

## Part II :

## 基準電壓雜訊為何非常重要？

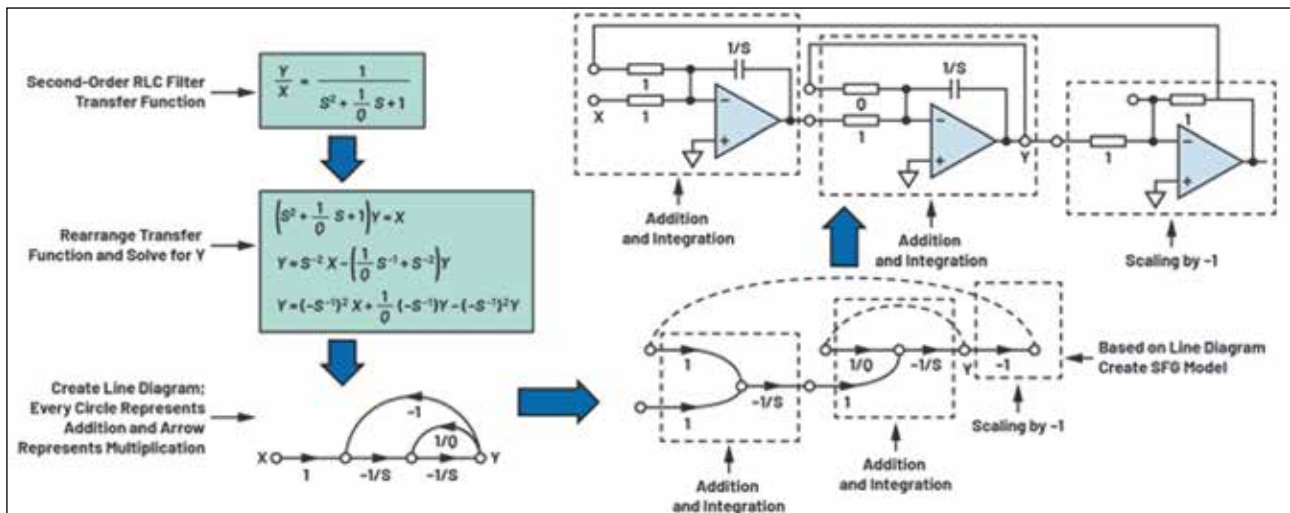
■作者：Anshul Shah / ADI 應用工程師

## 主動低通濾波器設計技巧

訊號流程圖是透過圖形表示源自一系列線性公式的系統。<sup>2</sup> SFG 用於連接轉換函數和對應的系統電路拓撲。<sup>2</sup> 該理論可用於基於主動電路設計類比濾波器。SFG 濾波器設計方法的主要優點在於：衰減係數  $Q$  和截止頻率都可以單獨控制。SFG LPF 可以幫助衰減雜訊和提高訊號雜訊，但會導致物料成本 (BOM)、PCB 區域和功率增加。此外，SFG LPF 可以影響基準輸出電壓與溫度，導致產生微小 PPM 誤差，造成直流精度下降。圖 9 所示為二階低通濾波器示例，該濾波器採用 SFG 方法，從轉換函數轉換至電路塊。擴展電阻 ( $R$ ) 和電容 ( $C$ ) 針對截止頻率實施配置 (請參見公式 5)。

有關訊號流程圖理論的更多資訊，請參考 Addison-Wesley 出版的 *Feedback Control of Dynamic Systems* (《動態系統回饋控制》)。<sup>2</sup>

圖 9: 基於 SFG 方法實施主動 RC 低通濾波器。



$$R = R_s \times R_n \quad C = \frac{C_n}{W_s \times R} \quad (5)$$

其中

 $R_s$  表示比例因數 $C_n$  表示比例因數 $W_s$  表示截止頻率 (Rad/s)

以下是一個計算示例，用於說明如何設計二階 0.5 Hz 截止頻率 SFG 低通 Butterworth 濾波器：

- 為了保持簡明，選擇  $R_s = 1 \Omega$ ， $C_n = 1 F$ 。
- 選擇  $F_s = 0.5 \text{ Hz}$ ，以最大化寬頻雜訊抑制效果。  
 $W_s = 2 \times \pi \times 0.5 = 3.141 \text{ rad.}$
- 設定衰減因數  $Q = 0.71$ 。選擇此值可實現平坦的帶通和陡峭的衰減，以反映 Butterworth 拓撲。
- $R$ 、 $C$  和  $R_q$  值基於反覆運算流程選擇，以實現較低熱雜訊和可用於表面貼裝的元件值。

$$R = 7.32 \text{ k}\Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 0.5 \text{ Hz} \times 7.32 \text{ k}\Omega} = 44 \mu\text{F} \quad (6)$$

$$R_q = R \times Q = 7.32 \text{ k}\Omega \times 0.71 = 5.2 \text{ k}\Omega$$

## LTC6655LN 簡介

考慮到與 RC LPF 和 SFG LPF 有關的取舍，更好的解決方案是如圖 10 所示，將低通濾波器安裝在基準電壓的整合式低雜訊緩衝器之前。這種佈局不但會減小 PCB 面積，還不影響基準電壓緩衝器的回應。使用快速穩定，具有高輸入阻抗，能夠灌電流和拉電流的基準電壓緩衝器，有助於解決負載調整不良的問題，保持直流精度，以及改善瞬變性能。LTC6655LN 採用了這種架構。它配有降噪接腳，可以幫助降低寬頻雜訊，支援使用整合式輸出級緩衝器。LTC6655LN 內建 R3 電阻（參考圖 10），允許用戶在降噪 (NR) 接腳位置連接外部電容，以創建低通濾波器。採用 LTC6655LN 架構時，使用者可以根據系統要求配置低通截止頻率。

表 2:3 dB 截止頻率，適合連接至 NR 接腳的電容實現不同值

CNR	2.500	4.096	5.000	V
0.1 $\mu$ F	5305	4233	3969	Hz
1 $\mu$ F	531	423	397	Hz
10 $\mu$ F	53	42.3	39.7	Hz
100 $\mu$ F	5.3	4.2	4.0	Hz

LTC6655LN RC LPF 連接至緩衝器的非反向節點，該節點是此元件最靈敏的接腳。必須做好預防措施，應選擇極低漏電流類型的外部電容，以防洩漏電流從 R3 電阻漏出，導致直流精度下降。此外，R 和 C 之間的變化相互無關，所以 RC 時間常數和 LPF 截止頻率會因為流程、電壓和溫度 (PVT) 差異而產生變化。

表 3:3 種電壓選項的 R3 的電阻值

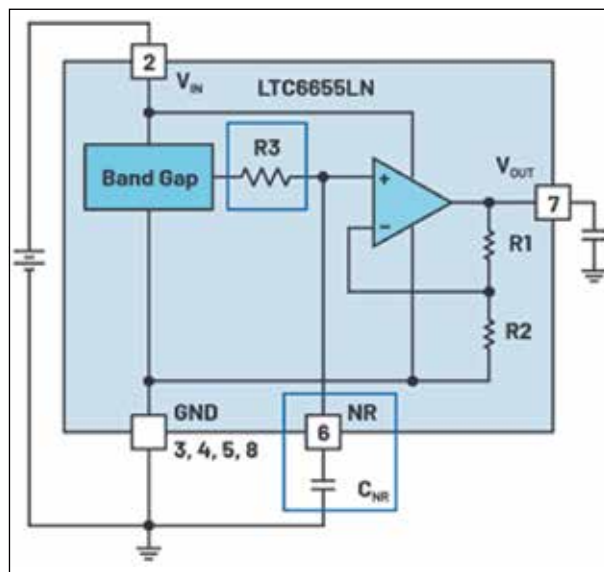
電壓選項	2.500 V	4.096 V	5.000 V
R3 $\pm$ 15%	300 $\Omega$	376 $\Omega$	401 $\Omega$

基準電壓（例如內建 LPF 的 LTC6655LN）提供最佳解決方案，用於簡化雜訊濾波器設計，消除對外部緩衝器的需求，以驅動 ADC 基準電壓電路。

## 測試電路描述

AD7177-2 精密 ADC 被用於確定 LTC6655/

圖 10:LTC6655LN 方框圖。



LTC6655LN 加 10 $\mu$ F NR 電容以及 LTC6655 後接 SFG 濾波器的標準性能。AD7177-2 是高解析度 32 位低雜訊快速穩定 2 通道 /4 通道  $\Sigma$ - $\Delta$  類比數位轉換器，用於實現低頻寬輸入。AD7177-2 整合可編程數位帶通濾波器，允許用戶控制 5 SPS 至 10 kSPS 的輸出資料速率 (ODR)。

設計 SFG LPF (圖 11) 時用到的零組件包括 2 個 ADA4522-1 運算放大器、1 個 AD797 運算放大器、多個 25 ppm 表面黏著式電阻、多層表面黏著式陶瓷電容，以及 1 個 10  $\mu$ F WIMA 薄膜電容。ADA4522 是一款軌對軌輸出運算放大器，寬頻雜訊密度為 5.8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，閃爍雜訊為 177 nV p-p。AD797 是一款低雜訊運算放大器，具備 0.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  寬頻雜訊、50 nV p-p 閃爍雜訊、20 V/ $\mu$ s 傑出壓擺率，以及 100 MHz 增益頻寬，因此適合驅動 ADC。

在使用 LTC6655 和具有 AD7177-2 的 LTC6655LN 時，為了正確評估性能，需要使用整體雜訊低於 ADC 基準電壓和 ADC 雜訊的直流源。因此，會使用理想源，也就是 9V 電池電源，具體如圖 12 所示。

## 電路性能

圖 13 顯示雜訊譜密度，圖 14 顯示輸出資料

圖 11: SFG LPF。

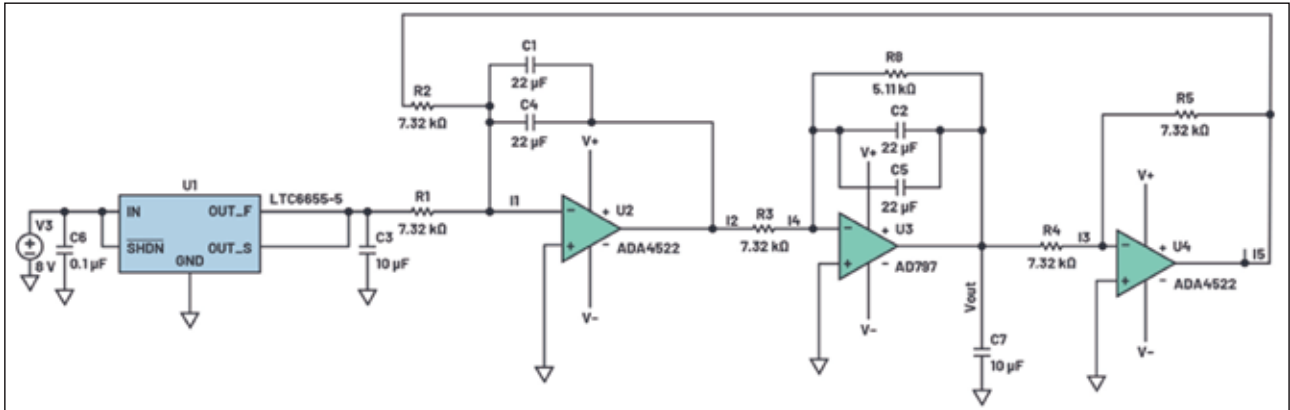
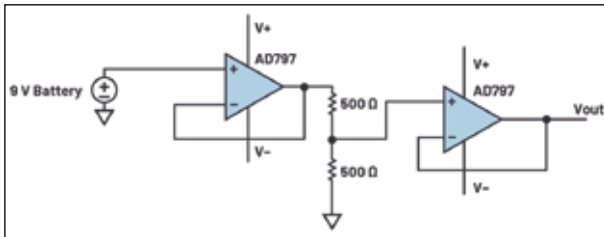


圖 12: 低雜訊直流源。



速率 (ODR) 和 ENOB，描述 AD7177-2 的性能，它的 VREF 輸入連接至 LTC6655 或者採用 10µF NR 電容的 LTC6655LN 或者使用 SFG 方法濾波的 LTC6655。關於在 1 kHz 時雜訊譜密度的比較結果，請參見表 4。圖 13 和圖 14 都有兩個重要區域。

### 區域 A：

雜訊譜密度圖 (圖 13) 顯示，ODR 為 500 SPS 及以上時，濾波 LTC6655 (SFG) 和 ADC 直流輸入源雜訊遠低於 ADC 的雜訊，因此，ADC 可以大幅的去實現其最大性能，具體如圖 14 中的區域 A 所示。從 ODR、ENOB 和雜訊譜密度圖中可以看出，在區域 A 中，總整合雜訊 (rms) 的增高會妨礙訊號鏈達到 25 位元測量解析度。

### 區域 B：

在這個區域中，雜訊譜密度圖 (圖 13) 顯示，三個基準電壓選項和直流源的閃爍雜訊升高，整體的系統雜訊則受直流源雜訊主導。區域 B 中的閃爍雜訊升高，會導致測量性能和 ADC 可以實現的最大性能之間的 ENOB 偏差增大 (圖 14)。

根據 ODR 和 ENOB 圖，濾波 LTC6655 (SFG)

圖 13: 雜訊譜密度。

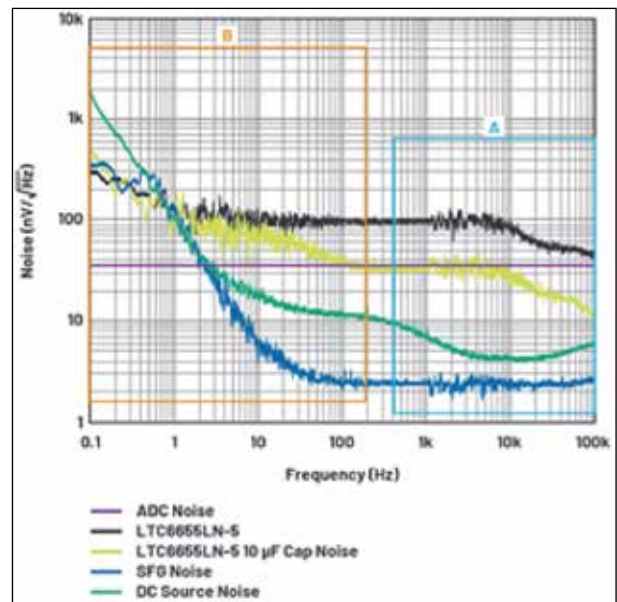
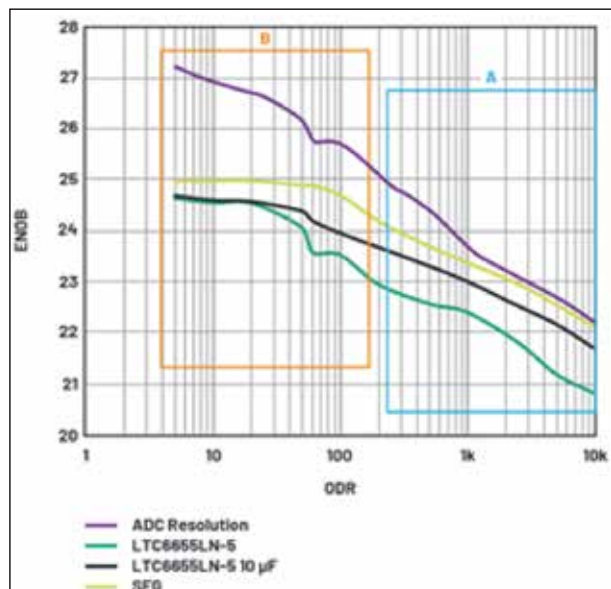


表 4: 1 kHz 時的雜訊譜密度比較結果

	LTC6655	具有 10 µF NR 電容的 LTC6655LN	經過 SFG 濾波的 LTC6655	ADC 輸入直流源
1kHz 時的雜訊譜密度 (nV/√Hz)	96	32	2.4	6.7

圖 14:ODR 與 ENOB。



的 ODR 在小於等於 20 SPS 時可以實現 25 位元解析度，具有 10  $\mu$ F NR 電容的 LTC6655LN-5 和 LTC6655 實現的解析度最高不超過 24.6 位元。

下方的表 5 彙總介紹 AD7177-2 ADC 的性能，其中 VREF 輸入連接至 LTC6655 或者具有 10  $\mu$ F NR 電容的 LTC6655LN，或者連接至濾波 LTC6655 (SFG)。在 ADC 輸入連接直流源，VREF 輸入連接至 LTC6655 時，零縮放欄確定 AD7177-2 可以實現的最佳動態範圍。在 ADC 輸入設定為近乎

滿量程時，具有 10  $\mu$ F NR 電容的 LTC6655LN-5 的動態範圍平均增大 4 dB(與 LTC6655 相比，ODR 範圍為 10000SPS 到 59.96SPS)。另一方面，濾波 LTC6655 (SFG) 的動態範圍平均增大 7 dB(與 LTC6655 相比，ODR 範圍為 10000SPS 到 59.96 SPS)。在 59.96 SPS 以下，動態範圍區域的變化不大，由 ADC 輸入直流源產生、占主導作用的低頻率閃爍雜訊是導致差異的主要原因。

與 LTC6655/LTC6655LN 相比，將 10  $\mu$ F 電容連接至 LTC6655LN 的 NR 接腳時，在 1 kHz 時可以將寬頻雜訊降低 62%，濾波 LTC6655 (SFG) 可以將寬頻雜訊降低 97%。

## 結論

精密系統如果想要實現 25 位元或以上的解析度，必須非常重視基準電壓雜訊。如圖 2 所示，VREF 雜訊占系統雜訊的比例與 ADC 滿量程的使用率成正比。本文顯示，在精密基準電壓中增加濾波器可以衰減 VREF 雜訊，從而降低整體的系統雜訊。後接 SFG 濾波器的 LTC6655 基準電壓可以將未配備濾波器的 LTC6655 的寬頻雜訊降低 97%。但這會額外增加物料成本，增大 PCB 面積和功耗，降低幾 PPM 的直流精度，且導致精密基準電壓源輸出隨

表 5: 動態範圍比較

ODR	ADC 動態範圍零縮放 (dB)	LTC6655 動態範圍	LTC6655LN 10 $\mu$ F 動態範圍 (dB)	LTC6655 (SFG) 動態範圍 (dB)	動態範圍區域 (LTC6655LN10 $\mu$ F —LTC6655) (dB)	動態範圍區域 (LTC6655 (SFG) —LTC6655) (dB)
10000	135.40	126.88	132.22	134.65	5.33	7.77
5000	138.41	129.14	135.08	137.37	5.94	8.23
2500	140.82	132.91	137.23	139.86	4.32	6.95
1000	144.43	136.50	140.11	142.42	3.61	5.92
500	148.65	137.55	141.95	144.37	4.40	6.83
200	152.86	139.83	144.15	147.40	4.32	7.57
100	156.47	143.32	145.82	150.49	2.49	7.17
59.96	157.08	143.66	147.31	151.71	3.65	8.05
49.96	159.48	146.58	148.43	151.72	1.85	5.14
20	162.49	149.51	149.56	152.26	0.06	2.76
10	163.70	149.58	149.72	152.26	0.14	2.68
5	165.50	150.07	150.25	152.26	0.18	2.19



溫度發生變化。在考慮與 SFG LPF 有關的取舍時，LTC6655LN 採用簡單設計，功耗低，只需要使用單一電容來降低寬頻雜訊，且無需使用外部緩衝器來驅動 ADC。具有 10  $\mu$ F NR 電容的 LTC6655LN 與不具有濾波器的 LTC6655 相比，其寬頻雜訊降低 62%。因此，用戶現在可以使用內建的 LTC6655LN 低通濾波器來讓精密系統實現所需的解析度。

## 附錄

下載 LTspice®，請瀏覽：[analog.com/ltspice](http://analog.com/ltspice)。

點擊此處下載對圖 7 所示電路、圖 11 所示的 SFG LPF 電路，以及圖 12 所示的低雜訊直流電路的 LTspice 模擬。

## 參考電路

1Mark Reisiger。“Reduce Amplifier Noise Peaking to Improve SNR.”ElectronicDesign, 2012 年 10 月。

2Gene F. Franklin、J. David Powell、Abbas Emami-Naeini。Feedback Control of Dynamics Systems。Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1993 年 11 月。

## 致謝

非常感謝作者 Robert Kiely 之前在  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC、精密放大器和基準電壓領域所付出的努力。CTA

## ADI 榮獲通用汽車「傑出貢獻獎」

Analog Devices, Inc. 宣布榮獲通用汽車 (General Motors) 第 29 屆年度供應商獎項之「傑出貢獻獎」(Overdrive Award)。2020 年度「傑出貢獻獎」僅 26 家公司獲得，ADI 則是其中之一。

通用汽車的「傑出貢獻獎」於 2012 年首次頒發，旨在表彰通用汽車全球採購和供應鏈組織之關鍵領域中表現卓越的供應商，相關關鍵領域包括永續價值流、企業總成本及獲利能力、安全性、卓越產品發表、加速創新和發展合作關係。

ADI 總裁暨執行長 Vincent Roche 表示：「ADI 長期與通用汽車保持著高效的業務合作關係。對於 ADI 的無線電池管理系統榮獲「傑出貢獻獎」我們深感榮幸。ADI 此項技術為通用汽車的 Ultium 平台提供極高彈性，協助通用汽車之電動汽車平台擴展至多種車型，實現量產。ADI 團隊十分期待未來與通用汽車的持續合作。」

此次年度供應商獎項評選中，通用汽車並向 122 家公司授予「年度供應商」獎項，以表彰供應商不斷超越通用汽車之期望，並為客戶提供創新技術及汽車產業中優質產品，該獎項是對供應商在 2020 年度傑出表現的認可。

通用汽車全球採購及供應鏈副總裁 Shilpan Amin 表示：「通用汽車致力於實現零事故、零排放及零擁塞的未來，我們非常高興與全球各地富有創新及敬業精神的供應商合作，共同推動此一目標。」

「2020 年度供應商」及「傑出貢獻獎」之獲獎者由通用汽車全球採購、工程、品質、製造和物流團隊主管共同評選出，所依據的標準包括：產品採購、全球採購和製造服務、顧客服務和售後服務及物流等。