

探索 RF 取樣資料轉換器在測試與測量應用中的快速跳頻

Chase Wood

Application Engineer
High-Speed Data Converters

簡介

隨著資料轉換器持續進化，滿足軟體定義無線電、無線測試器和頻譜分析器等系統中的多頻帶需求，也成為一大挑戰。由於裝置越來越複雜，並且能在數值控制振盪器 (NCO) 頻率間更快速地轉換，讓系統設計師開始重新評估傳統的跳頻方法。

在本文中，我將探索跳頻技術的演進，並比較傳統方法和進階方法，例如通用輸入/輸出 (GPIO) 和快速重新配置介面 (FRI) 等。若能了解這些進展，可望協助您獲得寶貴洞見，進而為單頻帶與多頻帶應用實現最佳的跳頻。不過，為了充分了解現代系統如何滿足多頻帶需求，首先必須理解跳頻的基礎知識。

何謂跳頻？

在 Wi-Fi® 6 和 7 或正交振幅調變 (QAM) 編碼訊號等現代通訊系統中，頻譜的本質為多頻帶，這意味著射頻 (RF) 域是由各頻帶內的多個通道組成。例如，Wi-Fi 6 和 7 可在同一頻帶內的多個通道間運作，以透過動態方式將頻寬和資料輸送量提升到最高，而 QAM 則是在單一通道內，將資料編碼為不同的相位偏移和振幅位準。**圖 1** 顯示包含 7 個 QAM 通道的頻帶範例。

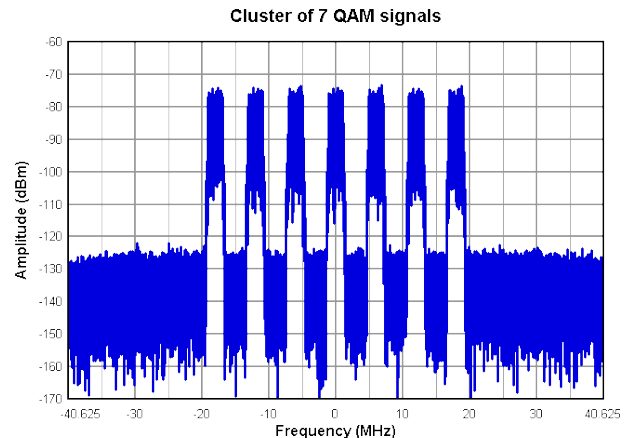


圖 1. 頻域中的多音訊號。

直接 RF 取樣類比轉數位轉換器 (ADC) 和數位轉類比轉換器 (DAC) 整合了許多數位功能。實現直接 RF 取樣的最重要功能之一，就是 ADC 中的數位降轉換器 (DDC)，以及 DAC 中的數位上轉換器 (DUC)。

在 ADC 中，DDC 是由三個主要元件組成：NCO、數位混頻器和降頻器區塊。NCO 可做為傳統接收器訊號鏈中本機振盪器的數位同等裝置，並與輸入訊號混合，以提供基頻（奈奎斯特 1 區）的訊號，以及不必要的影像。降頻器區塊會透過有限脈衝反應 (FIR) 降頻濾波器濾除影像，然後透過降低取樣減少訊號頻寬。降頻器區塊是中頻 (IF) 濾波器的數位等效裝置。

在 DAC 中，DUC 是由內插器、NCO 和數位混頻器組成。內插器與 ADC 不同，會對較低頻寬的輸入訊號進行上取樣，然後將其傳經 FIR 濾波器，以抑制影像。在內插器級後，輸出訊號會饋入數位混頻器以與 NCO 混合，讓 DAC 能以較低的輸入訊號頻寬在較寬的奈奎斯特區中運作。

在 RF 取樣轉換器任何特定輸入上啟用的 DDC 數量，決定了轉換器是以單頻帶或多頻帶輸出運作。本文的重點會放在跳頻的 ADC 層面上。

圖 2 顯示德州儀器 (TI) ADC32RF55 的 DDC 範例，這是一款 RF 取樣 ADC，能夠以 3GSPS 進行雙通道、四頻帶運作。

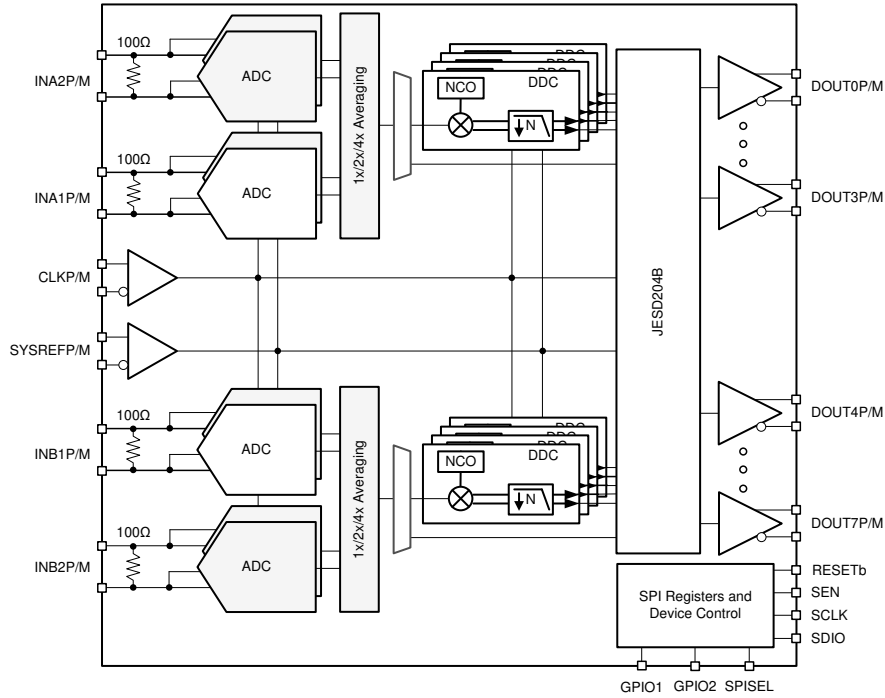


圖 2. ADC32RF55 的功能原理圖 (每個通道四個 DDC)。

通常，相關頻帶會改變：相對於針對每個頻帶切換完全唯一的訊號鏈，同一個 RF 取樣轉換器只需調整 NCO 頻率，就可配合新的頻帶。這是現代 RF 取樣轉換器的主要優點。將 NCO 從某一頻率變更至不同頻率的行為，就是所謂的跳頻。

NCO 不會直接產生類比頻率，而是會以高解析度產生所需頻率的數位呈現。每個 NCO 都會接收一個數位字 (通常為 48 位元或更多)，將該字與 NCO 相位累加器結合後，即可呈現適合數位混頻級的訊號。編程 NCO 時，需編程的是與所需 IF 對應的數位呈現，而不是實際頻率。最常受到支援的 NCO 頻率範圍介於 $-F_s/2$ 與 $F_s/2$ 之間，其中 F_s 代表轉換器的取樣頻率。負頻率字用於奈奎斯特偶數區，正頻率字則用於奈奎斯特奇數區的訊號。

為了判斷更高次 NCO 頻率落在基頻中的位置，您的第一項作業就是在預期頻率和取樣率之間執行模除運算，以移

除 F_s 的任何倍數。預期 NCO 頻率現在介於 0Hz 和轉換器取樣率 F_s 之間。

如果 NCO 頻率低於奈奎斯特頻率 ($F_s/2$)，則預期 NCO 頻率會轉換至奈奎斯特奇數區，如 **方程式 1** 所示：

$$NCO_{\text{word}} = f_{\text{NCO}} \times \frac{2^{48}}{F_s}, \text{ for } 0 \text{ to } F_s/2 \quad (1)$$

如果計算的 NCO 頻率高於奈奎斯特頻率，則頻率會落在奈奎斯特偶數區，如 **方程式 2** 所示：

$$NCO_{\text{word}} = (f_{\text{NCO}} + F_s) \times \frac{2^{48}}{F_s}, \text{ for } -F_s/2 \text{ to } 0 \quad (2)$$

圖 3 顯示基頻訊號 (Fund.) 及其二次、三次和四次諧波 (HD2、HD3 和 HD4) 如何折返至奈奎斯特第一區，雖然實際頻率分量會落在更高次的奈奎斯特區中。

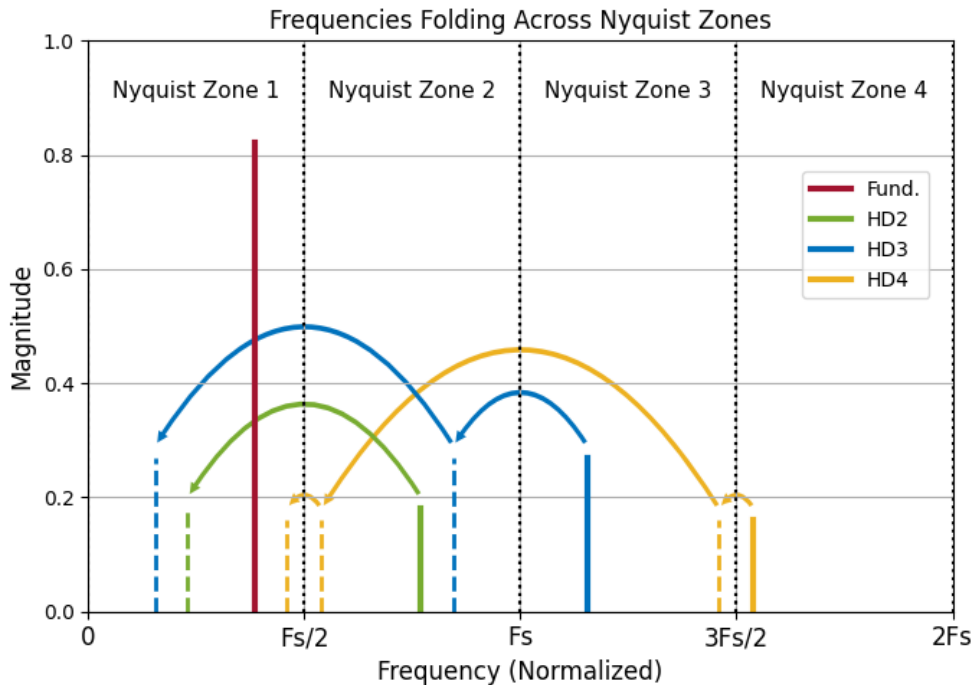


圖 3. 譜波從高次奈奎斯特區折至奈奎斯特 1 區。

與傳統 ADC 相比，RF 取樣 ADC 的其中一個優點是不需要變更硬體即可切換頻帶。這種固有的彈性可讓 RF 取樣 ADC 無需額外硬體元件，即可快速因應新頻帶，進而簡化系統設計並降低成本。然而，前述程序無法瞬時完成。在 RF 取樣 ADC 的早期設計中，對每個 NCO 和後續 DDC 都只提供單一的 NCO 字選項。因此，跳至另一個頻率需要進行多次暫存器寫入操作。

新的 NCO 字必須透過序列週邊介面 (SPI) 寫入，接著再進行另一個暫存器寫入，以將新的 NCO 字推送至 DDC 區塊，並在該處實際生效。有數項因素會影響跳頻所需的時間，包括 NCO 字的長度和 SPI 事務速度。通常，ADC 的暫存器大小限制為 8 位元，因此總共需要進行七次暫存器寫入來更新 48 位元 NCO：以六次暫存器寫入更新 NCO 字本身，並以另一次暫存器寫入更新 DDC。

考量每項 SPI 事務的負擔（通常每次暫存器寫入為 16 位元位址）後，事務時間會增加三倍。假定為 20MHz 序列時鐘訊號 (SCLK) 率，**方程式 3** 可計算跳頻時間，並假設 SPI 資料的串流不間斷：

$$t_{hop} = \frac{1}{20 \times 10^6 \text{ (Hz)}} \times 7 \text{ (transactions)} \times \frac{24 \text{ (bits)}}{\text{(transaction)}} \quad (3)$$

$$= 8.4\mu\text{s}$$

跳頻技術的演進

RF 轉換器現在的設計為每個 DDC 具有多個 NCO 字，且可對 NCO 字預先編程。這種創新方法會將數個頻率值預先載入至轉換器記憶體中，進而實現更快速的跳頻。「快速跳頻」中的「快速」一詞，就是來自這種儲存預先計算之 NCO 字的觀念。

圖 4 顯示 **ADC32RF55** 依 NCO 索引和字索引的 48 位元 NCO 暫存器地址。儘管通道 A 和 B 的位址相同，但是頻率率是唯一的，因為此裝置實作了暫存器映射分頁，這會對未包含在啟用頁面中的暫存器進行遮罩，以免受到任何讀取和寫入操作。

Channel A		Channel B	
NCO1 1: 0x100..0x105 2: 0x108..0x10D 3: 0x110..0x115 4: 0x118..0x11D	NCO3 1: 0x140..0x145 2: 0x148..0x14D 3: 0x150..0x155 4: 0x158..0x15D	NCO1 1: 0x100..0x105 2: 0x108..0x10D 3: 0x110..0x115 4: 0x118..0x11D	NCO3 1: 0x140..0x145 2: 0x148..0x14D 3: 0x150..0x155 4: 0x158..0x15D
NCO2 1: 0x120..0x125 2: 0x128..0x12D 3: 0x130..0x135 4: 0x138..0x13D	NCO4 1: 0x160..0x165 2: 0x168..0x16D 3: 0x170..0x175 4: 0x178..0x17D	NCO2 1: 0x120..0x125 2: 0x128..0x12D 3: 0x130..0x135 4: 0x138..0x13D	NCO4 1: 0x160..0x165 2: 0x168..0x16D 3: 0x170..0x175 4: 0x178..0x17D

圖 4. ADC32RF55 依通道和 NCO 索引的 NCO 字位址。

現在已經對字進行編程，那麼要如何實際選擇特定的字呢？若要變更 NCO 字，只需要為 DDC 選擇新的 NCO 字即可，而此作業可透過 SPI 或 GPIO 針腳執行。表 1 顯示的範例說明了如何根據啟用頻帶的數量，為 ADC32RF55 中的指定 DDC 選擇個別的字。在標準配置中，此 ADC 的每個 DDC 都有四個唯一的 NCO 字；但是在單頻帶模式中，鄰近 DDC 的四個 NCO 字也可供應至啟用的 NCO，這代每個通道的 DDC 都可存取八個預先編程的 NCO 字。

頻帶數量	ADDR	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
單	0x3B	0	0	0	0	NCO2 CHA[1:0]	0	NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	0	0	0	0	NCO2 CHB[1:0]	0	NCO1 CHB[1:0]	
雙	0x3B	0	0	0	0	NCO2 CHA[1:0]		NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	0	0	0	0	NCO2 CHB[1:0]		NCO1 CHB[1:0]	
四	0x3B	NCO4 CHA[1:0]		NCO3 CHA[1:0]		NCO2 CHA[1:0]		NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	NCO4 CHB[1:0]		NCO3 CHB[1:0]		NCO2 CHB[1:0]		NCO1 CHB[1:0]	

表 1. 在 ADC32RF55 上依 NCO 索引選擇 NCO 字。

執行跳頻所需的時間會因轉換器而異。通常，SPI 方法的所需時間為單一 SPI 事務的持續時間，而不是如方程式 3 中的七個事務。SPI 的最大時脈速率，以及與序列資料傳輸相關的負擔，會進一步限制 SPI 方法的速度。假定為相同的 20MHz SCLK，方程式 4 顯示了裝置起始 NCO 字變更前的所需時間：

$$t_{hop} = \frac{1}{20 \times 10^6 \text{ (Hz)}} \times 1 \text{ (transaction)} \times \frac{24 \text{ (bits)}}{\text{(transaction)}} \quad (4)$$

$$= 1.2\mu\text{s}$$

相較之下，GPIO 方法的速度則可跟更新 GPIO 輸入的速度一樣快。一旦電壓超過其高位準或低位準閾值，就會開始變更 NCO 字。

無論是哪一種方法，裝置在接收到 NCO 字變更後，內部 NCO 字都會立即更新；不過，降頻濾波器必須刷新所有舊值，因此會因降取係數而導致延遲增加。

表 2 顯示 ADC32RF55 利用與新 NCO 頻率混合的資料來刷新其降頻濾波器的所需時間。

降頻設定	NCO 切換時間
/4	~250ns
/8	~350ns
/16	~600ns
/32	~1μs
/64	~2μs
/128	~4μs

表 2. ADC32RF55 的降頻濾波器刷新時間。

一般來說，GPIO 方法是比 SPI 方法更快的跳頻方法，這是因為相對於序列介面，GPIO 介面的本質具有並行層面。但是需要考量一項因素：在 GPIO 字選擇模式下，會將相同的字索引套用到所有啟用的 DDC。因此裝置無法在 DDC2 上使用字 3 時，於 DDC1 上使用字 1；GPIO 介面會將所有 DDC 設定為相同的字索引。

另一種方法 FRI 則會以比標準 SPI 支援快上許多的速度，透過特定裝置針腳傳送資料。如 TI DAC39RF12 等部分裝置可支援最高 200MHz 的 FRI 通訊，而您可用其來選擇啟用的 NCO 字。

測試與測量中的應用

有鑑於不同應用中的需求多樣且不斷演進，因此對測試與測量設備而言，支援多個頻帶至關重要。寬頻測試設備能夠在多個頻率範圍間運作，因此是可在不同系統與技術間進行全方位測試的多功能工具。隨著技術的進步和新頻帶的推出，對可快速調整並在多個頻帶間切換的設備需求，也愈顯重要。

在頻譜分析器中，快速跳頻技術可減少掃頻時間，並提升偵測暫態訊號的能力，進而實現快速且準確的測量作業。先進 ADC 透過多個 NCO 或 FRI 等快速重新配置方法所獲得的快速切換能力，可在廣泛的頻率範圍間實現更有效率的分析，並強化頻譜分析器在研究與現場應用中的整體性能與效用。

對無線測試器而言，快速跳頻技術在通訊系統的特性分析與故障排除中扮演重要角色。透過實現在頻率間快速轉換，這些技術可提升訊號保真度並減少測試週期。此功能在評估多種頻率條件下的無線裝置性能時，特別重要。

除了頻譜分析器與無線測試器外，快速跳頻技術也可為其他許多測試與測量應用提供顯著優勢。例如，通用訊號分析器和 RF 訊號產生器即可運用這些技術，在多個頻帶間

提供更靈活且準確的測試。此外，可在頻帶間快速切換的能力也為多頻帶接收器帶來助益，確保在多變測試環境中具有可靠的性能。

結論

快速跳頻技術可實現在頻率間快速且精確的轉換，因此能提升彈性、提高準確度，並且更妥善地適應不斷演進的技術需求。隨著對測試與測量設備的需求持續增長，為了維持頂尖性能並確保具備全方位的測試能力，了解並實作快速跳頻方法非常重要。

相關網站

1. Chase Wood。2024 年。「[ADC 降頻：因應高資料輸送量的挑戰](#)」。Embedded Computing Design，2024 年 2 月 5 日。
2. Chase Wood。2024 年。「[ADC 降頻：以降轉換器釋放 RF 潛力](#)」。Embedded Computing Design，2024 年 2 月 29 日。
3. Chase Wood。2024 年。「[ADC 降頻：分析高頻寬頻譜叢集](#)」。Embedded Computing Design，2024 年 5 月 9 日。
4. [TI ADC32RF55 產品規格表](#)
5. [TI DAC39RF12 產品規格表](#)

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated