

## 新世代高速轉換器原理探究

更寬頻信號與 " 軟體定義 " 系統的趨勢正在持續加速發展，迫使業界創新研發 " 更好又更快 " 的資料轉換器，以推升頻寬尺度、動態範圍與功率效率至新高基準。

作者：Dave Robertson/ADI 公司

作為某種介於真實世界的類比領域與由 0 與 1 組成的數位世界之間的閘道，資料轉換器在現今信號處理領域已成為不可或缺的關鍵因素。過去三十多年以來，資料轉換器大量創新發展，提升效能與架構並且影響著一切事物，從醫學影像到行動通訊，再到消費性影音產品等等，又協助創造出各種全新應用。

寬頻通訊與高性能成像應用的持續發展也為高速轉換器研究標出特定重點 --- 轉換器所處理的頻寬範圍從 10 MHz 到超過 1 GHz。使用多種轉換器架構可達到這些高速的特定需求。而類比與數位之間高速雙向轉換在信號完整性方面也呈現出特殊挑戰 --- 不只對於類比信號，還包括時脈與資料信號。對於這些問題的理解相當重要，乃是由於從選擇元件到整體系統架構都受到它們的影響。

### " 快 " 不停歇

在許多科技領域，人們將科技發展與高速化並為一談，例如數據通訊方面，從有線到無線網路再到行動通訊，所有議題都是為了達到更快傳送每個位元，而在微處理器、數位信號處理器(DSP)與現場可編程邏輯閘陣列(FPGA)方面，則透過推升時脈率大幅提高效能，其主要透過減縮微影製程以較小電晶體達到低功率與高速切換操作。

這種發展變動又造成處理能力與資料頻寬成倍擴展的環境，強效數位引擎不停驅動著，使得某種數位化胃口大開，彷彿聽見喀吱喀吱地嚼食各式資料與信號，無論影像、視頻影片、寬頻光譜，管

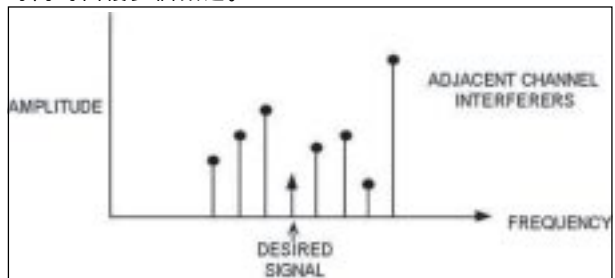
它有線或無線，總之都好吃。任何一個 100-MHz 處理器都能有效處理 1 至 10 MHz 頻寬信號而那些高速上千兆赫處理器足以應付更寬頻信號，大約是數百個 MHz 等級。

處理器效能與速度增加自然導致更快的資料轉換，寬頻信號擴展其頻寬(通常衝到物理上或調節器的頻譜上限)，而影像處理系統則要每秒運算更多像素以快速處理高解析影像。各種系統型態會有各式發揮處理器極限的設計，其中也包括平行處理設計趨勢，即採用多通道轉換器。

另一種重要的系統結構轉變則是朝向 " 多載波 / 多通道 "，甚至 " 軟體定義 " 系統。往常 " 類比密集 " 的設計花了許多功夫處理類比信號調適(濾波、放大、頻率轉換等等)；類比信號得先仔細備妥之後才進行後續數位化階段處理。

FM 無線電就是個好例子，一般無線電電台會具有 200-kHz 頻寬，其範圍落在 88 至 108MHz 之間的 FM 頻帶，而常用的接收器會先將某個電台信號轉換到 10.7 MHz 的中間頻率，然後濾掉其它頻道，接著放大信號至最合適的振幅進行後續解調。

圖 1：儘管電路變得複雜，多載波系統展現許多優點，例如同時回復多個頻道。



而多載波架構則是將整個 FM 頻帶(20MHz)數位化, 再以數位處理器回復所要的電台頻道信號。

多載波架構需要更複雜的電路設計卻也實現出絕佳優勢(如圖 1), 例如系統可同時回復多個頻道, 包括一些頻帶邊緣電台。若有妥善設計, 多載波架構可透過軟體組態以支援一些新型無線電規格, 例如落在頻帶邊緣的高品質無線電(HD radio)信號。

這種設計的終極延伸發展乃是得出可處理所有頻帶的寬頻數位轉換器, 與可恢復各式信號的強效處理器。可稱之為 "軟體定義無線電"(software-defined radio)。某些研究領域也有等效架構, 諸如 "軟體定義儀器"(software-defined instrument)、 "軟體定義相機"(software-defined camera)等等。可將這種設計認為信號處理的虛擬化, 而實現各種彈性架構所需的硬體便是高性能數位處理器與高速、高效能資料轉換器。

## 頻寬與動態範圍

無論類比信號或數位信號, 頻寬與動態範圍是信號處理的基本尺度(如圖 2)。這倆因素決定系統實際處理的訊息量, 以通訊理論而言, Shannon 定理使用這兩種尺度描述通道之中訊息容量的理論上限。

這種原理適用於各種設計規格, 例如對於影

像處理系統, 頻寬決定可處理的像素的個數, 而動態範圍決定最暗與最飽和之間的像素強度或色彩範圍。

根據奈氏取樣理論(Nyquist sampling theorem)資料轉換器的可用頻寬會有個理論上限, 若所處理的信號頻寬為  $F$ , 則轉換器取樣率應至少到達  $2F$  (此定律適用任何類比或數位取樣機制)。對於實作而言, 超取樣可以大幅簡化系統設計, 因此 2.5 至 3 倍頻寬是更典型的運用。

正如先前所述, 持續增進運算效能使系統得以處理更多頻寬, 導致各方面如行動通訊、有線電視、有線或無線網路、影像處理與其它各種儀器朝向寬頻設計發展, 這種設計趨勢又渴望追求更多頻寬與更高轉換器取樣率。

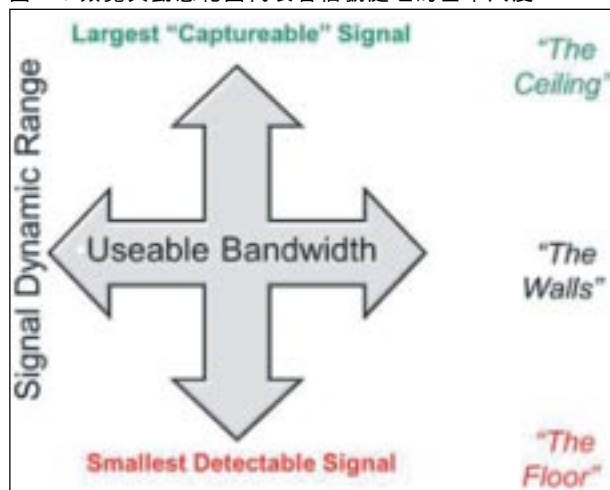
如果直觀上頻寬尺度可說是清楚的話, 相對的動態範圍可能算是稍微不明顯, 對於信號處理而言動態範圍表示在不經縫合或剪輯處理之下, 系統有效獲取的最大與最小信號之間的散布範圍。

動態範圍有兩種類型, 其一為浮點型, 可理解為某種可編程增益放大器(programmable gain amplifier; PGA)置於低解析度類比數位轉換器(ADC)前端, 想像某個 4 位元 PGA 置於 8 位元轉換器前端以達到 12 位元動態範圍。這種安排以設置低增益獲取大信號值而不超過轉換器範圍。而當信號極小時, 可將 PGA 增益提升以放大信號使其通過雜訊門檻。信號來源可以是強或弱的無線台, 又可以是影像中亮或暗的像素。相對於傳統架構每次回復單一信號, 這種浮點動態範圍設計可說是非常有效。

第二種動態範圍為瞬間型, 又更超強, 系統足以在不經剪輯之下具有足夠動態範圍同時獲取大值與微小信號, 得採用 14 位元轉換器以達到所需效果。

許多應用也會採取這種原理, 例如同時恢復一強一弱的無線電信號, 或行動電話呼叫, 或者影像中同時有極暗與極亮的段落。隨著系統發展至更複雜信號處理運算, 動態範圍方面的設計需求也更

圖 2：頻寬與動態範圍代表著信號處理的基本尺度



多，以允許系統處理更多信號。如果所有信號強度一致，且須處理兩倍的信號量，系統會需要額外 3dB 的動態範圍(假設其它條件相等)。也許正如先前指出，更重要的考量是當系統得同時處理一強一弱信號時，其所要求的動態範圍可能比想像中還更誇張。

### 動態範圍的各種測量

就數位信號處理而言，動態範圍最關鍵的參數便是用來表示信號的位元個數，又稱字長。簡單地說，就像 32 位元處理器會比 16 位元處理器有更多動態範圍。信號若太大會被 " 剪輯 "，這種剪輯過程乃是高度非線性運算又破壞大部分信號的完整性，而太小的信號又可能被當成雜訊忽略而遺失。這種有限解析度時常被稱為量化誤差(quantization error)，或量化雜訊，這也是建立系統偵測能力下限的重要因素。

量化雜訊也是混合信號系統的因素之一，然而許多因素共同決定資料轉換器適用的動態範圍，不同因素也有各自的規範標準：

信號雜訊比(signal-to-noise ratio ; SNR)：頻帶中滿量程(或稱)全刻度與總雜訊的比值。雜訊可能來自量化雜訊(先前所述)，熱雜訊(常見於實際應用)，或其他錯誤條件(例如抖動 jitter)。

靜態非線性：微分非線性(differential nonlinearity ; DNL)與積分非線性(integral nonlinearity ; INL)是來自轉換器輸入端與輸出端之間直流轉換函數非理想性(DNL 常在影像處理系統建立動態範圍)。

總諧波失真(total harmonic distortion ; THD)：靜態或動態非線性產生諧波，而遮蔽其它信號。THD 在音訊系統通常限制動態範圍的效用。

無雜散動態範圍(spurious-free dynamic range ; SFDR)：它將最高頻譜視為 " 毛刺波 " (spur)，無論是第二或第三諧波、時脈饋線、或甚至 60-Hz 的哼鳴聲。相較於輸入信號，由於頻譜音調或毛

刺波會遮罩小值信號，SFDR 在許多通訊系統上對於可用動態範圍是很好的代表量。

其它可用規格：事實上每個不同應用對於動態範圍都有各自效能表述。資料轉換器解析度可視為動態範圍的第一義，然而選擇合適規格下決定是非常重要的。關鍵原則是越多越好，許多系統會馬上需要搞到更多頻寬，動態範圍的影響卻沒那麼明顯，卻還得更費工。

值得一提的是，雖然頻寬與動態範圍是信號處理的兩個主要尺度，將 " 效率 " 當成第三尺度也很有用，有助於我們考量 " 這些額外效能得付出多少代價來換 "。我們固然可將代價等同於採購價格，然而對於資料轉換器与其它電子信號處理器，更 " 純技術 " 的量法則是從功耗來看。一般高效能系統，其具有更多頻寬與動態範圍，往往也更加耗電。預期未來技術進展將是在兼顧推升頻寬與動態範圍同時，還得降低功耗。

### 主要應用

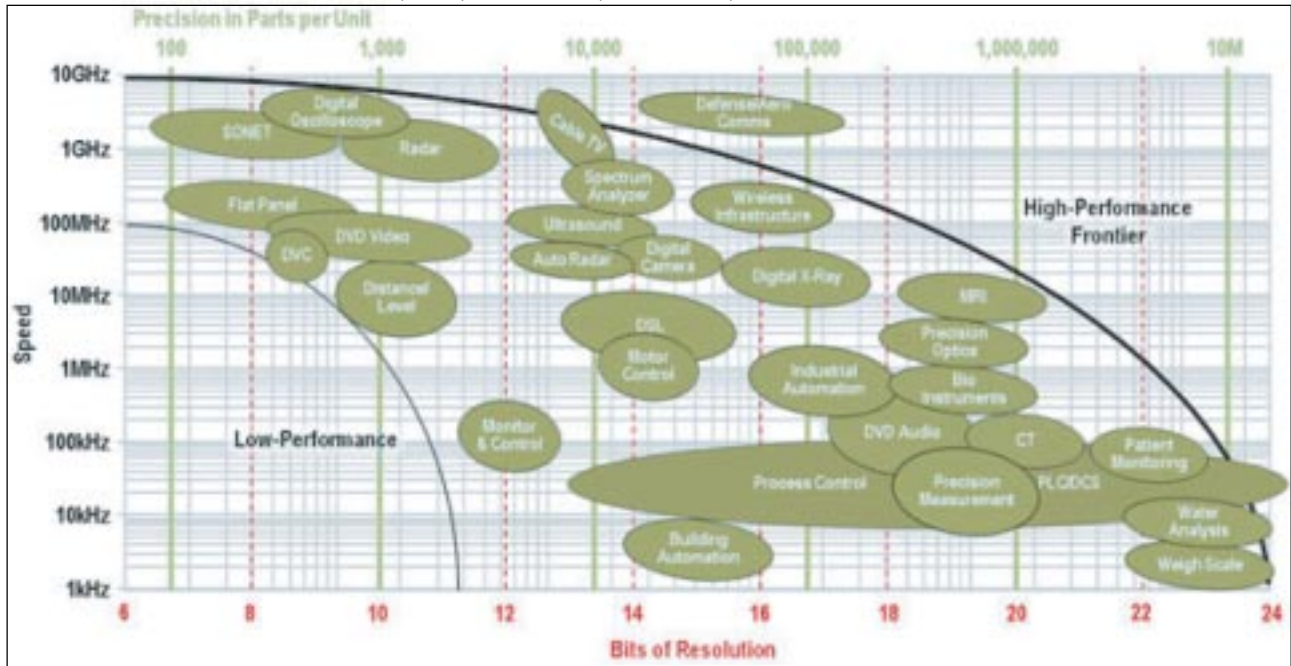
如先前所述，每個不同應用對於這些基礎信號尺度有各自需求，在給定應用中也有大範圍效能變化。例如，百萬像素相機對比於千萬像素相機。圖 3 示意不同應用所需的頻寬與動態範圍。上半部通常是指高速應用，即轉換器取樣率在 25 MHz 可有效處理 10 MHz 或更高頻寬信號。

值得一提的是，這種 " 應用圖 " 也非一成不變，既有應用可改採新高效科技以提高其能力，例如高畫質攝影機或高解析 3D 超音波機器。每年都會冒出些全新應用，許多邊緣外的應用可能因為採取高速高性能組成元件而到達性能前沿。如此也產生一道轉換器性能的動態擴展邊緣，如同池塘的漣漪。

另一個重點是多數應用會有功耗考量。對於攜帶型、以電池供電的裝置，功耗可能還是主要技術限制，即使是插電系統也會發生信號處理元件(類比或數位)功耗最終限制應用系統在既定區域的達成度。



圖 3：一些典型的應用與其所需的頻寬(速度)與動態範圍(解析度位元)



## 科技趨勢與創新 - - - 如何到達彼岸

鑒於這種 " 應用導向 " 而不斷提升高速資料轉換器效能，業界以促進新科技發展因應。 " 科技推動 " 方式研發先進高速資料轉換器從以下幾個因素取得進展：

**製程：**摩爾定律與資料轉換器 - - - 此乃半導體產業特有的持續提升數位處理器性能的發展軌跡，大幅增進晶片製程與精細蝕刻，深次微米 CMOS 電晶體相較早期產品具有更大切換速度，使各種新型控制器、數位處理器、現場可編程邏輯閘陣列(FPGA)達到數千兆赫速度等級。

如同資料轉換器，混合信號電路也可利用先進製程優勢按照摩爾定律發展到高速，然而對於混合信號電路而言，先進製程電路通常運作在較低電壓，而使類比信號振幅較小，使其較難跨越熱雜訊門檻 - - - 狀況是增速卻降低動態範圍。

**先進架構**(這不是阿嬤年代的資料轉換器)：近 20 年以來，先進半導體製程掀起幾波高速資料轉換器架構創新，導致出色功耗效能之下更多頻寬與動態範圍。有多種方法使用於高速 ADC，如快閃、摺疊、交錯、管線等等這些傳統上的低速應

用，包括漸次逼近暫存器(successive approximation register；SAR)與delta sigma(三角積分)，也已適用於高速運算。

每種架構各有其優缺點，某些特定應用基於設計取舍會試圖找出最優先架構。對於高速 DAC 來說，設計傾向選擇切換電流模式架構(switched-current-mode)。這種架構有許多 " 變型 "，切換電容方法穩當地增加速度，並且仍流行於一些嵌入式應用設計。

**數位輔助方法：**除了製程與架構，高速轉換器電路技術歷經相當多數創新，古典校準方法對於補償積體電路元件固有不匹配乃是至關重要也容許達到更高動態範圍。校準方法已經超越了糾正靜態誤差，而越多地用在補償動態非線性，包括設定誤差與諧波失真。

整體來說，這一切創新大幅增進當今高速資料轉換器的性能。

## 實現方法

實現寬頻混合信號系統所需不僅是合適的資料轉換器 - - - 這些系統可在信號鏈其他部分之間寄

予嚴格要求，其挑戰又是在較高頻寬實現良好動態範圍 --- 使更多信號藉由其高效處理機能出入於數位領域。

**寬頻信號調理：**對於一般單載波系統而言，信號調理乃是為了儘快儘可能移除其餘信號之後放大主信號，這通常涉及選擇性濾波，與調整至主信號的窄頻系統。這類調整電路可非常有效地實現增益，在某些情況下，頻率規劃(frequency-planning)技術有助於排除諧波或其餘毛刺波。寬頻系統無法使用這些窄頻技術，因此這類系統上實作寬頻放大也充滿著挑戰性。

**資料介面：**傳統 CMOS 介面無法支援遠超過 100 MHz 的資料頻率，而低壓差動擺幅(low-voltage differential swing; LVDS)資料介面運行於 800 MHz 至 1 GHz，可平移至多重匯流排介面，或移至串

列解串介面(SERDES)以高達 12.5 Gsamples/s 狀況之下運作(參考 JESD204B 標準)。多重資料通道技術常用於支援轉換器介面上的相異解析度或相異速度資料處理，這種介面一般也相當複雜。  
**時脈介面：**處理高速信號對於時脈品質要求甚苛，時域上的抖動 / 誤差會轉換成信號上的雜訊或誤差(如圖 4)。當信號大於 100 MHz 時，時脈抖動或相位誤差可能成為轉換器可用動態範圍的限制因素。"數位品質"的時脈也許將不適用於這種系統，於是可能會需要採用高性能時脈。

### 結語

更寬頻信號與軟體定義系統的趨勢正在持續加速發展，業界為了回應這種趨勢，創新研發 "更好又更快" 的資料轉換器，以推升頻寬尺度、動態範圍與功率效率至新高基準。

### 作者簡介：


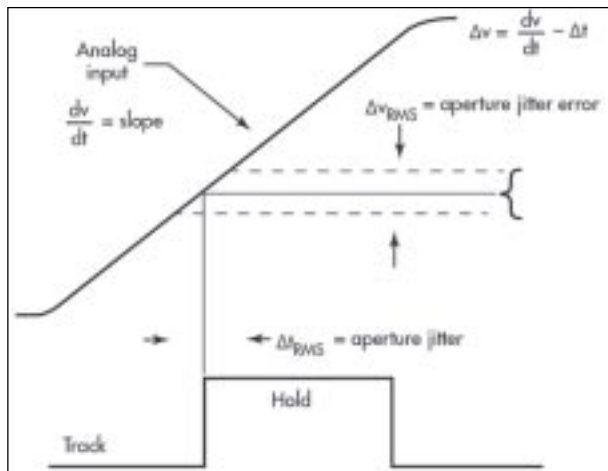
David("Dave") Robertson 是 ADI 公司類比科技副總裁，他在轉換器與混合信號電路領域擁有 16 項專利，參與兩屆 "最佳面板" ISSCC 國際固態電路會議小組研討會，並且身為共同作者曾獲 IEEE Journal of Solid State Circuits 1997 最佳論文獎。也曾擔任 ISSCC 技術程序委員(2000~2008)和類比與資料轉換器小組主席(2002~2008)。其學歷為 Dartmouth College 學士，具有經濟與電機雙學位。讀者可以透過 [david.robertson@analog.com](mailto:david.robertson@analog.com) 與他連繫。 

圖 4：時脈中的抖動 / 誤差成為信號中的雜訊或誤差



## 2014 年北美 PCB 業務與去年持平但前景向好

IPC(國際電子工業聯接協會)近日發佈,《12 月份北美地區 PCB 行業調研統計報告》。報告顯示 12 月份銷售量和訂單量與 2013 年同期持平,但是訂單出貨比在第四季度表現良好,對 2015 年的銷量是個積極的信號。

2014 年 12 月份 PCB 總出貨量,與去年同期相比,同比成長 3.4%,推動年初至今的出貨量改善至 -0.8%。與上月相比,PCB 總出貨量,環比成長 6.4%。

與去年同期相比,12 月份 PCB 總訂單量成長 7.9%,使年初至今的訂單量進一步成長至 0.6%。與上個月相比,12 月份的訂單量,環比上升 13.4%。

北美地區 PCB 訂單出貨比,在 12 月份強勁增至 1.07。

IPC 市場調研總監 Sharon Starr 說:"2014 年北美 PCB 業務,與 2013 年相比,總體持平。2014 年全年銷售量落後 2013 年不到一個百分點,然而訂單量高於去年 0.6 個百分點。可喜的是第四季度的訂單出貨比表現強勁,可以預期 2015 年的銷售量將表現不錯。"