

# 在基於 $\Sigma$ - $\Delta$ ADC 的系統上實現同步

同步關鍵分散式系統時，新型  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 架構可避免中斷的資料流程

■作者：Luis Beltran Gil

ADI 精密轉換器部門 SAR ADC 應用工程師

## 摘要

本文介紹了基於 SAR ADC 的系統和基於 sigma-delta ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) ADC 的分散式資料獲取系統同步的傳統方法，且探討了這兩種架構之間的區別。我們還將討論同步多個  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 時遇到的不便。最後，提出一種基於 AD7770 採樣速率轉換器 (SRC) 的創新同步方法，該方法顯示如何在不中斷資料流程的情況下，在基於  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC 的系統上實現同步。

## 簡介

您是否曾經想像過，自己正坐在一輛打破音障的超音速飛機上？自從協和式超音速噴射客機退役後，這似乎已經成了一個不可能實現的夢想，除非您是一名軍機駕駛員或是一名太空人。

身為一名電子工程師，我對一切事物的運作方式都非常著迷，比如對布穀鐘，我很好奇它的每個獨立系統如何與其他系統和諧地保持同步。

我們生活的各方面也是這樣。我們生活在一個相互聯繫的世界，一切都是同步的——從銀行伺服器到智慧手機的警報。區別就在於各種特定情況下要解決的問題的大小或複雜性、不同系統的同步與所需的精度（或者容差），或者要同步的系統的大小。

## 分散式系統

在獨立設計中，使用的本地時脈或振盪器本身

就會進行同步。但是，當獨立設計需要整合到更廣泛的系統（我們稱之為分散式系統）中時，問題的角度會發生改變，獨立系統也應該根據用例進行設計。

要計算一個系統中電器的暫態功耗，必須同時測量電流和電壓。

透過快速分析，您可以用三種不同的方法來解決問題：

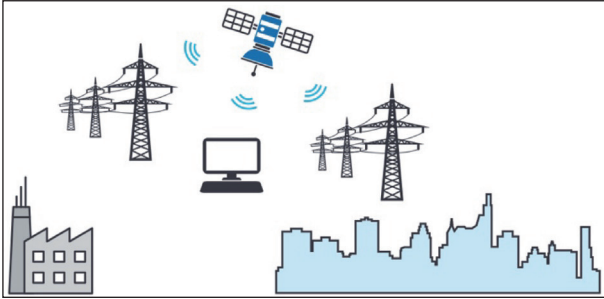
- 使用兩個同步單通道 ADC 來測量電流和電壓。
- 使用一個多通道同步採樣 ADC，它的每個通道都可能有一個 ADC，或者每個通道有一個採樣保持電路。
- 使用一個多工 ADC，並且插入測量值，以補償電壓和電流測量之間的時間平移。

至此，您可能已經獲得可以解決該問題的可靠解決方案，但是，如果我們擴展系統需求，從原來的單件電器輻射到整個應用，必須測量整個工廠中的每個交流電源插座的功率呢？現在，您原有的暫態功耗設計必須分佈應用於整個工廠，而且要保證其設計能夠同時測量和計算每個交流電源插座功耗。

您現在面對的是一個分散式系統，它由一組相互獨立但又緊密相關的子系統組成。每個子系統需要提供在同一時間點採樣的資料，以便計算工廠的暫態總功耗。

最後，如果我們繼續擴展假設的應用示例，想像一下，如果要將您的原始設計整合到國家電網之

圖 1: 電網同步。



中。現在，您檢測的是數百萬瓦功率，任何一個鏈路出現問題都會導致可怕後果，例如因為壓力導致的線路損壞，反過來，這又可能導致停電，造成可怕後果，例如火災，或者醫院停電。

因此，所有系統都必須準確同步，也就是說，在整個電網中捕獲的資料必須是在同一時刻捕獲，無論各資料所處的地理情況如何，具體如圖 1 所示。

在這些情況下，您可以將其視為一個關鍵的分散式系統，且必須從每個感知節點獲得連續的、完全同步的資料流程。

與電網示例類似，這些要求也適用於航空航太或工業市場中的許多其他關鍵分散式系統示例。

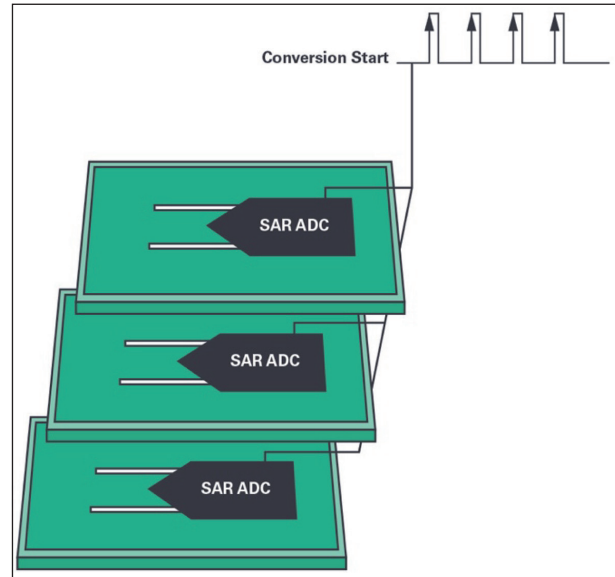
## 奈奎斯特 ADC 和過採樣 ADC

在開始解釋如何同步多個 ADC 的採樣時刻之前，最好先瞭解每個 ADC 拓撲如何決定何時採樣類比輸入訊號，以及每種架構的優缺點。

- 奈奎斯特或 SAR ADC：該轉換器的最大輸入頻率由奈奎斯特或半採樣頻率決定。
- 過採樣或  $\Sigma - \Delta$  ADC：最大輸入頻率一般與最大採樣頻率成比例，一般約為 0.3。

一方面，SAR ADC 的輸入訊號採樣時刻透過施加於轉換開始針腳的外部脈衝進行控制。如圖 2 所示，將一個通用轉換開始訊號應用到被同步系統中每個 SAR ADC 上，它們都會在轉換起始訊號的邊緣同時觸發採樣。只要確保訊號之間沒有明顯的延遲，即轉換開始脈衝在同一時刻及時到達每個 SAR ADC，系統同步就很容易實現。請注意，到達轉換開始針腳的脈衝與實際採樣時刻之間的傳播延

圖 2: 同步基於 SAR ADC 的分散式系統。



遲不能因設備而不同，在採樣速度相對較慢的精密 ADC 中，這種延遲不顯著。

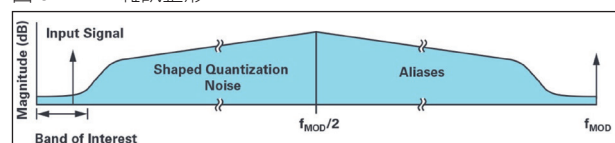
在應用轉換開始脈衝之後的某個時間（也稱為轉換時間），轉換結果將通過所有 ADC 的數位介面顯示。

另一方面，由於架構不同， $\Sigma - \Delta$  ADC 操作也略有不同。在這種類型的轉換器中，內部核心（即調變器）對輸入訊號採樣的頻率（調變器頻率， $f_{MOD}$ ）比奈奎斯特規定的最小頻率高，因此它被稱為過採樣 ADC。

透過按比嚴格需要的頻率更高的頻率採樣，能夠收集更多的樣本。然後採用平均濾波器對所有 ADC 資料進行後處理，原因有二：

- 每 4 個平均樣本，雜訊降低 1 位元。
- 平均濾波器轉換函數是一個低通濾波器。當  $\Sigma - \Delta$  架構將其量化雜訊推向高頻時，應該移除平均濾波器轉換函數，如圖 3 所示。所以，本次濾波由這個平均濾波器完成。

樣本的平均數量，即抽取率（N），會決定輸出

圖 3:  $\Sigma - \Delta$  雜訊整形。

資料速率 (ODR)，輸出資料速率是 ADC 提供轉換結果的速率，單位為樣本 / 秒，如公式 1 所示。抽取率通常是整數，帶有一組可在數位濾波器上離散程式設計的預定義值 (即  $N = 32、64、128$  等)。因此，透過保持  $f_{MOD}$  常量，ODR 將根據預定義值集內的  $N$  值進行配置。

$$ODR = \frac{f_{MOD}}{N} \quad (1)$$

平均過程通常由一個 sinc 濾波器在內部實現，調變器的類比轉換開始脈衝也在內部生成，因此不會從外部管控轉換過程觸發。這種類型的轉換器實際會連續採樣，追蹤輸入訊號，並處理獲得的資料。一旦該過程 (採樣和平均) 完成，轉換器就會生成一個資料就緒訊號，告知控制器資料可以通過數位介面回讀。

如圖 4 所示， $\Sigma - \Delta$  的工作流程可以概括為四個主要步驟：

- 調變器以  $f_{MOD}$  頻率對訊號採樣。
- 透過 sinc 數位濾波器對樣本進行平均。
- 對 sinc 濾波器提供的資料進行偏移和增益校正。
- 資料就緒針腳切換，表示轉換結果已就緒，可由控制器回讀。

由於沒有從外部控制何時觸發內部採樣，所以如果要對分散式系統中的多個  $\Sigma - \Delta$  ADC 進行同步，必須同時對

所有數位濾波器實施重設，這是因為平均轉換啟動是由數位濾波器控制的。

圖 5 顯示在所有  $\Sigma - \Delta$  ADC 都採用相同的 ODR 和  $f_{MOD}$  的情況下，對同步產生的影響。

與基於 SAR ADC 的系統一樣，必須確保重定濾波脈衝同時到達各個子系統。

但是，請注意，數位濾波器每次重定時，資料流程都會被中斷，這是因為濾波器必須重新設定。在本例中，資料中斷的持續時間由數位濾波器的順序、 $f_{MOD}$  和抽取率決定。在圖 6 顯示的示例中，濾波器的 LPF 特性將延遲時間，直到生成有效的輸出。

圖 4:  $\Sigma - \Delta$  ADC 工作流程圖。

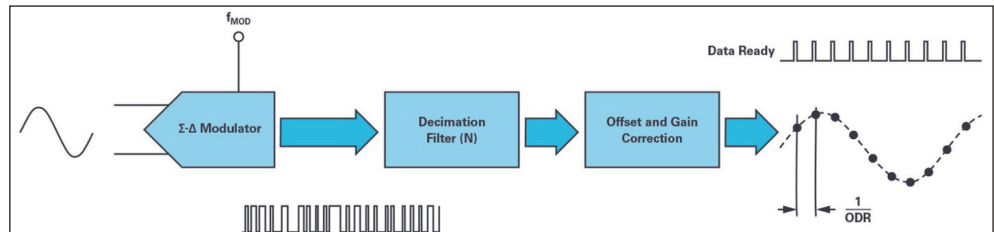


圖 5:  $\Sigma - \Delta$  系統重定同步。

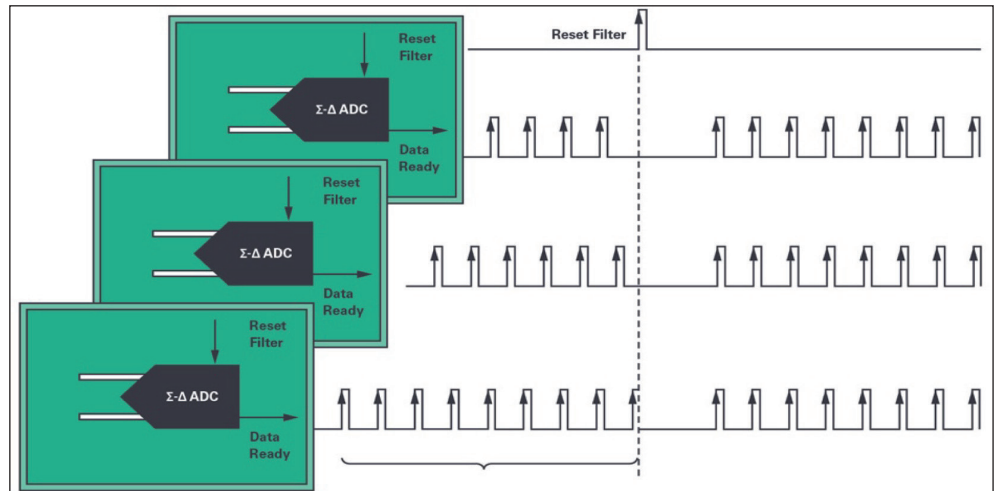
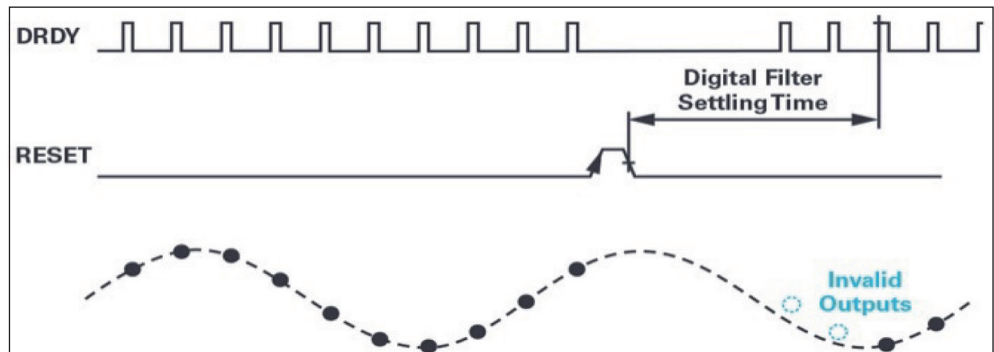


圖 6: 由於數位濾波器的建立時間導致的資料中斷。



## 對分散式系統同步採樣的啓示

在分散式系統中，全域同步訊號（我們稱之為 Global\_SYNC）在所有模組 / 子系統之間共用。此同步訊號可以由主系統或協力廠商系統（例如 GPS 1 pps）生成，如圖 1 所示。

接收到 Global\_SYNC 訊號後，每個模組必須重新同步每個轉換器的暫態採樣（很可能是其本地時脈），以確保同時性。

在基於 SAR ADC 的分散式系統中，重新同步本質上很簡單，如前一節所述：本地時脈（管理轉換開始訊號）再次與 Global\_SYNC 訊號匹配，之後同步獲得訊號。

這意味著要生成頻率雜散，因為在同步期間，會在不同時間和距離採集一個樣本，具體如圖 7 高亮藍色部分所示。在分散式應用中，這些雜散可能是可以接受的，而中斷資料流程在某些應用中則確實至關重要，例如前面提到的電力線監視之類的應用。

在基於  $\Sigma - \Delta$  的分散式系統中，重新與 Global\_SYNC 訊號同步的過程會稍微複雜一些，這是因為調變器會持續對類比輸入訊號採樣，而轉換過程也不像 SAR ADC 一樣從外部控制。

要對多個基於  $\Sigma - \Delta$  的分散式系統實施同步，一個簡單的方法就是重置數位濾波器：丟棄收集和存儲的要在平均濾波器上使用的所有調變器示例，並且清空數位濾波器。這意味著：根據數位濾波器的順序，它需要一些時間才能再次確定其輸出，如圖 5 和圖 6 所示。

圖 7：調整 SAR ADC 轉換過程，使之與全域同步訊號匹配。

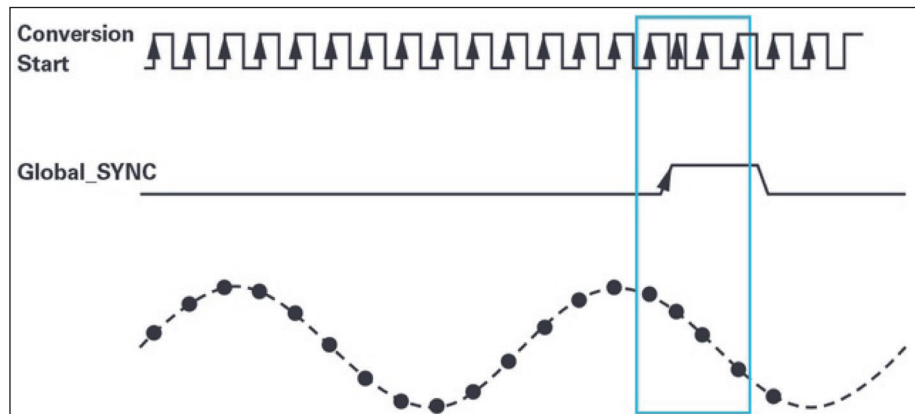


圖 8：被採樣的類比輸入和資料就緒切換之間的時間延遲。

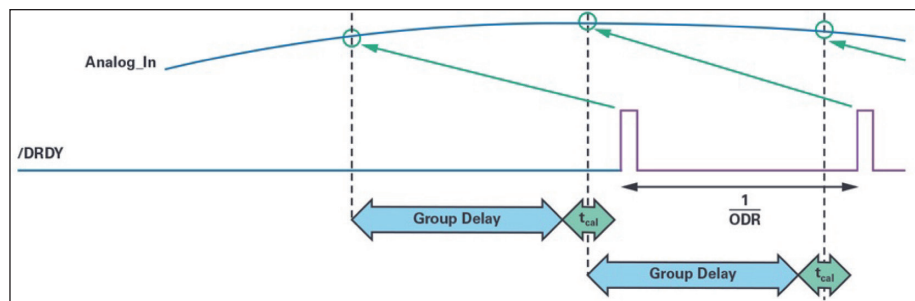
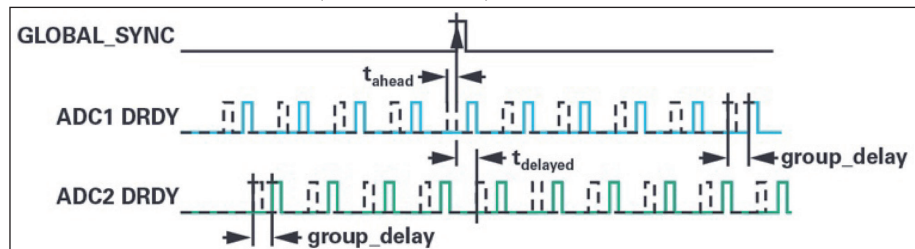


圖 9：量化每個 ADC 的採樣時刻（假設群延遲已知）和全域同步訊號之間的時間差。



數位濾波器完成設定之後，會再次提供有效的轉換資料，但考慮到設置所花費的時間，在  $\Sigma - \Delta$  ADC 上重置數位濾波器可能導致的資料中斷是不可接受的。分散式系統需要重新同步的頻率越高，資料流程中斷的次數就越多，而因為這種持續的資料流程中斷， $\Sigma - \Delta$  ADC 將無法應用於關鍵的分散式系統中。

傳統使用的最小化資料中斷的方法是使用可調諧時脈，例如 PLL，它可以降低全域同步頻率和 fMOD 頻率之間的誤差。

接收到 Global\_SYNC 脈衝後，可以採用類似以下的流程，計算  $\Sigma - \Delta$  ADC 轉換開始和 Global\_SYNC 脈衝之間的不確定性：



- 控制器計算採樣時刻 (透過瞭解群延遲從資料就緒訊號向後計算, 如圖 8 所示) 和 Global\_SYNC 脈衝之間的時間差。群延遲是一份資料手冊規範, 說明從對輸入採樣到資料就緒針腳開啓 (表示樣本已經就緒, 可以讀取) 之間的時間間隔。
- 如果採樣時刻和 Global\_SYNC 之間存在時間差, 那麼本地控制器會量化這個時間差 (tahead 或 tdelayed), 如圖 9 所示。
- 如果存在差異, 可以重新設定  $\Sigma - \Delta$  濾波器, 或者修改 fMOD, 以便在幾個採樣期間調整  $\Sigma - \Delta$  採樣。無論哪種情況, 都可能漏掉幾個樣本。注意, 通過改變局部時脈頻率 (fMOD),  $\Sigma - \Delta$  ADC 會改變其輸出資料速率 (ODR = fMOD/N), 如此, ADC 會減慢或加快對類比輸入採樣的速度, 以期和系統中餘下的 ADC 和 Global\_SYNC 同步。
- 如果 fMOD 被更新, 那麼在同步之後, 主時脈頻率會恢復到原來的頻率, 以返回到之前的 ODR,

而子系統則從該時刻開始同步。

在一段時間內改變 fMOD 的過程如圖 10 所示。

這種方法在某些情況下可能不適用, 因為有幾個細節需要考慮:

- 將調變器頻率更改為非整數倍值可能是不實際的。
- 如果可以對頻率進行微調, 那麼改變的頻率步長必須很小, 否則數位濾波器可能會超出限制, 導致同步的實施時間變長。
- 如果所需的 ODR 改變足夠大, 可以透過改變抽取率 (N), 而不是改變調變器頻率 (fMOD) 來解決, 但是, 這也意味著會丟失一些樣本。
- 使用 PLL 意味著在達到期望的調變器頻率之前, 除了自身的建立時間之外, 還會額外消耗功率。

一般來說, 整個系統的複雜性和成本會隨著系統規模的增大而增加, 特別是與 SAR ADC 相比, 對於後者, 只需要將轉換開始調整到與 Global\_SYNC 訊號匹配, 即可輕鬆解決這個問題。此外,

在許多情況下, 因為存在上述系統限制, 所以  $\Sigma - \Delta$  ADC 無法使用。

## 不中斷資料, 輕鬆重新同步 $\Sigma - \Delta$ ADC

AD7770 系列產品 (包括 AD7770、AD7771 和 AD7779) 具有內建 SRC。隨著這種新架構推出, 固定的抽取率 (N) 導致的限制將不復存在。

SRC 允許您採用十進位數字 (而不僅僅是整數) 作為抽取率 (N), 因此, 您可以採用所需的任何輸出資料速率。在之前的同步方法中,

圖 10: 同步方法, 採用 PLL 來調諧調變器的頻率。

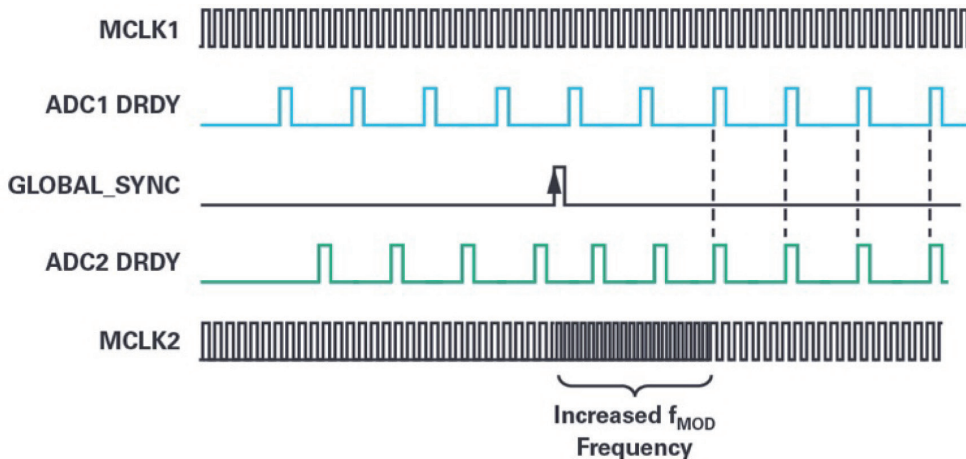
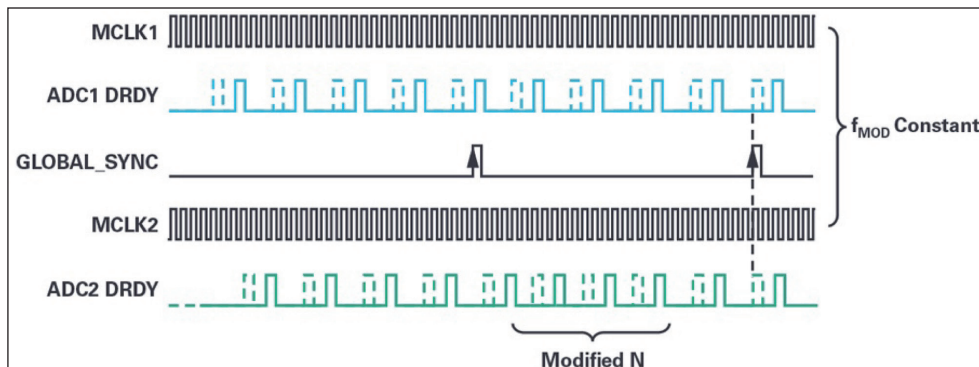


圖 11: 採樣速率轉換器動態調整 ODR, 以便在所有設備上重新同步採樣。



由於  $N$  是固定的，所以必須更改外部時脈來調節  $f_{MOD}$ ，之後才能實施同步。

使用 AD7770 系列產品之後， $N$  會變成可靈活編程，以及可隨時編程的值，所以無需更改  $f_{MOD}$ ，也無需中斷資料，即可對 ODR 編程。

這種對基於  $\Sigma - \Delta$  的子系統重新同步的新方法利用 SRC 來簡化重新同步過程，最大程度地簡化了前面章節提到的複雜性。

新方法如下：

- 接收到 Global\_SYNC 訊號之後，各子系統檢查採樣是否同步，以資料就緒訊號為參考，利用群延遲查找實際採樣時刻。
- 如果採樣時刻和接收到 Global\_SYNC 訊號的時間之間存在時間差，那麼本地控制器會量化這個時間差 (thead 或 tdelayed)，如圖 9 所示。
- 這時，會對一個新的 ODR 編程，使其透過 SRC 更改抽取率 ( $N$ )，從而臨時生成更快或更慢的 ODR。整個重新同步操作一般會用到 4 個樣本 (如果在 AD7771 上啓用了 sinc5 濾波器，則需要 6 個)，但是因為這些樣本仍然有效且完全設置，所以不會導致資料流程中斷。
- 一旦接收到所需數量的 DRDY，就會重新設定抽取因數，以返回所需的 ODR，如此可以保證  $\Sigma - \Delta$  ADC 與其餘子系統保持同步，如圖 11 所示，

其不造成資料中斷。

## 結論

關鍵分散式系統需要所有子系統同步進行轉換，且具備持續的資料流程。

SAR 轉換器提供一種直覺的重新同步採樣方法：透過重新調整轉換開始訊號，使其與 Global\_SYNC 脈衝匹配。

在需要高動態範圍 (DR) 或訊噪比 (SNR) 的應用中，SAR 不可使用，但是傳統  $\Sigma - \Delta$  轉換器也變得難以使用，因為這些轉換器不具備靈活性，無法在不中斷資料流程的情況下重新調節。

如示例所示，SRC 提供了一個無縫同步常式，與其他解決方案相比，它的延遲更小、成本和複雜性更低。

SRC 可以在許多應用中一展所長。與電力線監控示例一樣，任何線路頻率變化都可以透過立即動態改變抽取率來補償。如此，保證電力線的採樣頻率始終一致。按照本文所示，在關鍵分散式系統中，SRC 也可用於高效重新同步系統，不會造成資料流程中斷，也不需要採用額外的元件，例如 PLL。AD7770 解決了對基於  $\Sigma - \Delta$  ADC 的分散式系統進行同步的傳統問題，不會丟失樣本，也不會像基於 PLL 的方法一樣，額外增加成本和複雜性。CTA

## 科學園區智慧蛻變 躍升世界品牌

科技部日前展示科學園區首度導入智慧化設施與服務四年之蛻變成果，以交通、水電、節能、環境永續、急救災及發展數據應用六大構面，榮獲國際安全獎 (ISA)、APEC 能源智慧社區 (ESCI) 智慧運輸金獎，及入圍亞太區智慧城市獎 (IDC) 等國際獎項及國內專利肯定，重新塑造科學園區成功模式轉型智慧形象，推升科學園區為世界品牌。

因應園區發展需求，科技部擘劃「運用 ICT 技術發展智慧園區計畫」，以智慧交通、智慧永續、智慧治理為發展主軸，首度導入智慧化服務與設施，協助竹科、中科、南科三大科學園區解決交通壅塞、環境永續、災防與管理等問題，提升維運與服務效能。

未來三大科學園區將持續導入或運用前瞻科技，推動科學園區智慧化與創新轉型發展，協助高科技產業持續成長，且希望能以我國的經驗，協助其他國家促進更多的智慧應用實例。