

時序水平抖動的認識和特性分析

入門手冊

| | |
|--------------------------------|----|
| 目錄 | |
| 引言..... | 3 |
| 第一節：水平抖動的後果..... | 3 |
| 電腦匯流排設計..... | 3 |
| 串列資料鏈..... | 4 |
| 第二節：水平抖動到底是什麼？..... | 4 |
| 2.1 界定短期變化：水平抖動與漂動的區別..... | 4 |
| 2.2 界定有效瞬時：參考位準..... | 5 |
| 2.3 界定理想位置：時脈環原..... | 5 |
| 2.4 週期水平抖動、週期至週期水平抖動及 TIE..... | 6 |
| 第三節：水平抖動的量測和顯示..... | 8 |
| 3.1 水平抖動統計..... | 8 |
| 3.2 水平抖動長條圖..... | 8 |
| 3.3 水平抖動與時間的關係 (時間趨勢)..... | 10 |
| 3.4 水平抖動與時間的關係 (水平抖動頻譜)..... | 11 |
| 3.5 眼狀圖..... | 12 |
| 第四節：水平抖動隔離..... | 13 |
| 4.1 分解水平抖動之動機..... | 13 |
| 4.2 水平抖動模型..... | 13 |
| 4.2.1 隨機水平抖動..... | 14 |
| 4.2.2 確定性水平抖動..... | 15 |
| 4.2.3 週期性水平抖動..... | 15 |
| 4.2.4 與資料相關的水平抖動..... | 16 |
| 4.2.5 與工作週期相關的水平抖動..... | 16 |
| 4.2.6 有界不相關抖動..... | 17 |
| 4.2.7 基底水平抖動..... | 17 |
| 4.3 綜合顯示..... | 18 |
| 第五節：水平抖動與位元錯誤率的關係 (BER)..... | 20 |
| 5.1 水平抖動預算..... | 20 |
| 5.2 浴缸曲線..... | 21 |
| 5.3 BER 範例..... | 22 |
| 第六節：總結..... | 23 |
| 附錄 A：縮寫詞匯表..... | 23 |
| 參考文獻..... | 23 |

引言

所有使用電壓轉換來顯示時序資訊的電系統，都會攜帶「時序水平抖動」這個不受歡迎的伴侶。長久以來，電系統已透過使用較低的訊號傳輸速率，減少了時序水平抖動（或簡稱之水平抖動）的不良影響。因此，與被其破壞的時間間隔相比，由水平抖動誘發的錯誤尚屬無關大局。但與當今高速串列匯流排和資料鏈相關的時序餘裕卻告訴我們，設計人員需在整個系統設計階段更加嚴格的控制水平抖動。

當訊號速率攀升到 2 GHz 以上，以及爲了節省電能而一再縮小電壓振幅範圍時，系統中的時序水平抖動業已在訊號間隔中佔有相當大的百分比。在這些情況下，水平抖動已變成基本的效能極限。認識水平抖動，並知道如何對其進行鑒定，是成功的部署高速系統並使其能可靠的滿足效能要求的第一步。

我們將在第二節中更詳盡的說明水平抖動，但從概念上講，水平抖動乃是偏離其「正確」位置的時序邊緣。在基於時序的系統中，時序水平抖動是「不理想」之最明顯、最直接表現形式。作爲一種雜訊，水平抖動須被視爲一種隨機過程加以處理，並根據其統計情況進行鑒定。

如果您具備量測水平抖動統計數字的方法，您可在元件和系統之間進行比較，並依照所選限定條件進行比較。然而，只憑這一種方法，並不能使您對頂尖設計進行高效率的精煉和偵錯處理。只有透過水平抖動的徹底分析，才有可能隔離根源，從而使您能夠有系統地進行，而不是盲目的試著減少水平抖動。此類分析有水平抖動顯示和分解等形式，我們將在第三節和第四節中詳細論述。

雖然電和光水平抖動在原因、行爲和鑒定方面有許多類似之處，但量測光系統水平抖動所使用的設備與電系統不同。本文主要討論電系統中的水平抖動。

第一節：水平抖動的後果

「猜測很容易，猜錯有代價」— 中國諺語

您爲什麼應該關心水平抖動問題？水平抖動對系統效能有什麼影響？本節將詳述兩個實例，即高速電腦匯流排和串列資料鏈，並針對每一實例詳細說明水平抖動的具體影響。

電腦匯流排設計

假定您正在做一項新的嵌入式處理器設計，並在讀取快閃記憶體 (flash memory) 時，發現偶爾有資料錯誤。您懷疑，產生快閃記憶體的 chip enable (CE) 的位址解碼，在 write enable (WE) 的上昇邊緣不能滿足其設定時間要求。您隨後用高速示波器，透過探棒檢測 CE 和 WE 訊號，以觀察時序關係。經過十次單擊訊號擷取後，量測的持續時間爲 87 至 92 奈秒，每次都似乎有很好的餘裕，均在最低設定時間 75 奈秒以上。但合適的餘裕應爲多少？當您懷疑有時違反了設定時間要求時，這些時間是否足夠大，以消除疑慮？可能出現違反的時間百分比是多少？

待評估了幾百萬個無限累積模式的波形並看到設定時間短至 82 奈秒後，您斷定設定時間可能確實有問題。但這個問題源於何處？是系統時脈週期變化所致？還是位址解碼器中的變化引起的？抑或來自其他別的什麼地方？

串列資料鏈

您設計的 Gigabit Ethernet 實體層收發兩用晶片已臨近最後期限，而您對即將由外部測試公司進行的相容性測試有些忐忑不安，心中無底。因為根據標準文件的規格要求，設計人須量測相對於本機資料時脈的資料水平抖動，另還須量測相對於無水平抖動參考（不論為何種參考）的時脈水平抖動。在任何情形下，您都要確保有足夠的餘裕，以使鑒定試驗所用的部件能夠滿足相容性試驗的要求。

開始時，您可用示波器以無限累積模式，在資料時脈上檢查對峰水平抖動。有鑒於您可透過示波器在螢幕上界定長條圖框，您使用這一功能建立一個邊緣位置的長條圖（亦稱直方圖）。您發現的峰對峰值為 550 psec，而規格要求的值是不大於 300 psec。幸運的是，300 psec 之規格適用 5 kHz 高通濾波器濾波後的水平抖動。但不幸的是，您無從知道長條圖中的水平抖動的哪一部分是由於較低的頻率所致，因此可以忽略不計。

您於是著手檢視和該時脈有關的資料傳輸線上的水平抖動，並發現這一水平抖動亦過於接近規格限度。但您懷疑，這一水平抖動並非來自您設計的晶片，而很可能是因測試板在差動資料傳輸線佈線方面沒有採用良好的設計作法而夾帶進來的。雖然您知道測試板上的交換式電源可能是問題的起因，但您需確定，測定的水平抖動有多少來自於這一來源。

此例與前一實例都說明這樣一種情況，即高效能示波器有時甚至也不足以解答所有問題。若需對您的設計有充分的信心，您可能需要使用另外兩種工具：即某種進階的水平抖動分析途徑，級一種可準確的發現時序水平抖動基本原因和特徵的手段。

第二節：水平抖動到底是什麼？

SONET 規格¹對此提供了一個簡單而直觀的定義：

「水平抖動被定義為，數位訊號的有效瞬時在其時間裡想位置上的短期變化」。

這一定義界定了水平抖動的本質，但某些單獨的術語（如短期變化、有效瞬時、理想位置）還有待於更加具體，方能使該定義的含意在使用方面更為明確。

在各種實際應用中水平抖動都有一隨機分量，故須用統計學詞語予以確定。也就是說，必須要用平均值和標準偏差等度規、以及置信度區間 (confidence interval) 等限定條件，從而確立有意義且可重複的量測。對於下文所及統計數學基本概念的考證，已超出本文範圍，但有意進行深入研究的讀者可參照本文後面提供的書目提要。

2.1 界定短期變化水平抖動與漂動的區別

根據約定，時序變化被分為兩個類別，即水平抖動和漂動，這是基於一種對變化與時間之比值進行分析時，使用的傅立葉分析法 (3.3 - 3.4 節詳細敘述了這種分析法)。緩慢出現的時序變化被稱為漂動。水平抖動則用於描述出現的較快的時序變化。

根據 ITU² 的定義，漂動與水平抖動之間的臨界值為 10 Hz，但也可能會有其他定義。在許多情況下，漂動對串列通訊鏈幾乎沒有或完全沒有影響，因為串列通訊鏈的時脈還原電路能有效的消除漂動。

2.2 界定有效瞬時：參考位準

依照我們的定義，有效瞬時 (significant instant) 是指數位訊號中各種邏輯狀態之間的轉態或邊緣。具體而言，有效瞬時是轉態訊號越過選定的振幅臨界值 (可稱為參考位準或決定臨界值) 的時刻。對於雙位準訊號 (最常見情況) 而言，平均訊號電壓常常被用作這種參考位準。如果該相關訊號由 Schmitt 觸發器輸入接收，則最好在分析上升邊緣時使用一個參考位準，在分析下降邊緣時使用另一不同的參考位準。

在我們的定義中，數位訊號一詞或許有些樂觀，因為就高速迅號而言，轉態是受限於上升時間和轉換速率類比事件。在短而有限的時間內，即當訊號沿參考準上升時，任何對波形有破壞作用的電壓雜訊都將被成比例的轉換為時序水平抖動。

2.3 界定理想位置：時脈還原

在依照理想位置量測數位訊號的偏差之前，這些理想位置必須予以確定。就類時脈訊號 (交替的 1 和 0) 而言，概念上的理想位置應和無水平抖動的時脈相符，後者的平均頻率和相位應與測定值相同。如果是數位訊號，則須多加小心，因為當同一位元連續重複兩次以上時，不會出現任何事件 (轉態)。所謂時脈還原乃是指建立參考時脈時序之過程。

時脈還原之其中一種方法，是採用最小二乘方意義上最擬合所測事件的恆頻時脈。這意味，假定的參考時脈形式為：

$$A \cdot \sin(\omega_c t + \phi_c)$$

其中， ω_c 和 ϕ_c 為常數。所選常數應可使參考時脈之間的時間誤差平方和變為最小。在分析鄰接資料的有限長度塊時，這是很好的方法。如果資料的持續時間足夠長，所得水平抖動量測值中則可能包括漂動和水平抖動。在這種情況下，您隨後透過高通濾波器移除漂動分量。

另一有效的時脈還原方法，是透過鎖相迴路 (PLL)。PLL 可連續跟蹤所測資料符號率中的慢慢變化。因此，對於滯留在訊號上的水平抖動而言，可產生高通濾波器的作用。由於大多數數位通訊鏈路的接收機都使用 PLL，所以這一量測方法，在使用量測裝置模擬系統行為方面具有一定優勢。

為了保持量測的一致性和可重複性，許多資料通訊規範都要求使用 *golden PLL*。就此而論，*golden* 一詞指意味著 PLL 之特性已有精確的定義，並可得到嚴格的控制。如果在多個裝置上量測水平抖動時使用了某一符合這些規格的 PLL，水平抖動則可客觀的與那些準備使用這些裝置的系統進行比較，並與之進行邏輯關聯。

2.4 週期水平抖動、週期至週期水平抖動及 TIE

您可以使用幾種方法再單一波形上量測水平抖動。這些方法有：**週期水平抖動**、**週期至週期水平抖動**和**時間間隔誤差 (TIE)**。瞭解這些量測方法之間得關係及其量測結果，甚為重要。

圖 2.4a 所示為一個帶時序水平抖動的類時脈訊號。虛線代表理想的邊緣位置，與該時脈的無水平抖動情況相符。

由 P1、P2 和 P3 表示的**週期水平抖動**，只是量測波形中每一時脈週期的循環。這是最簡單、最直接的量測方法。若需估算週期水平抖動的峰-峰值，可用示波器的無限累積顯示工具，透過調節，使示波器顯示一個稍為多出一點的完整時脈週期。如果示波器在第一個邊緣上觸發，則可在第二個邊緣上看到週期水平抖動。請見 2.4b 中的示例。

由圖 2.4a 中的 C2 和 C3 表示的**週期至週期水平抖動**，用於量測任何兩個相鄰週期之間的時脈週期的變化程度。如圖所示，您可透過在週期水平抖動上應用一次差分運算，找到週期至週期水平抖動。該量測值可能是相關的，因為它可顯示時脈還原 PLL 可能從屬的瞬時動態情況。請注意，計算週期水平抖動或週期至週期水平抖動時，系統並不要求您提供參考時脈的理想邊緣位置。

時間間隔誤差在圖 2.4a 中以 TIE1 至 TIE4 量測值表示。TIE 用於量測時脈的每一有效邊緣與其理想位置的偏差程度。在進行這想量測之前，您必須知道或估算出這些理想邊緣。也正是由於這一原因，您很難用示波器直接觀察 TIE，除非您有某種可進行時脈還原或後處理的手段。

透過週期水平抖動的積分運算也可獲得 TIE，但需先從每一測定的週期中減去公稱 (理想) 時脈週期。TIE 之所以重要，是因為它可以顯示甚至很小量的週期水平抖動在一段時間內的累計結果。當 TIE 達到 ± 0.5 單位時距時，眼狀圖將就此閉合，接受機隨後將出現位元錯誤。

圖 2.4c 中的範例說明了這三個水平抖動量測值是如何在特定波形上進行相互比較的。在此例中，波形的公稱週期為 $1 \mu\text{sec}$ ，但實際週期後面卻跟著 8 個 990 奈秒的週期，其後還有 8 個 1010 奈秒的週期。

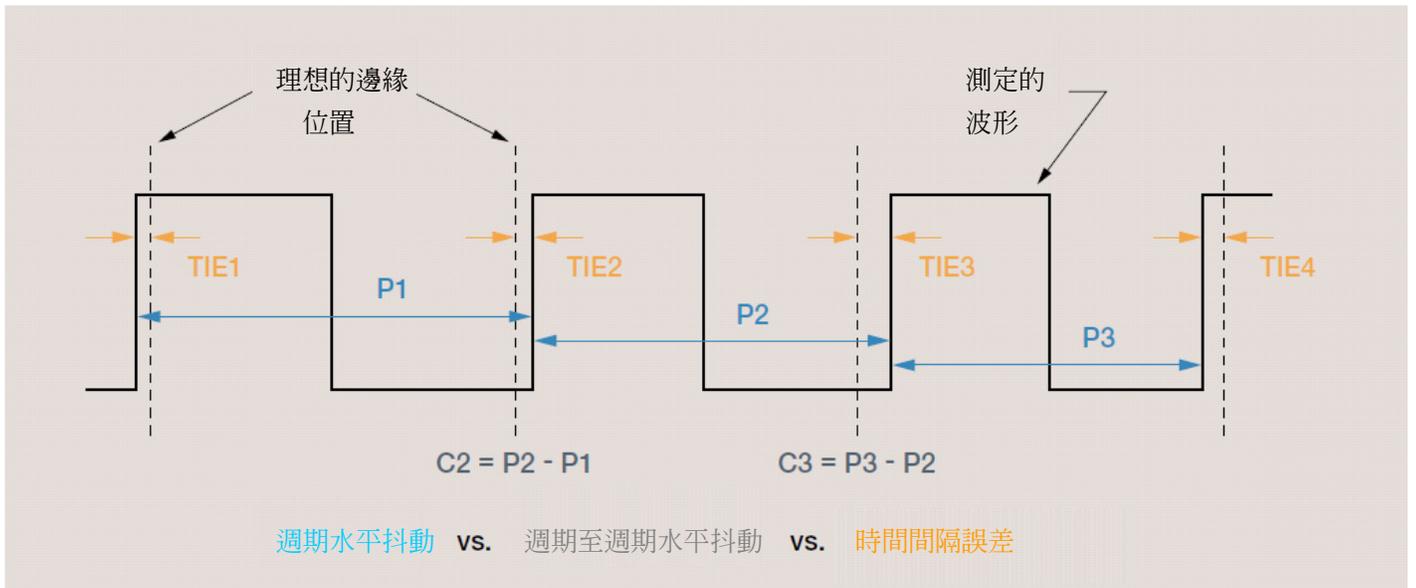


圖 2.4a 不同的水平抖動量測方式

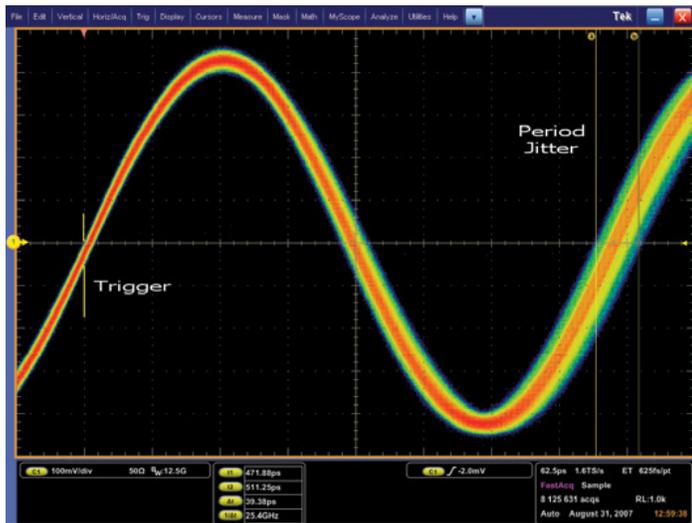


圖 2.4b 利用游標量測週期水平抖動

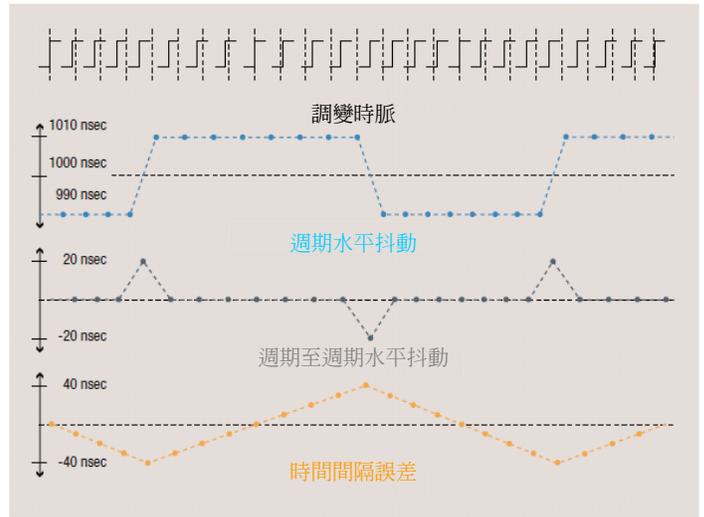


圖 2.4c 不同量測方法的趨勢檢視



圖 2.4d 水平抖動地圖上的 BERT 和水平抖動值

第三節：水平抖動的量測和顯示

本節討論水平抖動量化和/或分析工作可使用的某些工具和技術手段。

3.1 水平抖動統計

由於所有已知訊號都含有隨機分量的水平抖動，故需採用一些統計測量法來正確的鑒定水平抖動。這些常用的測量法包括：

平均值：時脈週期的算術平均值或平均運算值為公稱（或標稱）週期。這是頻率計數器所計算頻率的倒數。從理論上講，TIE 平均值是零，但也可能會產生少量的殘值，具體情況取決於所用的量測技術。

標準偏差：標準偏差用希臘字母 σ 表示，它是量測值從其平均值變動的平均量。在描述高斯過程中特別有用，因為其分佈曲線完全用平均值和標準偏差確定。我們將在 4.3 節中詳細討論這一過程。

最大值、最小值和峰-峰值：最大值 (Max) 和最小值 (Min) 通常指量測間隔其間實際觀察到的值，而峰-峰值則是 Max 減去 Min。使用這些量測值時，應謹慎為佳。對於確定性訊號而言，這些值可能等於實際值，即使在較短的量測間隔後亦然。但對於帶有高斯分佈的隨機訊號而言，最大值和最小值在理論上講是沒有限制的，因此觀察到的峰-峰值通常將隨時間而增多。為此原因，峰-峰值應與總數和某些已知的分佈類型一起使用。

總數：總數是統計資料集中包括的觀察結果個數。對隨機過程而言，總數如果高，則可直接提高量測的置信度，表明測量結果是可以重複的。如果已知或可估算出分佈特徵，則可計算出將量測不定性降低至某一點以下所需的總數。

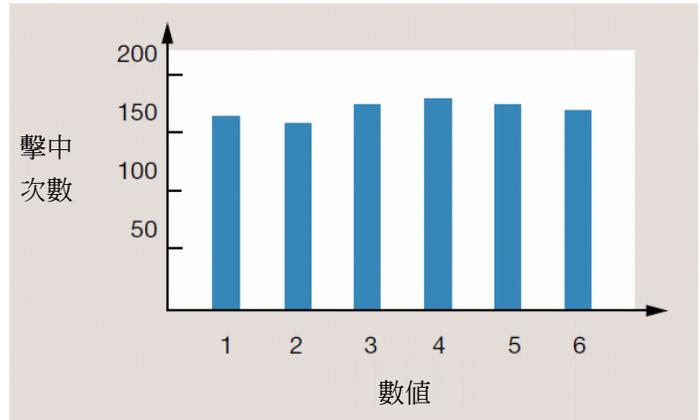


圖 3.2a 量測長條圖

3.2 水平抖動長條圖

長條圖是一種示意圖，可根據量測值出現的頻率，在資料集中描繪量測值。如果資料集裡的量測值數量很大，長條圖則可對資料集的概率密度函數 (pdf) 提供可靠的估計。例如，如果您擲了 1000 次 fair die (公平之骰子) 並記錄了結果，則結果可能如同圖 3.2a 所描述的那樣；其中，「擊中次數」軸線顯示的是每個值出現的次數。

需注意的一點是，長條圖不提供觀察值出現順序的資訊。

圖 3.2b 所示為 TIE 量測的水平抖動長條圖示例。此例中，連續變量被映射到 500 個存儲器中，資料集的總數為 3,200,000。因為是 TIE 量測，故平均值是 0 奈秒。就該圖而言，分佈情況近似高斯分佈，標準偏差為 1.3 皮秒。

請考慮第二個例子，其中圖 3.2b 中所示訊號的 TIE，是用圖 3.2c 中描繪的三角波調變而成的。

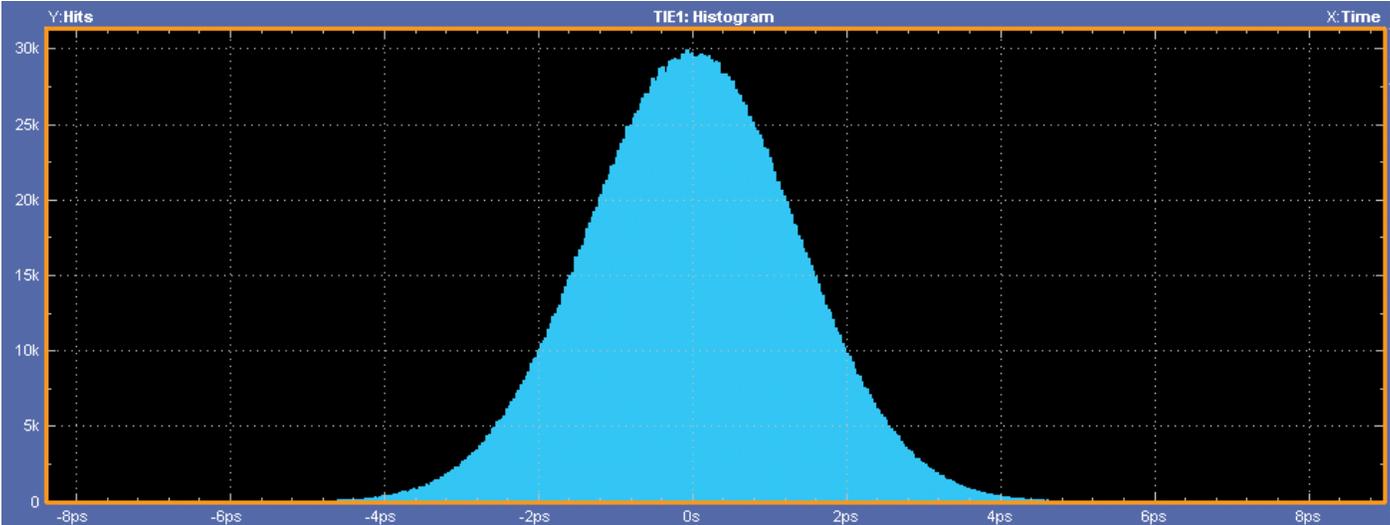


圖 3.2b 時間間隔誤差量測長條圖

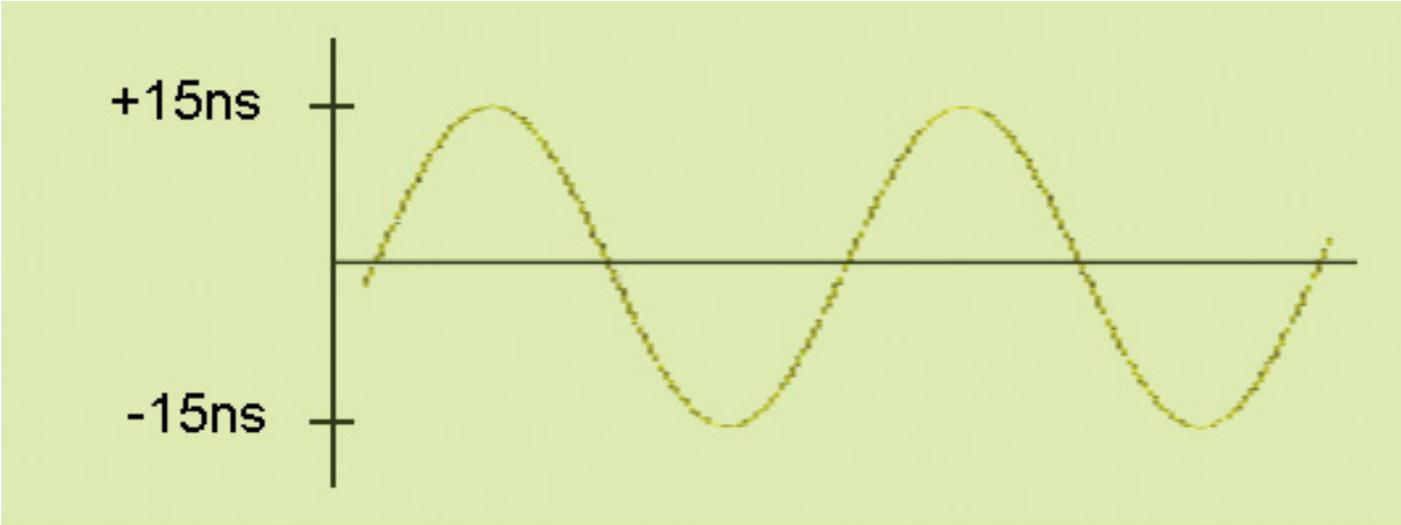


圖 3.2c 預期套用於資料訊號的正弦波調變

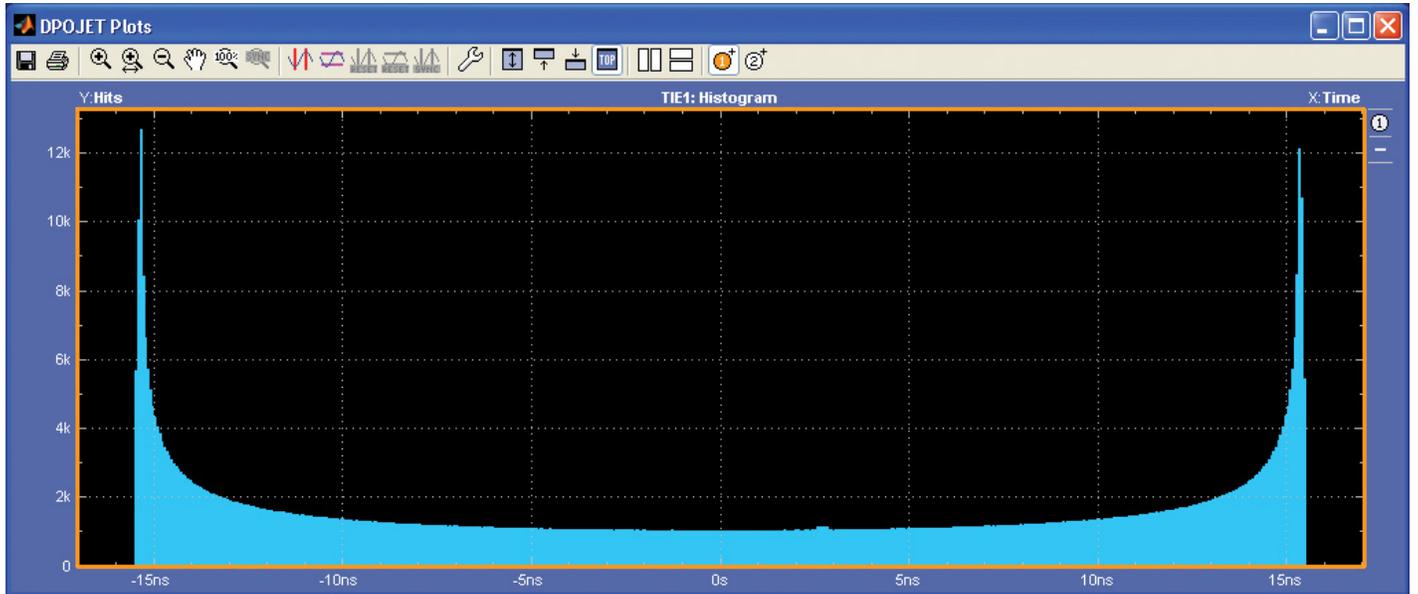


圖 3.2d 調變訊號時間間隔誤差繪製成長條圖

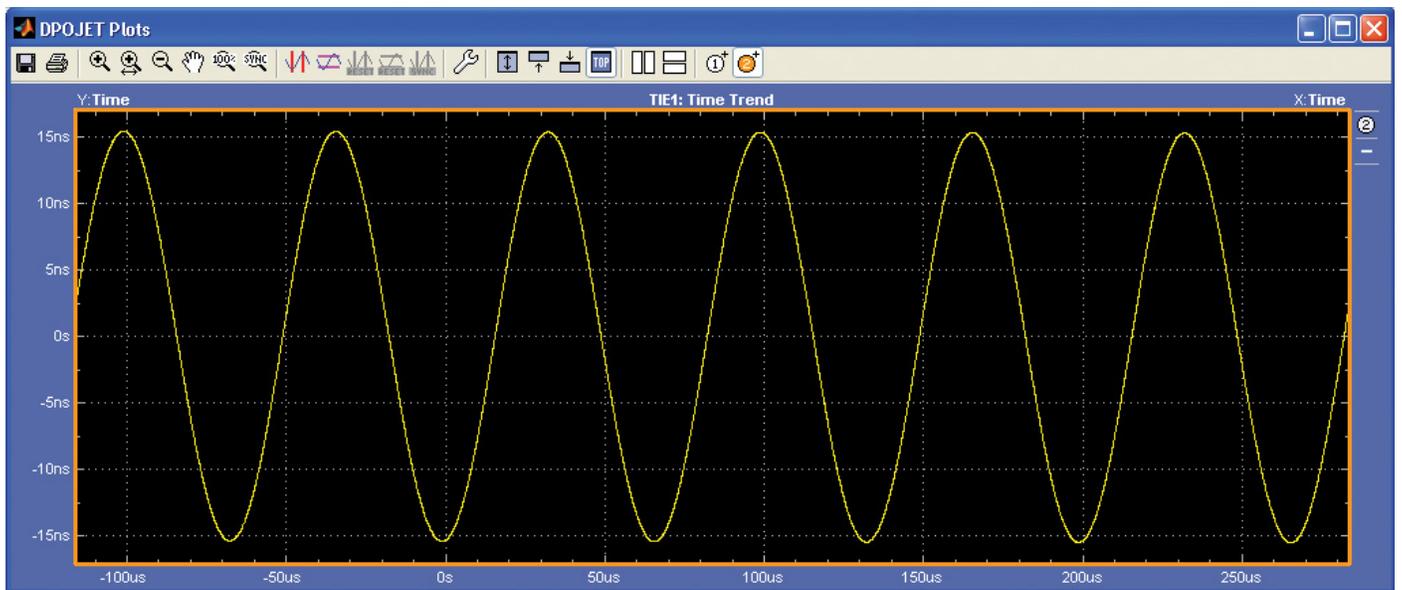


圖 3.3a 調變訊號時間間隔誤差繪製成趨勢圖

如果該三角波是在任意瞬間取樣，同等的可能性則是：該樣值可能位於 -30 奈秒和 30 奈秒之間的任何一處。因此，調變訊號的 TIE 長條圖的伸展範圍為 ± 30 奈秒，並有大約相等的可能性（見圖 3.2d）（長條圖左右邊緣處的斜尾表示該水平抖動仍有高斯分量）。

3.3 水平抖動與時間的關係（時間趨勢）

因為水平抖動長條圖不顯示量測觀察值出現的順序，所以不能揭示重複圖形，不然還可顯示調變或其他週期分量。標示有水平抖動和時間關係的圖則可非常明顯的顯示這種圖形。為了說明起見，我們把從圖 3.2d 中的相位調變訊號得來的 TIE 繪製到時間上，從此產生了圖 3.3a。

如此水平抖動變量的圖形變得更明顯了，而且與其中一個耦合雜訊的可能來源之間的關聯，此時也變得清晰可見。

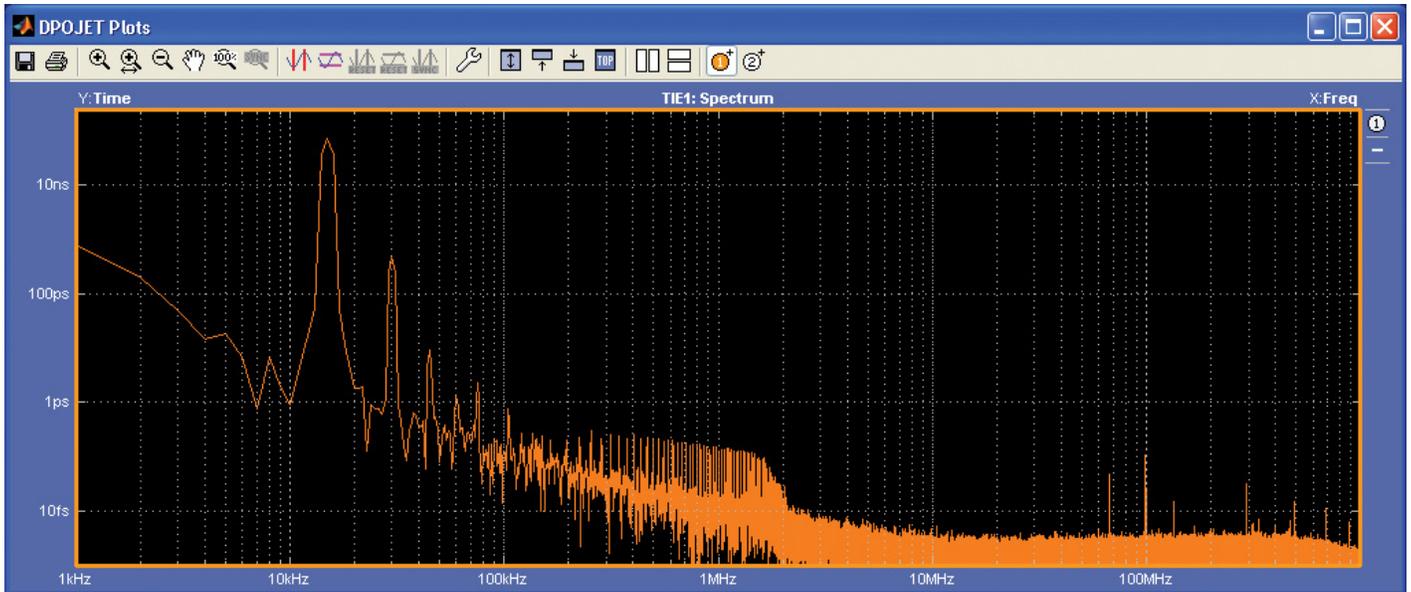


圖 3.4a 繪製為頻譜之調變訊號的時間間隔誤差

3.4 水平抖動與頻率的關係 (水平抖動頻譜)

有鑒於水平抖動量測值可根據時間繪製成圖，量測人員便可作進一步的工作，那就是在這些量測值上應用傅立葉轉換，然後在頻域中顯示結果。此舉可產生一個水平抖動頻譜，其調變頻率在橫軸上顯示，調變幅度在縱軸上顯示。頻譜分析的好處之一在於週期分量往往能得到分明的顯現，其他分析法則會因為寬頻雜訊而隱而不見。

此處再次使用了前一個例子，即帶三角調變的時脈。圖 3.4a 中的 TIE 量測與圖 3.3a 相同，但以 TIE 頻譜顯示。

我們現在看到的三角調變，其基頻為 15 kHz，如最大的混附訊號所示。理論上，三角波的傅立葉級數顯示指有奇數諧波。這一點已透過頻譜得以證實，其分量在 3 kHz、5 kHz、7 kHz 等上清晰看見。隨機水平抖動仍有顯示，但在該檢視中，則以寬而平坦的基底雜訊顯現 (在 2MHz 上方變為平坦)。

我們前面曾經提及，依照約定，如果時序變量帶有低於某種限度的傅立葉分量 (通常為 10 Hz)，則被視為漂動，而不是水平抖動。更實際的相關情況是，某些其他頻率限制 (如系統時脈還原迴路的迴路頻寬) 可用來確定哪些雜訊是可以容忍的，而水平抖動頻譜視圖則可用於揭示系統中的雜訊是否會成為令人擔憂的問題。

3.5 眼狀圖

以上討論的各種方法都只能依靠邊緣位置。這些位置均從波形抽取而來，所用方法是：偵測波形何時跨越一個或多個振幅臨界值。而眼狀圖則是一種較通用的工具，因為不僅可顯示波形的振幅行為，而且也能顯示時序行為。

如圖 3.5a 所示，當波形的許多片段被重疊在一起，以使標稱邊緣位置和電壓為準對齊時，既可建立一個眼狀圖。一般情況下，眼狀圖只顯示兩個單位時距的水平範圍。如圖所示，波形片段可以是相鄰的，抑或是從訊號中間隔更寬的樣值中取來的。如果波形可以重複，則可使用取樣示波器，在許多波形上以隨機延遲方式，從單個樣值構建一個眼狀圖。

詳細繪製的圖 3.5a，利用顏色顯示出單個波形片段是如何在眼狀圖中組成的。在實際應用中，眼狀圖通常以單色，或用彩色顯示任何一點的取樣波形密度。圖 3.5b 中顯示的波形彩色密度畫面，展示了幾種類型的雜訊。

這幅圖用白色箭頭顯示眼狀圖的橫向和縱向開度。當訊號上的雜訊增加時，眼狀圖的開度在橫向或縱向或縱橫兩個方向變小。當圖中央的開口區域消失時，眼狀圖就此閉合。

最容易的方法是用示波器的長時間累積顯示模式建立眼狀圖。但使用這一方法時，應注意示波器的觸發方式。如果只在波形邊緣上觸發，則產生的眼狀圖顯示的是相對於該邊緣的波形。這完全不同於相對於底層位元時脈的眼狀圖。爲了能產生一個相對於位元時脈的眼狀圖，您需要使用某種軟體或硬體形式的時脈還原功能。如果所用示波器不具備這一功能，也可使用從外部時脈還原電路獲得的觸發功能

若須檢視眼狀圖和 TIE 長條圖之間的關係，可將圖 3.5b 中的密度眼狀圖變爲 3D 圖，並沿決定臨界值將齊切開 (見圖 3.5c)。以粉紅色醒目顯示的區域相當於眼狀圖中兩的過零點 (zero-crossing) 中第一個過零點的長調圖。

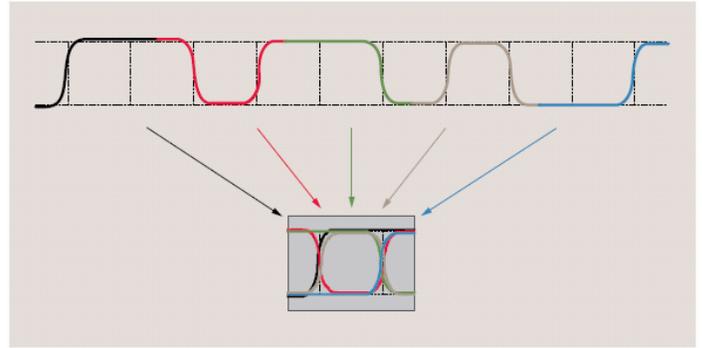


圖 3.5a 構建即時眼狀圖

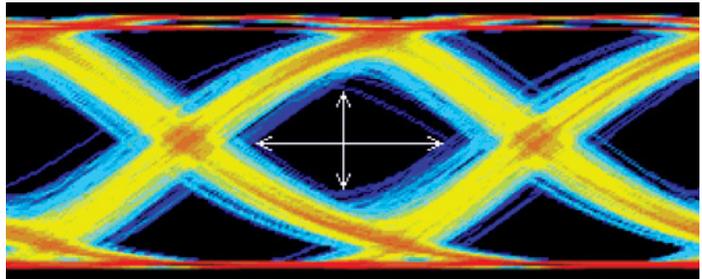


圖 3.5b 具色階的波型資料庫

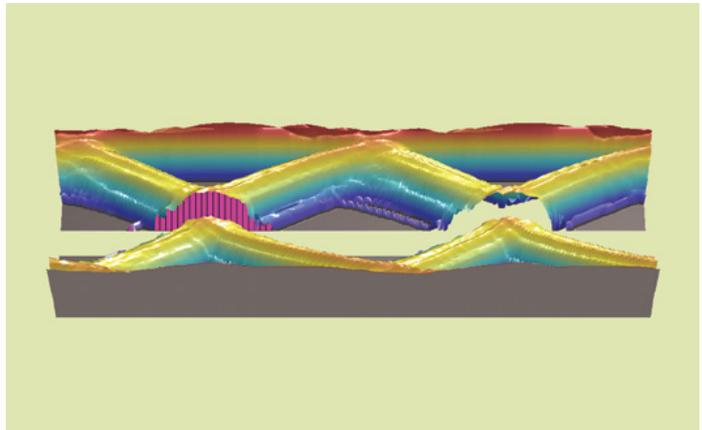


圖 3.5c 在波型資料庫中，色彩可呈現總數

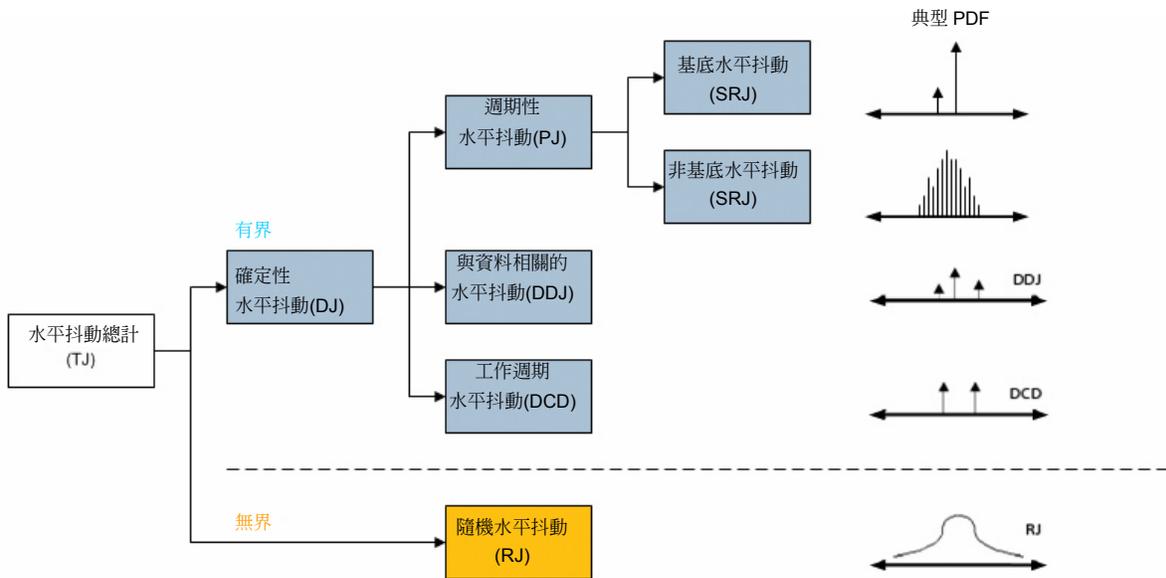


圖 4.2 水平抖動包含隨機和確定性部分

第四節：水平抖動隔離

「所有模型都是錯的；有些模型是有用的」—W. Edwards Deming

水平抖動隔離，或水平抖動分解，是一種分析手段，以參數化模型描述和預測系統行爲。本節將解釋爲什麼要使用這一技術手段，並詳細介紹當今最常使用的幾種水平抖動模型。

4.1 分解水平抖動之動機

爲了瞭解實際系統的行爲，往往需要使用系統的數學模型，這種方法很有用。這種模型的行爲，可透過調整其單個組件的參數得到調諧。如果模型的參數是依據實際系統的觀察值選擇的，則可用這一模型預測系統在其他情形下的行爲。因此，進行水平抖動分解（亦稱水平抖動隔離）的其中一項動機，是將系統效能外推或延伸到那些難於直接量測或在量測方面非常費時的情況。

以此法模擬系統的另一個動機乃與分析有關。如果每一個模型組件都能和一個或多個底層的物理效應關聯，您便可透過對模型的理解，動察出現過多水平抖動的準確原因。

所有複雜系統的模型都是建立在假設和簡化條件之上，故模型和實際系統行爲之間的擬合絕非精確。事實上，在擬合模型行爲與觀察的測量值時，參數的選擇總要有某些餘地。爲此原因，水平抖動隔離藝術與科學成分參半，在量測值可重複性方面也不要期待能夠達成「四個九」。

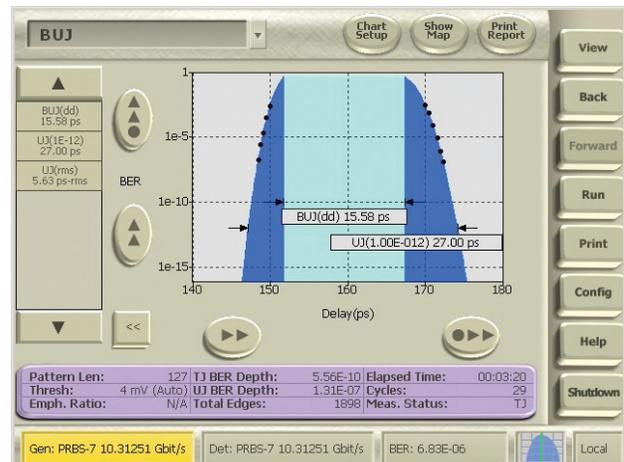


圖 4.2a BER 輪廓圖 CDF 上的 BUJ 值

4.2 水平抖動模型

最常用的水平抖動模型一般都基於圖 4.2 中所示的層次。在這種層次中，水平抖動總計 (TJ) 首先分爲兩個類別，即隨機水平抖動 (RJ) 和確定性水平抖動 (DJ)。我們在本文後面會看到，是否能正確的區分這兩種水平抖動。對模型的正確性將有很大的影響，這一點在程度上高於任何其他建模決定。

確定性水平抖動隨後細分爲幾個類別，即週期性水平抖動 (PJ，有時亦稱爲正弦水平抖動或 SJ)、與工作週期相關的水平抖動 (DCD)、與資料相關的水平抖動 (DDJ，亦稱符號間干擾 ISI)。有時還使用更多的類別 (有界但無相關之水平抖動，或 BUJ)。

本文將在下面各節討論這些水平抖動各類型的特性和根源。

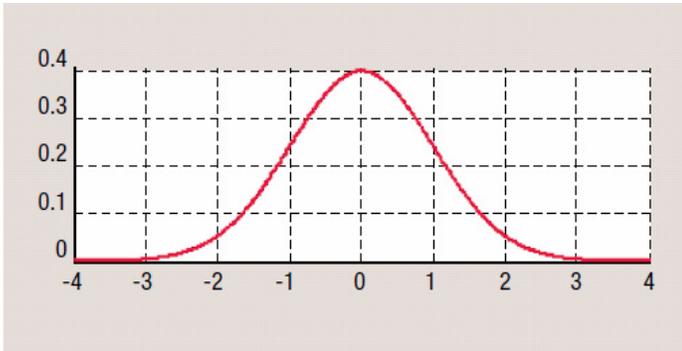


圖 4.2.1a 高斯分佈

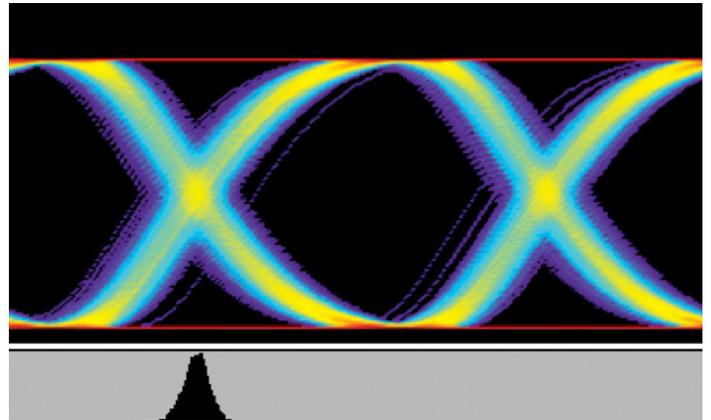


圖 4.2.1b 高斯水平抖動的眼狀圖和長條圖

4.2.1 隨機水平抖動

隨機水平抖動是無法預測的時序雜訊，因為這種雜訊沒有可辨別的圖形。隨機水平抖動的典型例子是，當無線電收音機調諧到無效載波頻率時收聽到的聲音。雖然一個隨機過程在理論上可有任何概率分佈，但在水平抖動模型方面，則假定有高斯分佈。其中一個理由是，許多電路中隨機雜訊的主要來源是熱雜訊 (亦稱 Johnson 雜訊或散粒雜訊)，我們都知道熱雜訊帶有高斯分佈。另一個較根本的理由是，根據中心極限定理，許多無關聯之雜訊來源的複合效應，不論單個來源的分佈如何，都接進高斯分佈。

高斯分佈也叫常態分佈，其 PDF 由我們熟悉的鐘形曲線描述。在圖 4.2.1a 中，這一分佈範例的平均值為零，標準偏差為 1.0。書目提要⁴中的一部參考書，對此類分佈有詳盡的描述，但其最重要的一個特性是：對高斯變量而言，它可能得到的峰值是無限的。也就是說，雖然這種隨機變量之大部分樣值都將簇集在其平均值周圍，但任何特定的樣值都可在理論上，以不定量，與該平均值大相徑庭。因此，對底層分佈而言，有界的峰-峰值並不存在。這種分佈樣值愈多，測定的峰-峰值就愈大。

在設法鑒定這類分佈時，人們通常採用大量的取樣次數和記錄所產生的峰-峰值之方式。使用這種方法時應格外小心，因為一套隨機變量之 N 次觀察的峰-峰值，盡管有較低的標準偏差，其本身就是一種隨機變量。例如，使用這種隨機變量作為品質普查的合格-不合格標準時，要求加大合格臨界值，以將量測值的不確定性考慮在內，這就會產生某些不合格但可接受的單元。較之更好的方法乃是將 N 次觀察擬合到假定的分佈曲線 (此例中為高斯)，然後用該分佈曲線的數學描述預測特定置信級上的長期行為。

圖 4.2.1b 所示為僅有高斯水平抖動的訊號眼狀圖和相關的 TIE 長條圖。

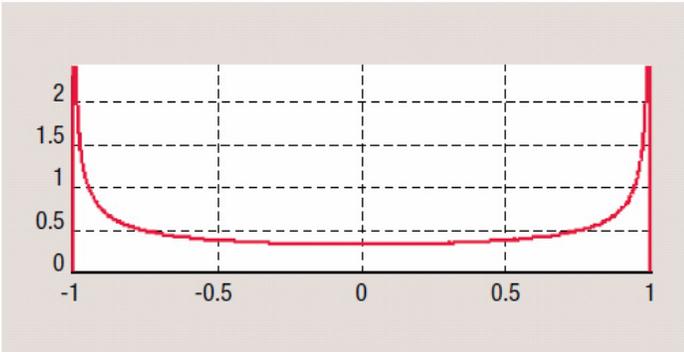


圖 4.2.3a 非高斯分佈

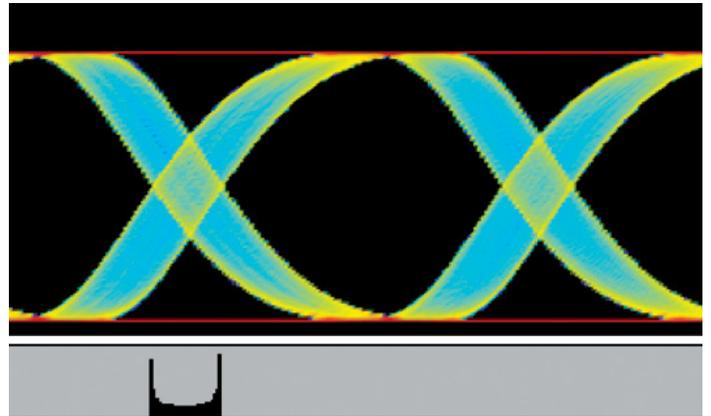


圖 4.2.3b 非高斯水平抖動的眼狀圖和長條圖

4.2.2 確定性水平抖動

確定性水平抖動是可重複、並可預測的時序水平抖動。正因為如此，這種水平抖動的峰-峰值是有界的，而且通常可在觀察次數較低的基礎上，以較高的置信度，觀察或預測這種水平抖動的界限。我們將在下面幾節中根據其特性和根源，把這類水平抖動進而細分為幾個子類。

4.2.3 週期性水平抖動

以循環方式重複的水平抖動，被稱為週期性水平抖動。在圖 2.4c 所示的例子中，TIE 時間趨勢顯示的是一個重複的三角波。由於任何週期性波形都可被分解為傅立葉級數的、與諧波相關的正弦波，所以這種水平抖動有時也被稱作正弦水平抖動。圖 4.2.3a 所示為一個正弦波的概率分佈，峰值幅度 1.0。

依照約定，週期性水平抖動不與資料流中的任何週期性重複圖形相關。我們將在下一節中敘述與重複性資料圖形相關的水平抖動。

週期性水平抖動的起因，通常是在系統中耦合的外部確定性雜訊源，如開關電源雜訊或強大的本地 RF 載波。不穩定的時脈還原 PLL，也可能是造成這種水平抖動的原因之一。

圖 4.2.3b 所示為帶有 0.2 單位時距週期性抖動的訊號眼狀圖和相關的 TIE 長條圖。

4.2.4 與資料相關的水平抖動

任何與資料流中的位元順序相關聯的水平抖動，都是「與資料相關的水平抖動」，英文縮寫為 DDJ。DDJ 往往是由於纜線或裝置的頻率響應而產生的水平抖動。我們看一下圖 4.2.4a 中的波形，這裡的資料順序經過大量的低通濾波處理。由於濾波的作用，波形式無法達成全面的 HIGH 或 LOW 狀態，除非在連續的相同極性中有若干個位元。

圖 4.2.4b 所示為重合於其自身偏移版本之上的波形。您可以看到，當下降轉態跟隨 1,0,1,0,1,0,1 順序時，有一個跨越的臨界值先行於跟隨 1,0,1,0,1,1,1 順序時出現的跨越。

由於這種時序偏移是可以預測的，且與該轉態前面的特定資料相關，所以是典型的 DDJ。另一常用名稱是符號間干擾，英文縮寫為 ISI。

圖 4.2.4c 所示為帶有 0.2 單位時距 DDJ 的訊號眼狀圖和相關的 TIE 長條圖。ISI 水平抖動長條圖永遠只由脈波構成。

4.2.5 與工作週期相關的水平抖動

可根據相關邊緣是否為上昇還是下降而預測的水平抖動被稱為「工作週期水平抖動」(DCD)。常建的 DCD 成因有兩種：

1. 上昇邊緣的側滑速率 (slew rate) 不同於下降邊緣的側滑速率。
2. 波形的決定臨界值高於或低於它原應所在的位置。

圖 4.2.5a 是第一種情況的眼狀圖。這裡的決定臨界值位於 50% 幅度點上，但波形的上昇時間慢，故使上昇邊緣在跨越臨界值時晚於下降邊緣。其結果是，一個邊緣跨越長調圖 (灰色) 顯示出兩個不同的組別 (與前面的眼狀圖對照，本例中的波形在工作週期水平抖動之外，還有一些高斯雜訊夾雜其中)。

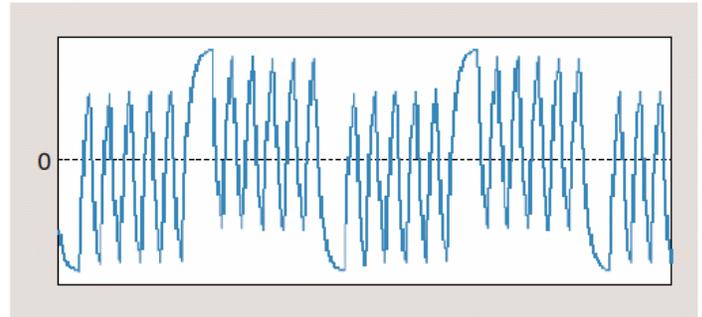


圖 4.2.4a 資料訊號與資料相關的水平抖動

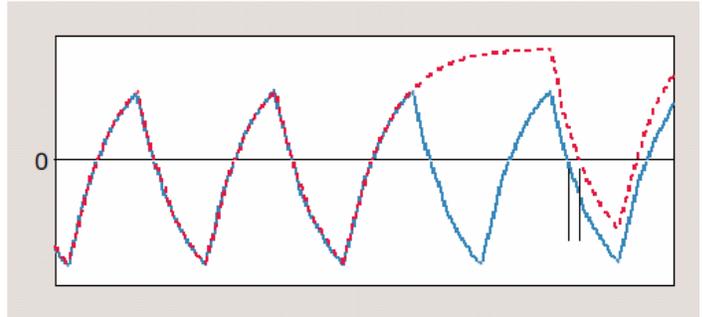


圖 4.2.4b 資料相關水平抖動的有限帶通一個信號源

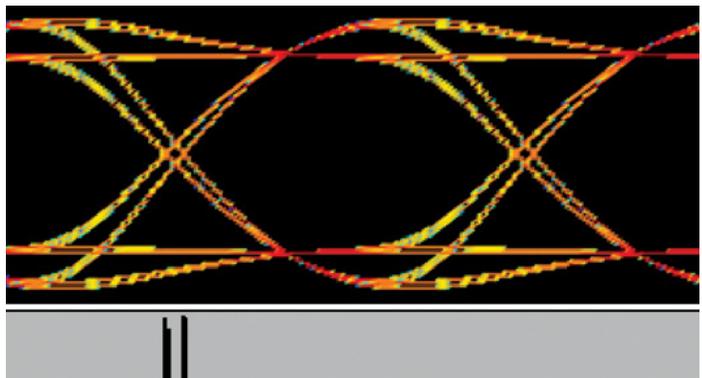


圖 4.2.4c 資料相關水平抖動的眼狀圖和長條圖

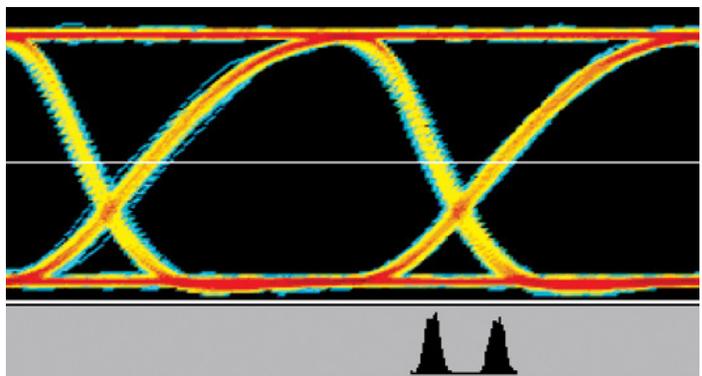


圖 4.2.5a 非對稱性上升/下降時間引起的工作週期失真

圖 4.2.5b 是第二種情況的眼狀圖。這裡的波形有平衡的上昇和下降時間，但決定臨界值並非設定在 50% 幅度點上。其邊緣跨越長條圖應該和圖 4.2.5a 中的一樣。

4.2.6 有界不相關水平抖動 (BUJ)

高速互連相鄰通道間的串音 (如出現於 4 x 10GbE 中的現象) 會顯著影響串列連結的效能。此外，若出現串音將會削弱了傳統的電流抖動分離方法的準確度，從而會因隨機抖動的過度計算削減了高速連接裝置的設計餘量。利用有界不相關水平抖動組件作為訊號減損抖動分解的一部分，後續的 BER 眼狀圖合成將可產生更準確的評估結果。如圖 4.2.6 所示，抖動結果可能會在相鄰通道配置的高頻序列連結上獲得改善。

4.2.7 基底水平抖動 (SRJ)

通常，由於要在附近的邏輯系統中處理，所以確定性抖動會被引入系統。如此類的相互作用會造成水平抖動，而該水平抖動可能同步或異步發生，且會歸類為 BUJ 類別 (「不相關」，因水平抖動未與資料碼型關聯)。時脈同步水平抖動是此水平抖動類型的特殊和典型案例。如多工/解多工、通道編碼、區塊格式化和低速並行處理等訊號處理程序皆可能會在時脈邊界的整數數量處產生轉移邊緣。

在如圖 4.2.7 所示的發射機上的 4:1 多工器階段可能提前或推遲邊緣時序 (與內部 4 等分時脈並行加載所有暫存器同時發生)。若查看四分之一速率時脈所觸發的 4 個眼狀圖，將會看到兩個具有額定眼狀波寬的眼狀波，以及水平抖動邊緣周圍的一短一長眼狀波寬。因為在碼型的所有位元上皆會觀察到此現象 (只要碼型長度不是 4 的倍數)，所以這將不會被解讀為 ISI。

針對所有構成給定分頻比的眼狀波，其平均過渡時間之間的任何非諧波相關差異點即是與該分頻比關聯的確定性水平抖動，並會報告為基底水平抖動 (SRJ)。任何大於 SRJ 數量的 BUJ 將進一步稱為非基底水平抖動 (NSR)。

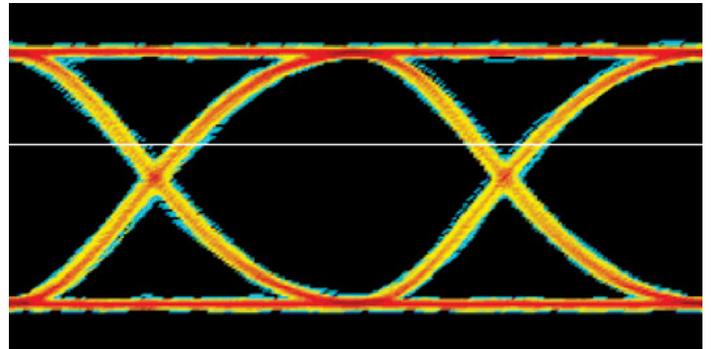


圖 4.2.5b 錯誤偵測臨界值引起的工作週期失真

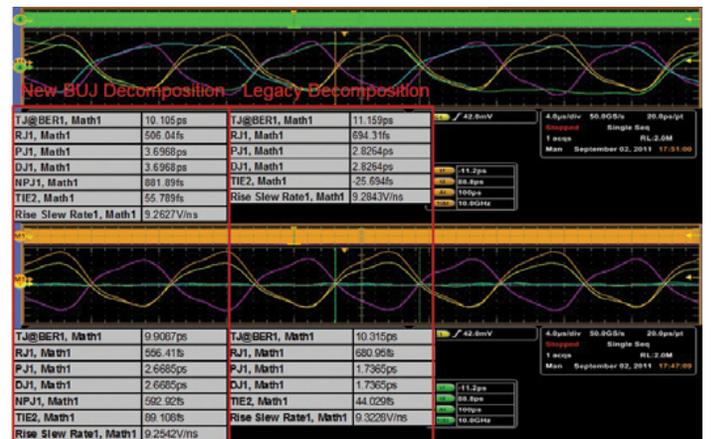


圖 4.2.6 使用有界不相關水平抖動分離方法所取得的改進 TJ 和較大餘量。

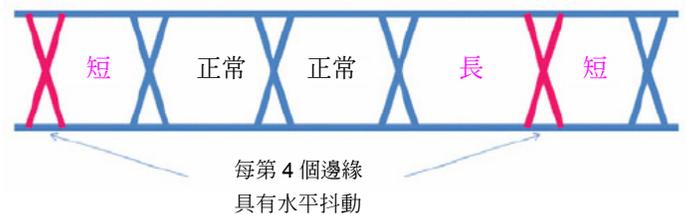


圖 4.2.7 F/4 基底水平抖動，每第 4 個邊緣延遲，造成不均勻的眼狀波寬。

請務必小心勿混淆基底水平抖動與碼型相關的 ISI。若待測資料碼型是基底分頻器的完美倍數，則該基底的水平抖動會正確地識別為 ISI 的組件而不會納入 SRJ 數量。

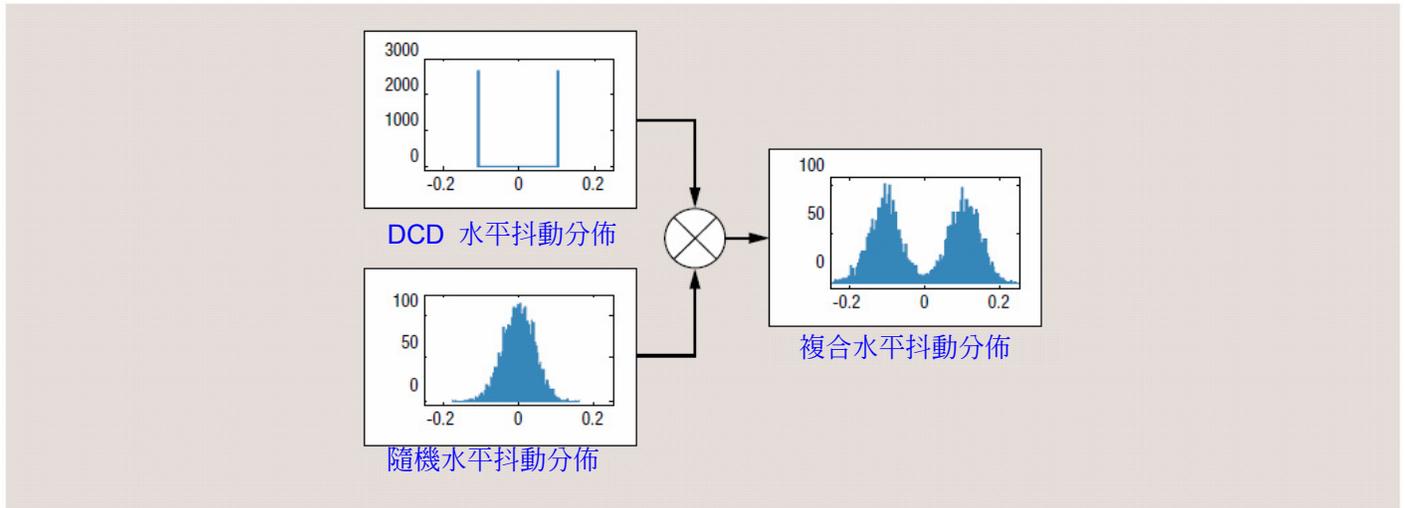


圖 4.3a 隨機抖動會與確定性抖動卷積以找到總抖動。

4.3 綜合顯示

上述各節針對每一類型的水平抖動，展示了單獨的眼狀圖和長調圖。但如果有一種以上的水平抖動類型同時存在時，長條圖將會出現什麼情況？一個有用且可應用的統計理論結果可以釋義如下_如果有兩個或更多的隨機過程是獨立的，則產生於其效應之和的分佈，等於單個分佈的褶積。

與文字描述相比，圖示最能說明這一概念。圖 4.3a 說明，當工作週期水平抖動（帶由兩個脈波組成的長條圖者）與隨機水平抖動（高斯分佈曲線者）結合在一起時所出現的情況。我們在前面的圖 3.2d 中看到的是另一例，其中三角波（一種週期抖動形式）的均勻分佈就是與隨機抖動結合的結果。

內行人一看到圖 4.3a 中的最終長條圖，就會推斷出是哪兩個類型的水平抖動造成的結果。然而，實際的例子可能涉及數量各異的所有水平抖動類型，所產生的複合長條圖也並非那麼直觀。進行徹底的水平抖動分析的目的之一，就是要識別最終結果中所有單個水平抖動的分量。

水平抖動隔離之真正功力，表現在它能將準確辨別的水平抖動分量回插至圖 4.2 勾勒出的水平抖動模型之中，使您可透過這一模型，預測系統在新情況下的行為。這是對位元錯誤率進行估算的基礎，這個題目我們將在第五節中詳細討論。

為了理解精密分析工具的重要性，我們將對兩個具有不同水平抖動特性的系統進形比較。第一個系統是 System I，只有隨機水平抖動，標準偏差為 0.053 單位時距 (UI)。圖 4.3b 所示為該系統的 TIE 長條圖，資料速率為 1062.5 Mbps。

第二個系統也有隨機水平抖動，標準偏差為 0.028 UI，大約是第一個系統的一半。然而，它還有兩個不相關的週期性水平抖動分量，每一分量的峰-峰振幅為 0.14 UI。圖 4.3c 所示為 System II 的 TIE 長條圖。

這兩個長條圖都含總數相當的邊緣，約 42,000 個，但看上去差別不大。實際上，就這兩個取樣集而言，它們的時間間隔有誤差峰-峰值是完全一樣的，即 430 ps (0.457 UI)。如果目視比較是唯一可用的工具。則很難區別這兩種情況，也無法準確預測系統在較長觀察區間的行為。

有人會問：鑒於這兩種情況如此相似，區別這兩種情況的重要性何在？我們將在討論位元錯誤率和浴缸曲線後，在來回顧這個例子。

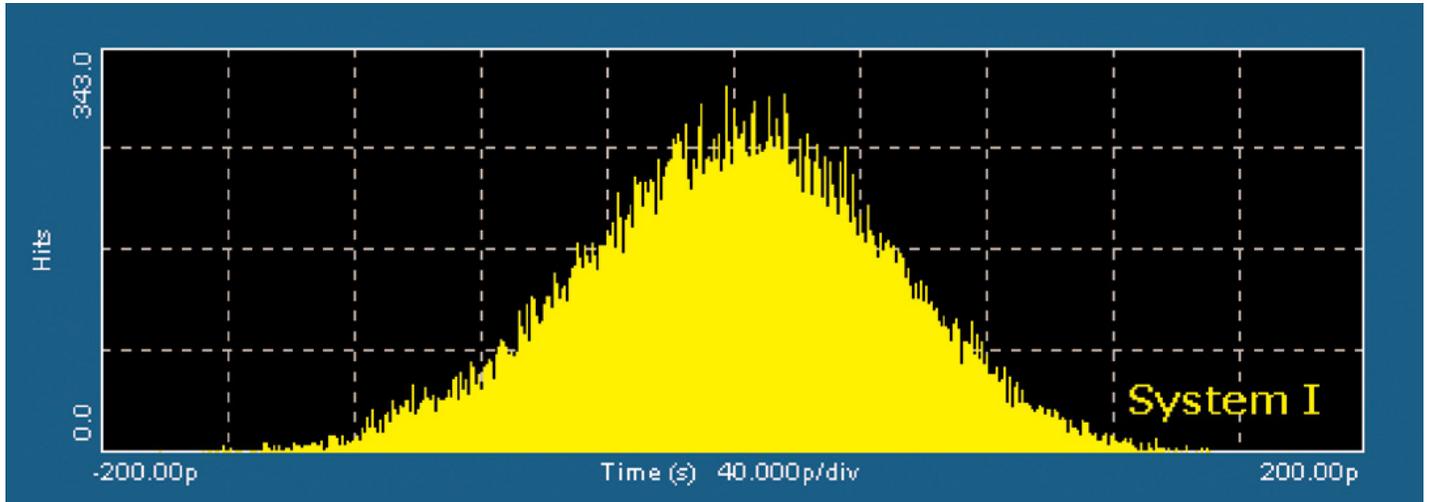


圖 4.3b 具有主要隨機水平抖動的水平抖動分佈長條圖

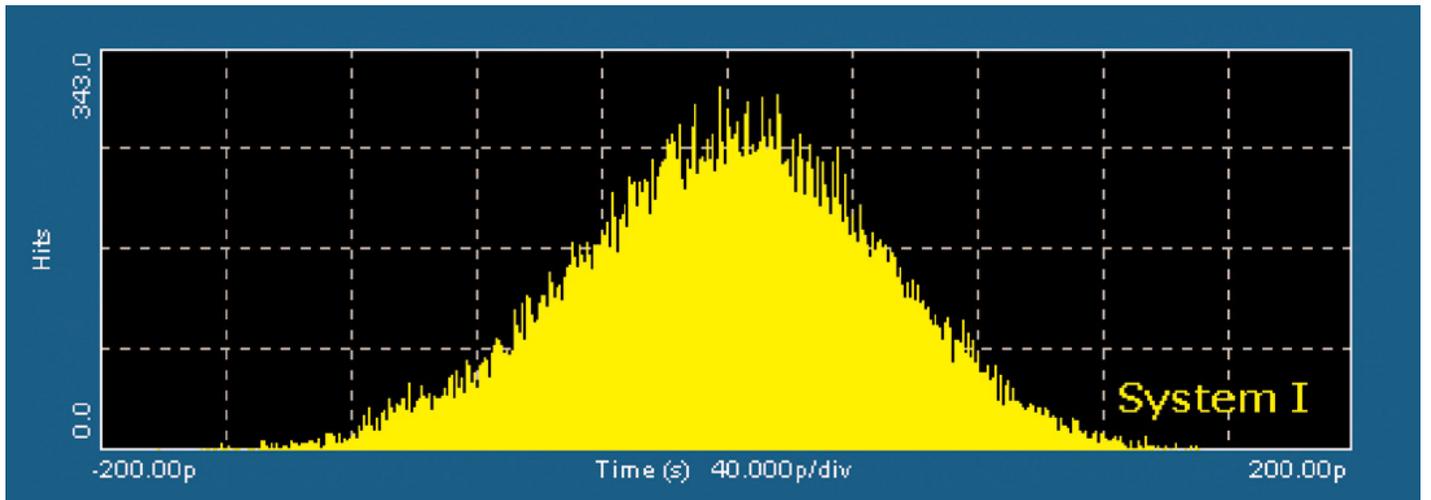


圖 4.3c 具有主要確定性水平抖動的水平抖動分佈長條圖

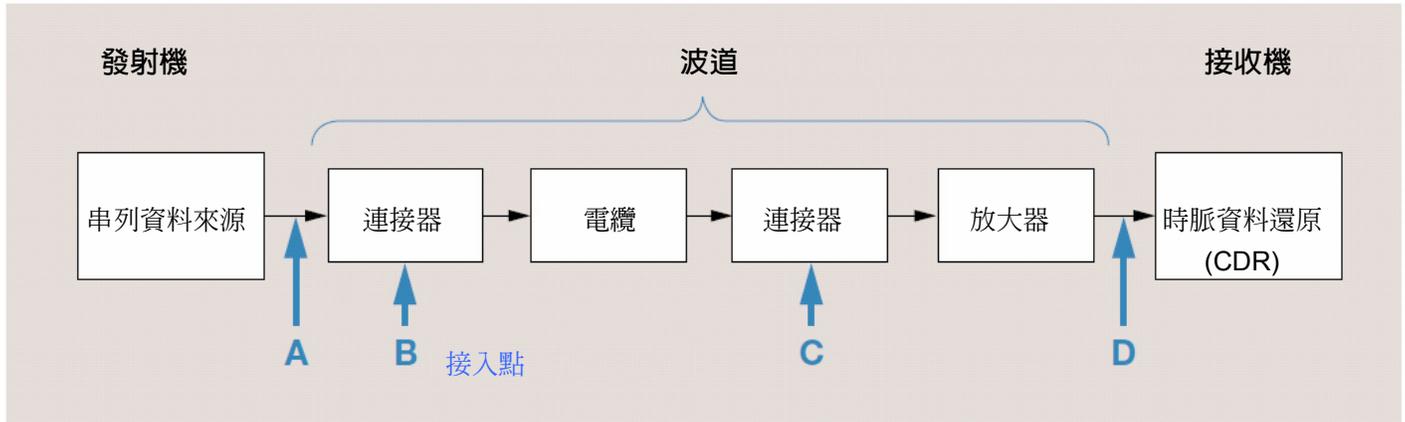


圖 5.1 設定系統抖動預算的常見量測點。

第五節：水平抖動與位元錯誤率的關係

「對真實問題的近似答案，其價值遠超過對近似問題的精確答案。」—*John Tukey*

5.1 水平抖動預算

如圖 5.1 中的模型所示，一套實際的通訊系統由發射機、波道和接收機組成。波道部分可包括電纜、互連和不從事時脈再生的有源裝置。波道可帶來濾波、非線性、DC 偏差、阻抗不匹配和其他隨機水平抖動。各電路測試點和系統連接器，可提供監測訊號品質的接入點。當您從發射機走到接收機，在每一接入點上檢查訊號品質時（也許使用的是眼狀圖），訊號的水平抖動通常會越來越差。

當訊號到達輸入，隨後轉入接收機的時脈資料還原電路（接入點 D）時，也許您會簡單的假定：如果眼狀圖仍開著，哪怕是一點點，就已大功告成。然而，接收機的電路並非完美無缺。收到的訊號的眼狀圖必須在橫向有足夠的開度，才能將接收機決定電路中的時序不確定性考慮在內，而且縱向也要有足夠的開度，才能容納對決定臨界值有影響的雜訊。

因此，全面的系統設計規格，需制定一份水平抖動預算分配表，清楚的定義每一接入點的已知水平抖動限制，並在訊號進入接收機重新同步時，要確保有適當的餘裕。

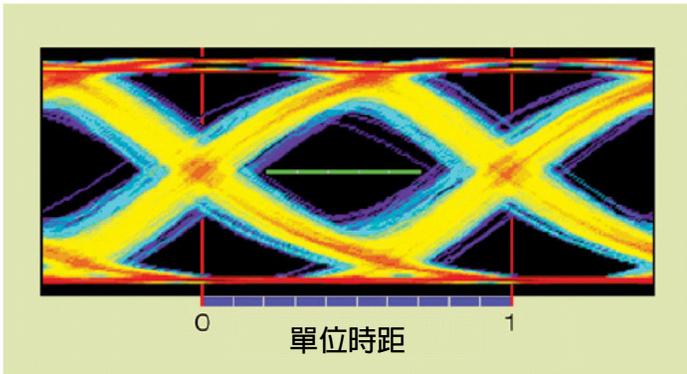


圖 5.2a 眼狀波寬可用確定效能

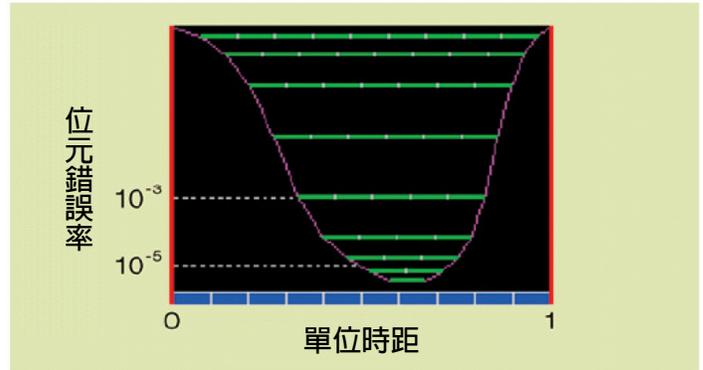


圖 5.2b 隨時間量測眼狀波寬以確定位元錯誤率

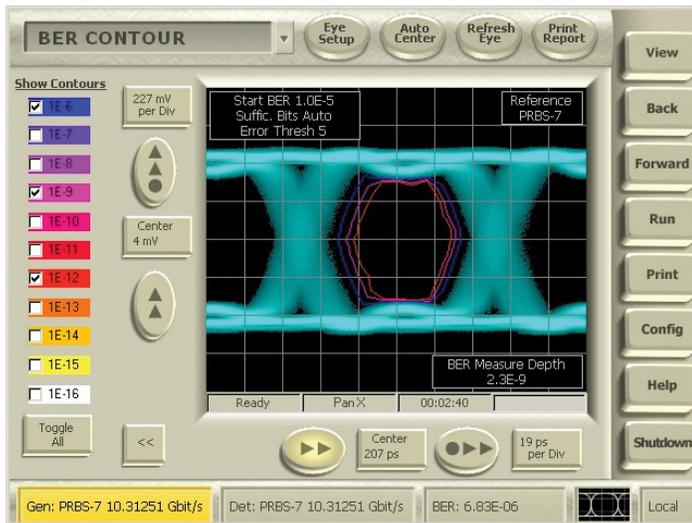


圖 5.2c 傳統碼型上的 BER 輪廓圖繪製 (具特定 BER 效能)

5.2 浴缸曲線

我們在 3.5 節中討論了眼狀圖和眼狀圖開度概念，並在 4.2.1 節中討論了高斯概率分佈即其理論上無界的峰-峰值。現在我們把這兩個題目放在一起，就會導致一個有趣的思路：對任何含某些高斯水平抖動的訊號而言，如果累計樣值的時間足夠長，眼狀圖應該完全閉合。這就會使作為比較基礎的眼狀圖開度概念變得毫無用處。可慶幸的是，如果在眼狀圖開度上施加一個置信度級，眼狀圖的用處既可得到恢復。我們來看圖 5.2a，在這個眼狀圖的中央，橫向放置有一個長 0.5 單位時距的綠色標尺。我們假定，如果有任何波形跨越這一標尺，不論是上升還是下降，則視為失敗。在本圖中，似乎還沒有任何波形已跨越過標尺，但如果波形取樣繼續累計而且訊號中含某些高斯水平抖動的話，跨越是不可避免的。

現在我們另外假定，如果每 1000 個波形中跨越標尺者不超過一個波形，則可認為測試成功。此種情況下的測試時間長短已並不重要。如果允許累計 50,000 個波形，而且跨越標尺者為 50 或更少，則算通過了測試。因此可以說， 10^3 個波形當中除了一個以外，眼狀圖的開度為 50%。由於每次跨越都被假定為代表一個位元錯誤，所以此處的位元錯誤率 (BER) 為 10^{-3} 。

如果用較短的標尺 (如 0.25 的單位時距長度) 測試相同的訊號，則跨越標尺的次數肯定會更少。平均來看，也許每 100,000 個波形中只有一個會跨越這一較短的標尺。因此可以說， 10^5 個波形當中除了一個以外，眼狀圖的開度為 25%。

如果繼續照此假定並使用一系列的標尺，您便可全面鑒定眼狀圖開度與位元錯誤率的關係或比值 (須注意的是，應允許每一標尺能向左或向右滑動，以此取得盡可能好的擬合)。如果所有標尺都按照與其相應的位元錯誤率在一個圖表上繪製，而且各標尺的端部相連，繪製出的結果將如圖 5.2b 所示。

用這種描述方式制作出的圖，稱為浴缸圖 (Bathtub Plot)，因為粉紅色的線條看上去像是一個浴缸。這種圖告訴您，在特定的置信級別上，眼狀圖的哪一水平或橫向部分完全沒有訊號轉態。

最後需注意的一點是，若需直接量測靠近圖表底部的眼狀圖開度，可能需要很長的時間累計足夠的資料。為此原因，第四節中介紹的數學模型則可用來預測效能情況，但樣值集基數要小得多。

另一個有助於找出特定 BER 等級上的抖動效能的概念便是 BER 輪廓圖繪製。BER 輪廓圖 (圖 5.2c) 是浴缸繪製的兩維擴展，可在眼狀圖開口周圍進行徑向量測，提供了特定 BER 等級上眼狀圖開口的可視化表示。

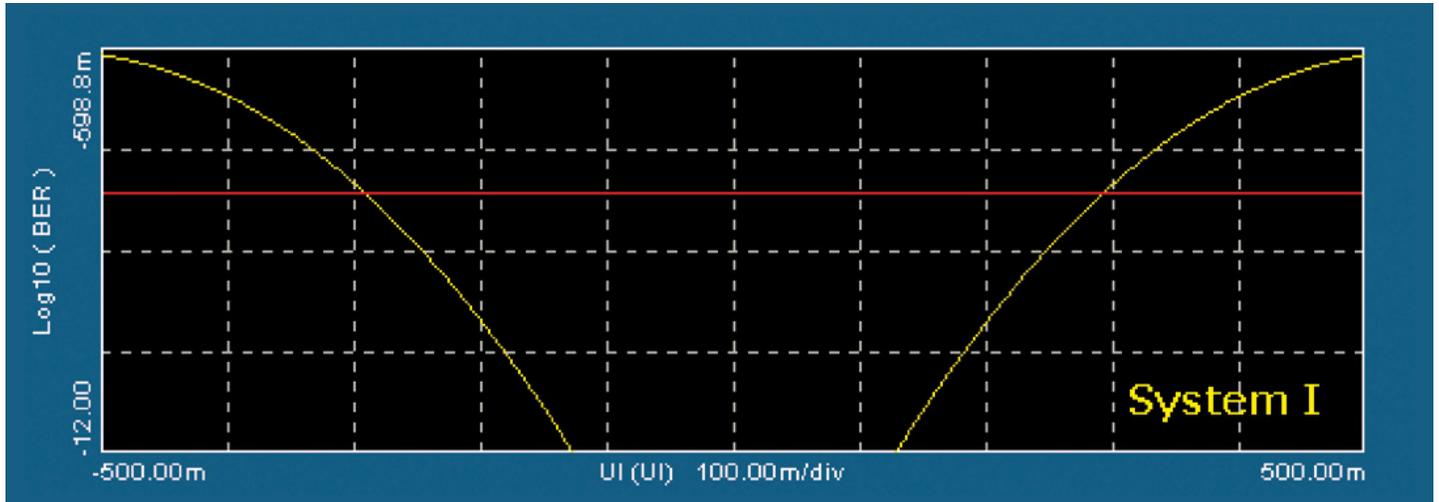


圖 5.3a 具有主要隨機水平抖動的系統 BER 繪製

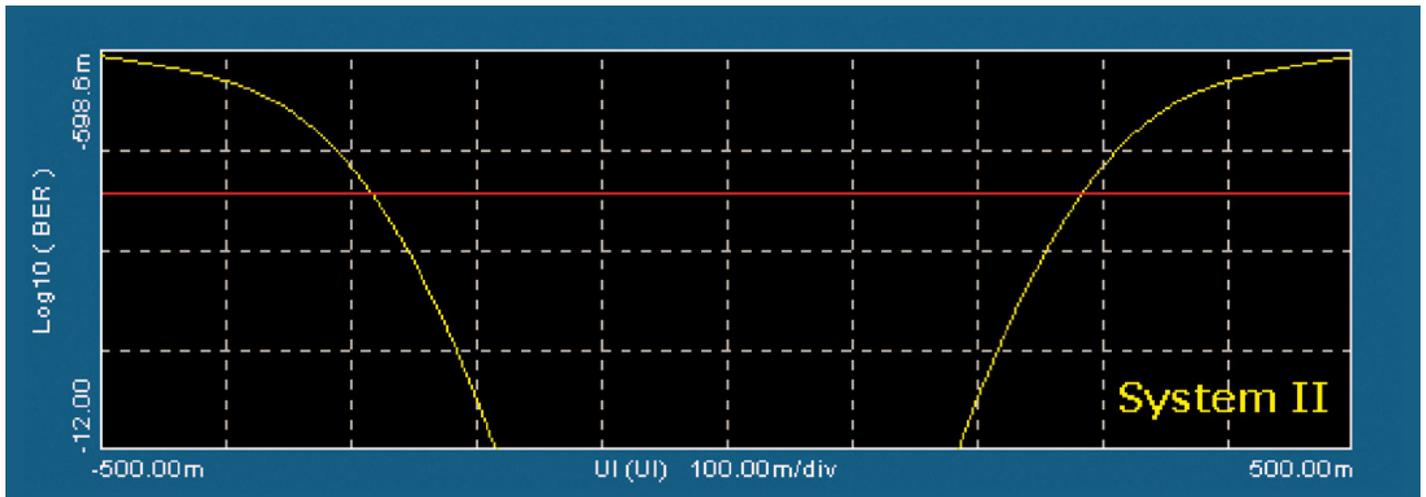


圖 5.3b 具有主要確定性水平抖動的系統 BER 繪製

5.3 BER 範例

在 4.3 節中討論的例子中，那兩個有不同水平抖動特徵的系統具有類似的 TIE 長條圖，並有相同的峰-峰水平抖動，樣值大小約為 42,000 個邊緣 (見圖 4.3b 和 4.3c)。我們現在回到這個例子，並顯示相關的浴缸曲線。圖 5.3a 所示為 System I 的浴缸曲線，圖 5.3 所示為 System II 的浴缸曲線圖。

由於這兩幅圖顯示的資料集都是 42,000 個觀察邊緣，因此我們在每幅圖上放了一個紅色的游標，它對應於 42,000 中的一個 BER 部分，或 $10^{-4.63}$ 。在這些標度上，兩個系統的眼狀圖開度都顯示為 58% 左右，System I 的眼狀圖開度實際上比 System II 大，然而在 $1e-12$ BER 上 (這是串列通訊鏈經常使用的規格點)，System I 的眼狀圖開度只有 26%。System II 的眼狀圖開度是 37%，大致上又是 System I 的一半。這一差別非常顯著，因此可用來非常容易地確定系統是否符合要求。

第六節：總結

有史以來，電器系統的品質一直受時序水平抖動的影響，但現在人們在向更高的資料速率和更低的邏輯振幅進取時，已將興趣和關注越來越多地集中在時序水平抖動的鑒定方面。通過重新設計，這方面的鑒定工作將助於識別和減少水平抖動的來源，並可按相關標準和設計規範界定、辨別或量測水平抖動。

所有水平抖動都有隨機和確定性分量。由於它的這種隨機性直，我們在規定可接受的水平抖動限制時必須十分謹慎。特別是當水平抖動效能需在很高的置信度級上，根據適中的資料量進行估算時，由其如此。為了能有效地鑒定水平抖動的隨機分量，一種較好的水平抖動分析和預測方法是使用數學模型，所用參數可根據觀察量測值進行調整。模型隨後可用來在其他情形下預測效能，並可使您洞察水平抖動的特定原因，從而幫助您瞭解如何減少水平抖動。

示波器一直是人們觀察水平抖動使用的傳統工具，所用技術通常是長條圖和眼狀圖等手段。當後端處理能力得到增強，能提供週期到週期量測、趨勢和頻譜圖、資料記錄和最壞情況下的擷取等附加功能時，示波器保持了其在鑒定時序水平抖動方面之首選工具的主導地位。而當配備了高精時脈還原、水平抖動分離算法和位元錯誤率估算等功能而在分析能力上得到進一步增強上時，示波器更上一層樓，一躍成為鑒定和減少時序水平抖動的唯一解決方案。

本文件中許多數據和範例皆取自 Tektronix DPOJET 抖動和眼狀圖分析工具，此工具可在 Tektronix MSO/DPO 系列示波器與 Tektronix BERTScope 位元錯誤率測試儀上執行，能在 10^{-12} 位準上進行實際的 BER 量測，提供了 TJ 的高可信度量測。在範例子還顯示 BERTScope 可量測碼型中個別位元上的 TJ，提供一個在 BER 測試儀量測抖動分離的新方法。

附錄 A：縮寫詞彙表

| | |
|------------|------------|
| BER | 位元錯誤率 |
| CDF | 累積分佈函數 |
| DCD | 工作週期水平抖動 |
| DDJ | 與資料相關的水平抖動 |
| DJ | 確定性水平抖動 |
| FFT | 快速傅立葉轉換 |
| ISI | 符號間干擾 |
| PDF | 概率密度函數 |
| PJ | 週期性水平抖動 |
| PLL | 鎖相迴路 |
| PSD | 功率頻譜密度 |
| RJ | 隨機水平抖動 |
| SJ | 正弦水平抖動 |
| TIE | 時間間隔誤差 |
| TJ | 水平抖動總計 |
| UI | 單位時距 |

參考文獻

1. Bell Communications Research, Inc (Bellcore), "Synchronous Optical Network (SONET) Transport Systems: Common Generic Criteria, TR-CORE", Issue 2, Rev No. 1, December 1997
2. ITU-T Recommendation G.810 (08/96) "Definitions and Terminology for Synchronization Networks"
3. Papoulis: "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, Second Edition", McGraw-Hill, 1984
4. Davenport and Root: "An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise", IEEE Press, 1987

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/南美洲與加樂比海諸國 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) 2722 9622
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 2011 年 2 月 10 日

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。

2013 年 11 月 EA/FCA-POD

55T-16146-5

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：www.tektronix.com.tw

Tektronix[®]