

電壓參考雜訊對 ADC ENOB 及無雜訊解析度的影響

Jackson Wightman
Applications Engineer
Voltage References

Shridhar More
Systems Manager
Voltage References

簡介

從恆溫器到飛行控制，多種系統都採用類比轉數位轉換器 (ADC) 來擷取將在數位領域中處理的真實類比訊號，並根據數位結果採取必要行動。每個 ADC 都指定了一個位元數，來表示其可以產生的各種數位等級。針對給定的恆定 ADC 輸入，由於一般訊號鏈會出現多項錯誤，ADC 的輸出並非恆定數位值。因此請務必考慮訊號鏈的有效位元數 (ENOB) 或無雜訊解析度，以便進一步比較，同時從擷取資料中盡可能取得資訊。更高精密度需要更高的 ENOB 及無雜訊解析度。

一般而言，系統的訊號雜訊比 (SNR)、總諧波失真 (THD) 和雜訊在 ENOB 計算中扮演重要角色。對現場傳送器或測試與測量應用等多種系統而言，DC 輸入訊號準確度與精準度極為重要。正因如此，雜訊規格成了最關鍵的因素。ADC 使用的電壓參考是訊號鏈中的重要元件，會影響精準度與準確度。

電壓參考對 ADC 雜訊的影響

雖然透過過濾可以消除一些雜訊，但實際上您無法過濾掉低頻率下的雜訊。在電壓參考中，因所需要的電阻器電容器濾波器元件尺寸的緣故，在不會對訊號鏈性能造成重大影響的情況下，也無法過濾出閃爍雜訊 (從 0.1Hz 至 10Hz 的雜訊)。正是因此，雜訊幾乎總是存在於系統中。

除了電壓參考雜訊外，ADC 本身及 ADC 驅動器也會有雜訊。這些元件每一個都會對產生數位訊號的電路產生雜訊。圖 1 是此電路的簡易原理圖。

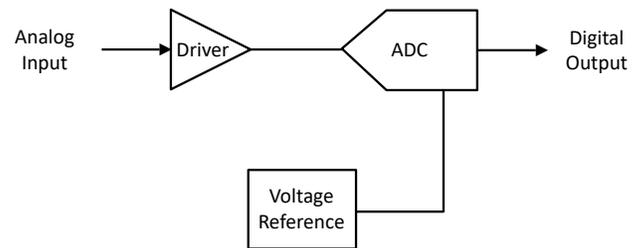


圖 1. 具有外部電壓參考的通用 ADC 電路配置。

方程式 1 表示此電路的總雜訊如下：

$$\text{Total Noise} = \sqrt{\text{Noise}_{\text{Driver}}^2 + \text{Noise}_{\text{ADC}}^2 + \text{Noise}_{\text{REF}}^2} \quad (1)$$

在決定系統的 ENOB 時，必須知道您電路中的雜訊量。一般而言，低雜訊設計須選擇低雜訊裝置。

本文將著重於電壓參考選擇，以及其他有助於提升 ADC 性能的資料處理選項。

電壓參考對 THD 的影響

電壓參考針腳的重複取樣會造成電流瞬態出現，且可能只分離幾奈秒。然而，對 ADC 而言，外部參考必須在取樣相位結束時安定或充電，以避免產生較大的增益誤差。降低取樣速度可以解決此問題，但並非根本之道。通常 ADC 越精確，其參考輸入所需的電流消耗就越多。如果電壓參考沒有足夠的高頻寬，或輸出阻抗過高，將無法為 ADC 的參考輸入充電。這會造成電壓下降，而產生增益誤差和 ENOB 下修。

因此，有時必須在電壓參考之外建立高頻寬、低輸出阻抗緩衝器，才能增加 ADC 的 THD，並符合失真與 ENOB 的產品規格書規範。部分 ADC 配備內部電壓參考緩衝器，但

並非全部都是如此。圖 2 顯示應在何處加上外部緩衝器來提高電路 THD。

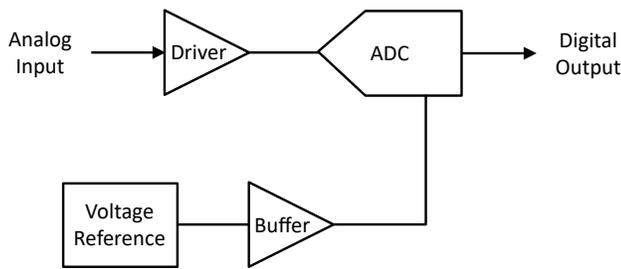


圖 2. 具有外部電壓參考及參考緩衝器的通用 ADC 電路配置。

電壓參考雜訊與 THD 如何影響 ENOB

ENOB 測量電路的 AC 特性如何影響 ADC 解析度。電路的雜訊與 THD 以「訊號雜訊比和失真」，即 SINAD 一詞來表示。SINAD 用單一數字來呈現這兩個 AC 特性，如 方程式 2 所示：

$$\text{SINAD (dB)} = -20\log\sqrt{10^{-\text{SNR}/10} + 10^{\text{THD}/10}} \quad (2)$$

您可以從 方程式 2 看出，隨著 SNR 增加，SINAD 也會增加。因此存在的雜訊和失真越少，SINAD 就越好。有了 SINAD，您可利用 方程式 3 來輕鬆尋找 ADC 的 ENOB，尤其是因為：

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD} - 1.76\text{dB}}{6.02} \quad (3)$$

再次檢視 方程式 1，降低電壓參考中的總雜訊會降低電路中的總雜訊，進而提高 SNR。SNR 增加，ENOB 也隨之增加。此外，在電壓參考輸出上加上高頻寬緩衝器也會減少 ADC 的 THD，而使 ENOB 增加。

電壓參考雜訊如何影響無雜訊解析度

雖然 ENOB 大致上能代表 ADC 輸出的解析度，但它並不考慮 DC 性能。為了解來自 DC 輸入的雜訊對 ADC 解析度的影響，建議您找出電路的無雜訊解析度。使用 方程式 4 時，您可以觀察 ADC 數位輸出最低有效位元 (LSB) 數量中的程式碼散播，來計算無雜訊解析度，同時測量 DC 訊號：

$$\text{Noise Free Resolution} = N - \log_2(\text{Code Spread}) \quad (4)$$

為強調參考雜訊對系統精密性能的影響，我和同事使用 REF70 (具有 0.23ppm_{p-p} 閃爍雜訊) 和 REF50 (具有

3ppm_{p-p} 閃爍雜訊)，針對指定訊號鍵進行 DC 程式碼散播測試。REF50 和 REF70 都是搭配高精度 ADC 使用的高精度電壓參考，並具有不同的 DC 特性。不過，此演練的目標只是比較這些裝置在訊號鍵電路中的雜訊性能。

設計使用電壓位準接近 ADS8900B 20 位元 SAR ADC 全刻度範圍的穩定 DC 來源電池，以 20kSPS 進行資料擷取。以增益 = 1 使用 OPA2320 來驅動 ADS8900B 輸入。此 ADC 整合了參考緩衝器驅動器，因此不需要選用的參考緩衝器。在電壓參考的輸出上放置簡易電阻器電容器低通濾波器，可進一步降低電壓參考的雜訊。圖 3 顯示這些測試使用的設定。

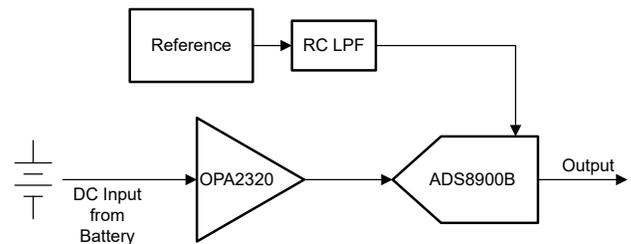


圖 3. 下列無雜訊解析度測試使用的電路。

電壓參考旁的訊號鍵元件也有閃爍雜訊，將成為最終程式碼散播的一部分。因為訊號鍵只在不同參考情況下會維持不變，所以對性能數值的影響一定僅來自電壓參考雜訊。

高精度系統運用資料處理技術來改善精確度並提升整體解析度。在此實驗中，我們透過把輸出乘以 16，將來自 ADS8900B 的 20 位元原始資料轉換為 24 位元長度。不同的有限脈衝反應 (FIR) 濾波器處理了轉換的 24 位元資料。在輸入值有變化的情況下，FIR 濾波器易於實作，並且穩定速度更快。輸出資料速率維持在 20kSPS，但延遲則由濾波器特性定義。

在 24 位元位準下，REF50 和 REF70 的雜訊 (以及精準度) 幾乎類似，整體雜訊受訊號鍵及其高頻寬雜訊影響。平均程式碼值的差異是因為參考電壓差，一種可透過校正消除的準確度規格。這些結果可在圖 4 和圖 5 中看到。

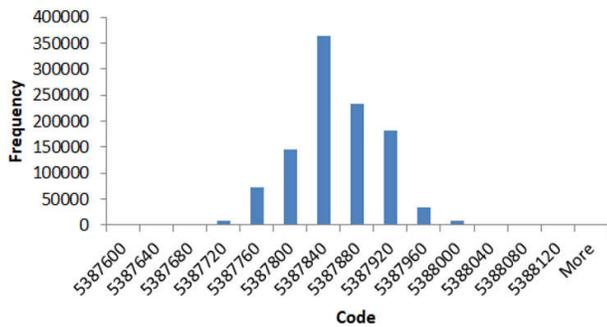


圖 4. REF50 雜訊 = 3ppm_{p-p} 的結果。

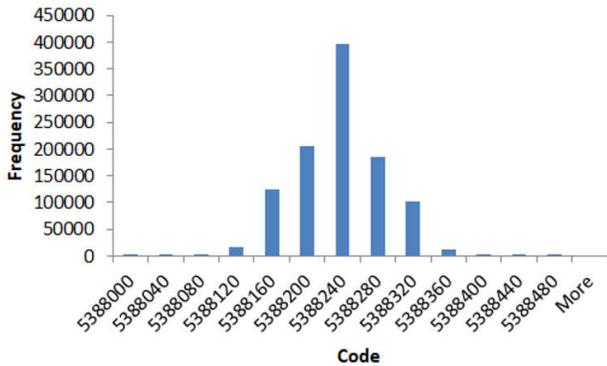


圖 5. REF70 雜訊 = 0.23ppm_{p-p} 的結果。

我們使用 Octave 工具以三種不同的數位濾波器對原始資料進行後處理：

- 1,024 分接頭移動平均濾波器。
- 801 分接頭 17Hz 低通濾波器。
- 455 分接頭 36Hz 低通濾波器。

圖 6 顯示這些濾波器的濾波器反應。

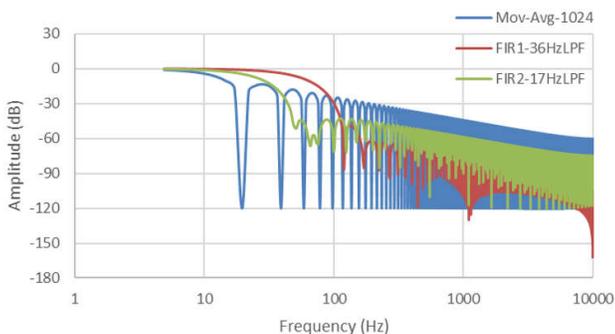


圖 6. 數位濾波器反應。

您可以使用 [方程式 4](#) 輕鬆比較 REF50 和 REF70 與各項濾波器數據對 ADC 解析度的影響。這些測試的結果總結於 [表 1](#)。

圖 7、圖 8 和 圖 9 說明數位濾波器對程式碼散播的影響。

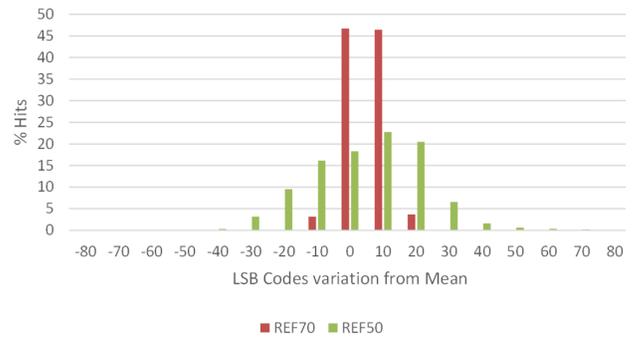


圖 7. 1,024 分接頭濾波器直方圖。

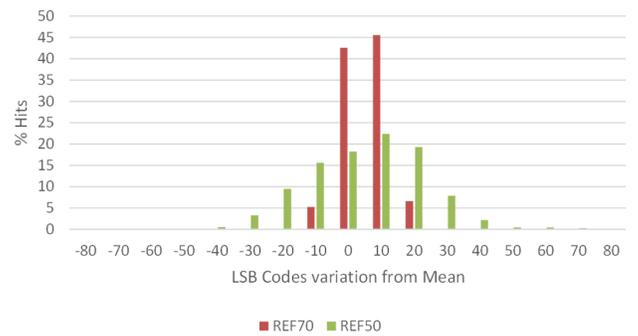


圖 8. 455 分接頭濾波器直方圖。

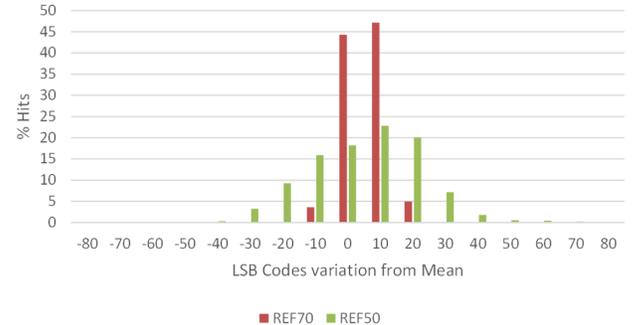


圖 9. 801 分接頭濾波器直方圖。

數位濾波器類型	角頻率 (Hz)	分接頭數	DC 程式碼散播 (LSB)	無雜訊解析度 (位元)	DC 程式碼散播最低有效位元	無雜訊解析度 (位元)
			24 位元的 REF70		24 位元的 REF50	
無濾波器	不適用	0	448	15.1	496	15.0
1,024 分接頭移動平均	8	1,024	35	18.8	118	17.1
第 1 FIR	17	801	38	18.7	121	17.0
第 2 FIR	36	455	49	18.3	135	16.9

表 1. 使用不同濾波器數據和參考裝置的 DC 程式碼散播比較。

這項比較顯示，在最高精度應用中，REF70 計算無雜訊解析度的性能比 REF50 更佳，這主要是因為裝置在閃爍雜訊位準上有差異。根據使用 REF70 時減少程式碼散播的情況，可知其超低雜訊在高精度應用中能提供近 2 位元解析度的優勢。此外可以發現，使用低雜訊參考既能用快速 455 分接頭濾波器，同時仍維持高無雜訊解析度。低電壓參考閃爍雜訊會降低程式碼散播，進而達到更高的無雜訊解析度。如同 ENOB，雜訊是為低無雜訊解析度設計訊號鏈時的重要考量事項。

結論

ADC 運用於上千種應用和技術，因此總是需要更加準確和精準。不論您設計的是高度先進的 X 光系統、極為精密的電池測試電路，或是其他任何世界一流的創新技術，都必須謹慎地選擇電壓參考與實作，才能提升 ADC 訊號鏈的精準度與準確度。您將增加 ADC 的 ENOB 及無雜訊解析度，實現更先進且多樣化的訊號鏈實作。

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