。圖一揭示了寬頻率範圍的相位雜訊將怎樣被特定雜訊處理主導。

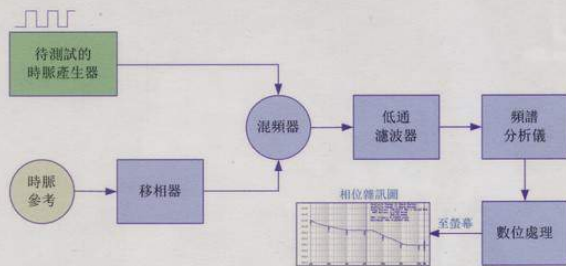


(圖一) 使用雜訊處理的相位雜訊圖

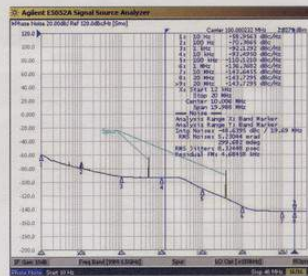
這些處理包括：

調頻 (FM) 隨機遊走雜訊 ($1/f^4$) - 出現在低頻，此雜訊主要由示波器的物理條件導致 (溫度變化、機械撞擊及振動都對其長期工作性能有影響)。

調頻閃變雜訊 ($1/f^3$) - 通常跟時脈產生器中使用的元件 (如電源、振盪器等) 的機械諧振有關。高品質振盪器中，此雜訊會被標示為調頻白雜訊 ($1/f^2$) 或調相閃變 ($1/f$) 雜訊。



(圖二) 相位雜訊測量



(圖三) 100 MHz訊號的相位雜訊圖。

調頻白雜訊 ($1/f^2$) - 常見於使用無源諧振頻率作參考的時脈產生器，如外部晶體參考。

調相 (PM) 閃變雜訊 ($1/f$) - 通常由產生器內元件 (如用於訊號放大的雜訊放大器或頻率乘法器) 的乘法效應導致。可以通過良好構思設計及審慎選擇元件來降低這種雜訊。

調相白雜訊 ($1/f^0$) - 主要由內部元件的熱雜訊導致，本質上是寬頻。同樣可以通過審慎選擇元件及在輸出使用窄帶濾波來降低這種雜訊。

測量相位雜訊

相位雜訊分析是透過從時脈訊號移除載波並將相位雜訊留在頻帶來操作的。頻譜分析儀顯示頻域訊號的雙邊頻譜或全部頻譜。頻譜分析儀的動態範圍有限，無法測量數十飛秒或更短時間的底噪，因此，需要相位雜訊分析儀或訊號源分析儀來進行相位雜訊分析。

如圖二所示，圖中產生了精確的載波頻率參考訊號，並移相至與載波訊號混頻。這就消除了載波頻率的頻譜能量。混頻器輸出透過低通濾波器傳送給頻譜分析儀，用於測量雜訊頻譜密度。進一步處理後，與載波功率頻譜密度直接相關的單邊雜訊頻譜顯示在篩檢程式螢幕上。

在圖三中，相位雜訊圖從10Hz參考頻率偏移開始，增加至40MHz。此圖歸一為載波頻率的載波頻譜能量，提供寬動態範圍以測量及顯示相位雜訊。所需偏移頻率範圍內的相位抖動可以通過對這些頻率上相位雜訊進行積分來計算，計算也可以包括其他邊的雜訊成分。

還應該提及其他幾種抖動現象。毛刺 (spur) 的存在實際上很普遍。在圖三所示的相位雜訊圖中，不同的偏移頻率都出現了毛刺 (spur-1及spur-2)。毛刺是週期性的，毛刺可能源自元件自身，或是測量設置中的其他源頭。毛刺頻率能夠與其成因關聯起來，如果它們源自外部環境，就可以採取預防措施。

然而，如果元件包含特定頻率的抖動，就可能損及其效用。使用簡單的數學計算，可以單獨計算出均方根(RMS)抖動中各個毛刺的成分。任何低於載波頻率10 Hz偏移頻率的抖動都稱作漂移(wander)。

由於漂移是低頻抖動，它不會給鎖相環 (PLL) 造成問題，因為PLL帶寬能夠超過漂移。由於漂移對眾多應用並不重要，相位雜訊圖就從10Hz的最小偏移頻率開始，並延伸至20至40MHz。上限通常由訊號源分析儀的內置濾波器設定。

結語

標準性能時脈根據週期抖動、峰值至峰值抖動及TIE等時域參數來指定。在消費類應用中驗證這些參數就足夠了。但超出這個範疇，情況就不一樣了。當為非消費類系統設計指定高性能時脈元件時，時域儀器的底噪問題使得有必要使用頻域測量 (如相位雜訊)。

相位雜訊圖能夠詳細描繪給定頻帶內各種雜訊源的影響。瞭解毛刺及漂移等其他抖動現象，進一步幫助提升測量精度，因而有可能選擇符合特定應用要求的恰當時脈產品。

(本文作者任職於安森美半導體)