

# Technical White Paper

## 測量超低雜訊 LDO 的輸出雜訊



Haidar Hamoo

### 摘要

本技術白皮書提供了測量低壓降穩壓器 (LDO) 雜訊的大綱。本文件也提供測量超低雜訊 LDO 雜訊的解決方案。目前的 LDO 可具有遠低於市面上大多數頻譜分析器靈敏度的輸出雜訊位準。本文件討論 LDO 的雜訊測量基礎知識，以及測量極低雜訊 LDO 的選項。所提出的解決方案不單限於適用於 LDO 的雜訊測量，此選項可用於許多其他類型的量測或感測應用。

### 目錄

|   |    |
|---|----|
| <b>1 LDO 雜訊及雜訊量測簡介</b> .....                | 2  |
| 1.1 LDO 雜訊和 LDO 雜訊表示方法.....                 | 2  |
| 1.2 使用頻譜分析器量測 LDO 雜訊.....                   | 2  |
| <b>2 測量超低雜訊 LDO ( 雜訊放大器要求 ) 的解決方案</b> ..... | 4  |
| 2.1 估計放大器的最大雜訊.....                         | 4  |
| 2.2 估計放大器所需增益.....                          | 4  |
| 2.3 選擇放大器電路回饋電阻器值.....                      | 5  |
| 2.4 放大器輸入/輸出 DC 阻斷濾波器.....                  | 7  |
| 2.5 驗證設計的放大器性能.....                         | 8  |
| <b>3 結論</b> .....                           | 10 |
| <b>4 參考資料</b> .....                         | 10 |

### 圖

|  |   |
|--|---|
| 图 1-1. LDO 的典型雜訊圖.....                           | 2 |
| 图 1-2. 典型 LDO 雜訊與典型頻譜分析器雜訊基準的比較.....             | 3 |
| 图 1-3. LDO 的超低雜訊與典型頻譜分析器的雜訊基準之比較.....            | 3 |
| 图 2-1. 建議的放大器電路.....                             | 5 |
| 图 2-2. 非反相運算放大器裝置的雜訊分析.....                      | 5 |
| 图 2-3. 電阻器的熱雜訊.....                              | 6 |
| 图 2-4. 測量的放大器與模擬 RTO 和 RTI 雜訊的比較.....            | 8 |
| 图 2-5. 在 10Hz - 10MHz BW 中測量到的平坦雜訊為 10nV/Hz..... | 9 |
| 图 2-6. 在 1kHz - 10MHz BW 中測量到的平坦雜訊為 1nV/Hz.....  | 9 |

### 註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

## 1 LDO 雜訊及雜訊量測簡介

### 1.1 LDO 雜訊和 LDO 雜訊表示方法

任何電氣系統中作為純粹物理現象出現的雜訊，可以定義為任何干擾、失真或與該系統輸入或輸出相結合的非預期電壓或電流訊號。即使所有外部（外在）雜訊來源都被消除，使其無法耦合到系統中（如雜訊定義所述），系統內部仍會產生內部（內在）雜訊。系統輸出存在前述內在雜訊，通常必須考量與測量前述內在雜訊。LDO 等簡易系統（裝置）會產生內部雜訊，可在輸出上測量。LDO 的雜訊是產品規格表中的主要規格，通常以 10Hz-100kHz（典型值）的頻率頻寬 (BW) 表示。有關 LDO 雜訊的更多詳細資訊，請參閱 [參考資料](#) [1] 部分。產品規格表中的圖表通常用於表示 LDO 的輸出雜訊。圖 1-1 說明典型 LDO 的輸出雜訊。

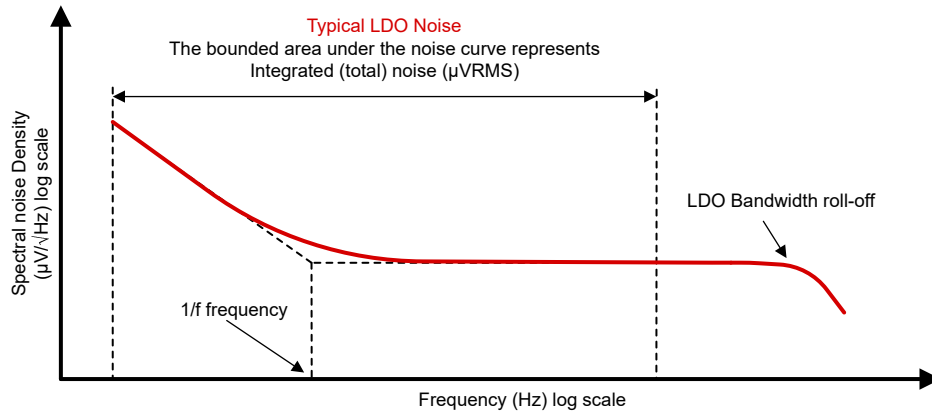


圖 1-1. LDO 的典型雜訊圖

雜訊曲線上的任何點都可辨識為 LDO 在該頻率下的頻譜雜訊密度。在低頻率下，LDO 的雜訊主要受閃爍雜訊影響，然後雜訊在  $1/f$  頻率下衰減至較低的雜訊位準（熱雜訊），接著 LDO 的雜訊曲線會因其 BW 衰減而下降。總雜訊 (RMS) 是 LDO 電氣特性表中報告的額外指標，且伴隨特定頻率 BW。此 RMS 雜訊是特定 BW 雜訊曲線下的累積整合頻譜雜訊密度，通常為 10Hz - 100kHz，單位為  $\mu\text{VRMS}$ 。

### 1.2 使用頻譜分析器量測 LDO 雜訊

BW 頻率比 LDO BW 更寬的頻譜分析器通常用於測量 LDO 的雜訊。頻譜分析器與 LDO 類似，其內部雜訊稱為分析器雜訊基準（靈敏度）。分析器的雜訊基準（嚴格來說稱為顯示的平均雜訊位準 - DANL）是分析器產品規格表中，在其頻率 BW 範圍內的關鍵規格。在進行任何雜訊測量之前，測量分析器的雜訊基準並進行記錄至關重要，如 [參考資料](#) [2] 部分中所述。

若要測量任何分析器的雜訊基準，只需在所需雜訊測量 BW 的多個平均值下，以分析器可用的最低解析度頻寬 (RBW) 設定執行頻率掃頻。測量到的雜訊曲線（雜訊基準）是分析器在該 BW 上所能解析的最低雜訊。了解此雜訊位準後，即可確定使用此類分析器來測量 LDO 的雜訊（DUT 雜訊）。

為了在 LDO 的 BW 運作下保持雜訊測量準確度高於 95%，LDO 的雜訊曲線必須比分析器的雜訊基準曲線高 10dB，如圖 1-2 所示。

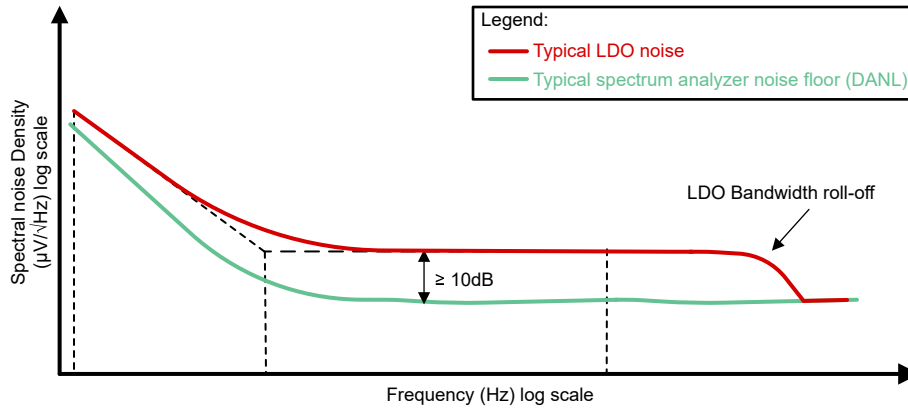


圖 1-2. 典型 LDO 雜訊與典型頻譜分析器雜訊基準的比較

分析器與 LDO 雜訊之間的這種 10dB (或 3.16V/V) 增益，透過將曲線結合為兩個不相關雜訊來源，即可實現 95% 準確度。如果一個來源 (LDO) 比另一個來源 (分析器) 高 3.16(V/V)，則產生的總雜訊中，超過 95% 由較高的來源主導，如方程式 1 中所示：

$$\begin{aligned} \text{Total Noise} &= \sqrt{(3.16)^2 + (1)^2} = 3.31; \\ \text{Measurement Accuracy} &= 100\% - \frac{(3.31 - 3.16)}{3.31} \times 100\% = 95.5\% \end{aligned} \quad (1)$$

鑑於雜訊現象的隨機特性，對 LDO 的任何雜訊測量而言，95% 的準確度選擇是合理的。如果裕度低於 10dB，則會導致在 LDO 的 BW 衰減時測量的準確度較低，如圖 1-2 中所示。當圖 1-2 中的 LDO 雜訊 (紅色曲線) 接近頻譜分析器雜訊基準 (綠色曲線) 時，雜訊量測就會不正確，並顯著受頻譜分析器雜訊影響。這種平坦的雜訊不是 LDO 的雜訊，而是 LDO 和分析器的雜訊組合，主要受分析器雜訊基準的影響。

分析器的內部電路可能會影響測得的 DUT 雜訊，但是導致的雜訊等於或接近雜訊的最小絕對值 -174dBm/Hz。這種極低的雜訊位準是熱雜訊位準 (功率)；接下來將詳細檢視分析器和 LDO (DUT) 的雜訊位準。

圖 1-3 顯示超低雜訊 LDO 的雜訊曲線，其比典型頻譜分析器的雜訊基準低 10dB 以上。那麼，問題是如何測量這超超低雜訊 LDO？

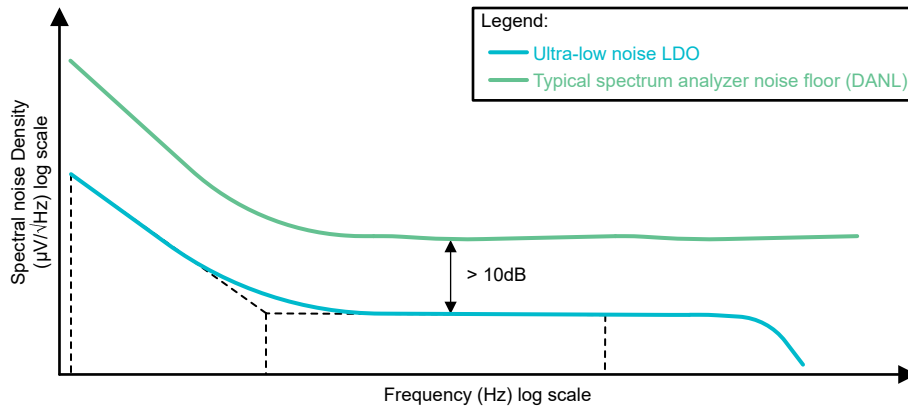


圖 1-3. LDO 的超低雜訊與典型頻譜分析器的雜訊基準之比較

解決方案相對簡單，使用一種放大器，可以將 LDO 的雜訊增益至高於分析器雜訊基準 10dB ( 或更高 )，如此我們就能測量 LDO 雜訊。少數頻譜分析器配備適用這類低雜訊訊號的內建前置放大器，但前置放大器的增益限制通常低於 40dB，而這些前置放大器的 BW 則通常在 1kHz 或更高點起步。

但如果需要更多增益，且測量必須以較低的頻率開始，該怎麼辦？

下節討論 BW 為 10Hz-10MHz 之更高增益放大器的設計需求。

## 2 測量超低雜訊 LDO ( 雜訊放大器要求 ) 的解決方案

### 备注

在深入探討雜訊放大器的設計詳細資訊之前，請先花點時間思考放大器的雜訊如何結合 LDO 和分析器的雜訊，如前面所述。

由於分析器的雜訊已比 LDO 雜訊高出顯著幅度 ( 如圖 1-3 中所示 )，因此可以先放心考慮 LDO 和放大器的雜訊。確定所需放大器的雜訊後，我們即可考慮必要的放大器增益。

### 2.1 估計放大器的最大雜訊

放大器設計的起點是 LDO ( 即 DUT ) 的輸出雜訊。矽製程技術的最新進展使德州儀器能夠提供超低雜訊 LDO。可透過檢查此類 LDO 的雜訊位準來識別頻譜雜訊密度在 1kHz 時為 1.3 - 1.1nV/Hz，在 10kHz 時為 1nV/Hz ( 或更低 )。這些雜訊位準可與目前性能最佳的運算放大器 (op-amp) 裝置提供的雜訊位準相當。從這些位準倒推 ( 使用先前討論的 10dB 裕度 )，需要在 1kHz 和 10kHz 處輸入參考雜訊位準分別為  $\approx 350\text{pV/Hz}$  和  $250\text{pV/Hz}$  的放大器 ( 根據裕度為 10dB )。這些雜訊位準等於電晶體的雜訊位準 ( 未考量所需的 BW 測量，一般 LDO 為 10Hz 至 10MHz )。

幸好，如 [參考資料](#) [3] 部分中所述，透過堆疊並聯運算放大器級即可實現類似且可能更低的雜訊位準。因此，選擇具最低雜訊的運算放大器，分別可達到較低的等效輸入電壓 (EIVN) 與等效輸入電流雜訊 (EICN)。所選運算放大器必須具備足夠寬的 BW，以適應雜訊量測 BW 所需的增益。

德州儀器提供大量低雜訊運算放大器。此設計需要最低的雜訊量和最廣泛的 BW，以符合設計的要求。因此，在 1kHz 時雜訊位準為 700pV/Hz 至 950pV/Hz 的運算放大器是不錯的潛在選擇。放大器設計的另一個必要功能是運算放大器在 1kHz 時必須具有極低的 1/f 雜訊位準。

使用並聯運算放大器技術 ( 在 [參考資料](#) [3] 部分中討論 ) 和雜訊約為 800pV/Hz 的運算放大器會產生大約十個並聯級，如 [方程式 2](#) 中所示：

$$\text{Number of stages } \left( N \right) = \left( \frac{800 \left( \frac{\text{pV}}{\text{Hz}} \right)}{250 \left( \frac{\text{pV}}{\text{Hz}} \right)} \right)^2 = 10.24 \quad (2)$$

模擬與原型設計的結果發現，十個級別在寄生元件與元件公差方面，皆可維持超過 10dB 的裕度，且不會使放大器的電路設計變得顯著複雜。

### 2.2 估計放大器所需增益

本部分會回到放大器設計所需的增益。如果針對典型頻譜分析器 ( BW 範圍為 1kHz-100kHz ) 檢查其 DANL，可發現典型的 DANL 約為 -120dBm/Hz (224nV/Hz)，若雜訊位準比此本底雜訊高出 10dB 或以上，則對應之雜訊位準約為 -110dBm/Hz 或 708nV/Hz。使用此位準，以及 LDO 的雜訊約 1nV/Hz，即可獲得約 708(V/V) 的增益。

$$\text{The roughly estimated amplifier gain} = 20 \times \log(708) = 57\text{dB} \quad (3)$$

此估計是對我們設計最小增益值的概略估計。此最小增益值遠高於僅有少數分析器隨前置放大器提供的 40dB 增益。

[圖 2-1](#) 顯示建議的放大器電路。

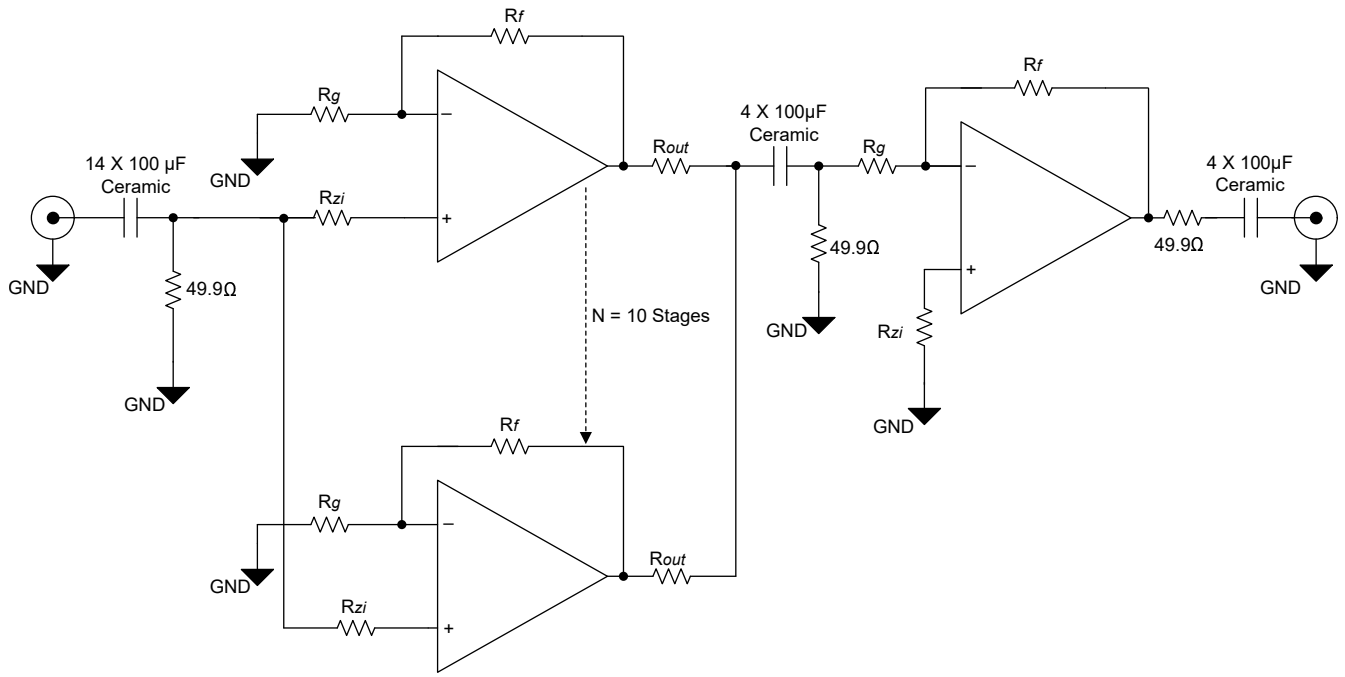


圖 2-1. 建議的放大器電路

為在 BW 為 10Hz - 10MHz 的測量範圍內維持平穩增益響應，所需總放大器增益 (約 70dB，調整至最小值高於 57dB) 由兩個串聯級別執行。第一級嚴格採用非反相配置，具有大多數增益，以快速將 LDO (DUT) 的雜訊提高至更高位準。第二級位於反相配置中，可用於微調放大器的總增益。

### 2.3 選擇放大器電路回饋電阻器值

上一節提到的建議放大器電路在串聯與並聯級使用相同的運算放大器裝置，以實現性能、設計簡易性並節省設計成本。若要運用運算放大器的超低雜訊性能，必須使用極小的回饋電阻值。

檢查圖 2-2 中所示的雜訊分析，以了解非反相運算放大器裝置。

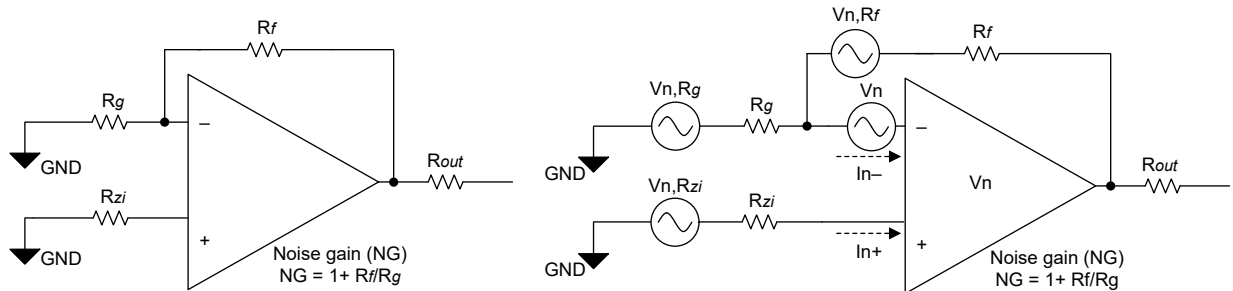


圖 2-2. 非反相運算放大器裝置的雜訊分析

$V_n$ ：代表運算放大器電壓雜訊。

$V_n$ 、 $R_x$ ：電路中各電阻器產生的電壓雜訊。此電壓雜訊可使用方程式 4 計算：

$$V_n, R_x = \sqrt{4KTR} \quad (4)$$

其中 K 為波茲曼常數 =  $1.380649 \times 10^{-23}$  (J/K)，T 為溫度，單位為克耳文。

$I_{n\pm}$ ：表示在任一輸入電阻器中流動的運算放大器電流所產生的熱雜訊。

方程式 5 可用於計算運算放大器輸入電流的雜訊。

$$I_{n\pm} = (I_{n\pm})^2 \times R_x^2 \quad (5)$$

使用 [參考資料 \[4\]](#) 部分中的非反相運算放大器雜訊計算，使用 [方程式 6](#) 取得輸入參考雜訊 (RTI)：

$$\text{Referred to input Noise (RTI)} = \sqrt{(V_n)^2 + 4KTR_{zi} + 4KTR_g \left[ \frac{R_f}{R_f + R_g} \right]^2 + (I_{n+} \times R_{zi})^2 + \left( I_{n-} \times \left[ \frac{R_g \times R_f}{R_g + R_f} \right] \right)^2 + 4KTR_f \left[ \frac{R_f}{R_g + R_f} \right]^2} \quad (6)$$

如果使用電阻器的熱雜訊方程式 ([方程式 4](#)) 繪製 x 軸上的電阻和 y 軸上雜訊的圖解，結果如 [圖 2-3](#) 所示。

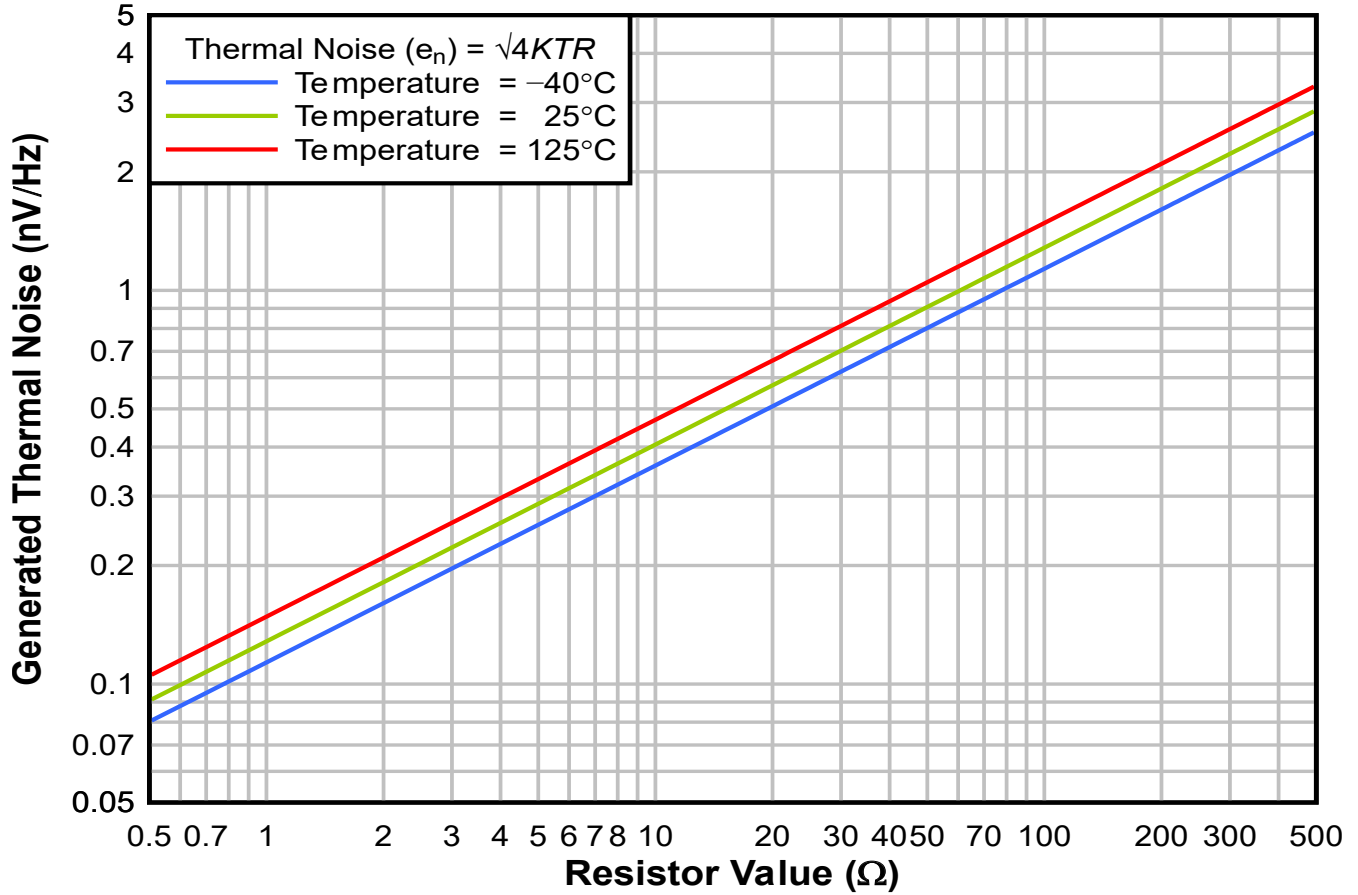


圖 2-3. 電阻器的熱雜訊

**图 2-3** 顯示位於室溫的  $50\ \Omega$  電阻器會產生的熱雜訊等於在 1kHz 時 900pV/Hz 運算放大器的雜訊。在此放大器設計中，為回饋電阻器選擇極小的值十分重要，因為這類電阻器會產生熱雜訊，可超出所選運算放大器的雜訊。透過檢查**方程式 6**，了解  $R_{zi}$ 、 $R_g$  和  $R_f$  的電阻值較大時，與運算放大器的雜訊相比，會產生很大的雜訊。必須選擇電阻值，讓運算放大器雜訊成為**方程式 6** 中的主要雜訊來源，才能讓此特定設計運作。電阻器的  $R_{zi}$  和  $R_g$  值可具有相同的小值，以平衡運算放大器的輸入電流，進而維持最小輸出補償電壓。電阻器的  $R_f$  值可能相對較大，以適應第一個並聯級的顯著增益，因為此級承擔放大器電路的大部分總增益。此放大器電路偏好使用薄膜電阻器，因為相較於厚膜電阻器，這些電阻器可提供更高的穩定性，同時可維持更低的雜訊。

第二級串聯級回饋電阻器值並非那麼關鍵，因為放大訊號（雜訊）已高於運算放大器和電阻器的雜訊。上述所有電阻器的封裝尺寸必須維持為小型封裝尺寸，以減少其下方的寄生電容。

## 2.4 放大器輸入/輸出 DC 阻斷濾波器

在放大器輸入、第二級串聯級輸入和分析器輸入處阻斷 DC 的高通濾波器，用於消除任何接近放大雜訊訊號的 DC 偏移。輸入濾波器具備 3Hz 截止頻率，可在必要時從如此低頻進行足夠平坦的雜訊量測。其餘濾波器具備 10Hz 截止頻率，符合 LDO 的 BW 雜訊量測要求。

鉭電容器是阻隔 DC 到放大器輸入端的濾波器理想選擇，但儘管這些電容器有壓電性質，仍可以使用陶瓷電容器。在此設計中，使用陶瓷電容器，因為這些電容器維持中性極性屬性，且具有特性上較低的 ESR 和 ESL。如此即可將放大器用於正負 LDO。將放大器電路置於無振動和抗 RF 的測試機殼中，可消除此類電容器的不利壓電特性。

## 2.5 驗證設計的放大器性能

了解 NG 後，即可輕鬆測量 RTO 雜訊，然後計算放大器電路的 RTI 雜訊。圖 2-4 顯示測量的放大器與 HP4395A 頻譜分析器模擬 RTO 雜訊、RTI 雜訊及所測量雜訊基準的比較。

### 备注

任何雜訊基準低於放大器 RTO 雜訊的頻譜分析器，都可搭配建議的放大器設計使用。

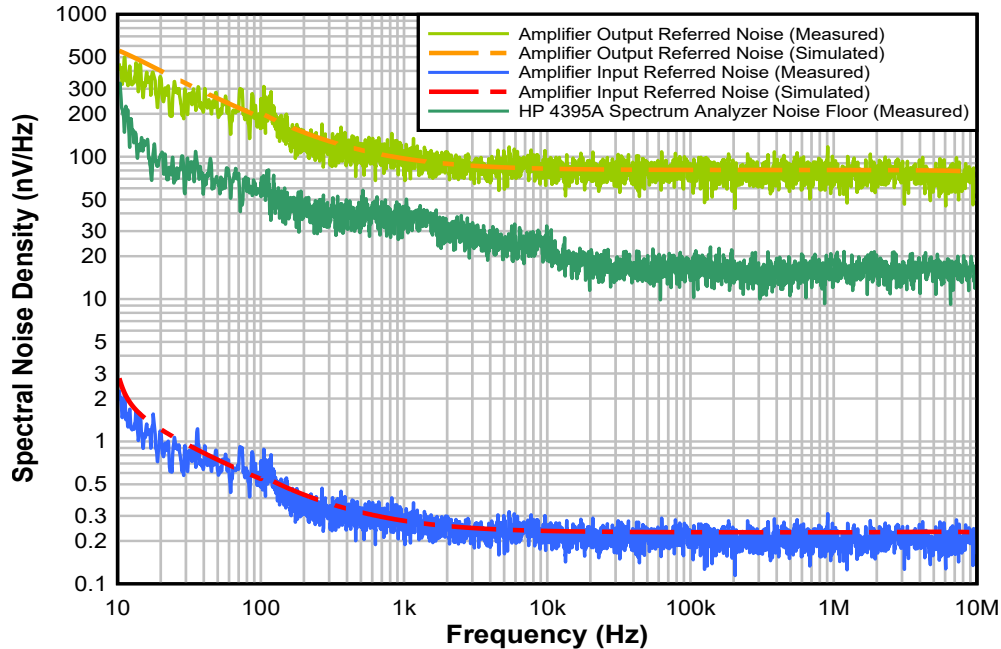


圖 2-4. 測量的放大器與模擬 RTO 和 RTI 雜訊的比較

在圖 2-4 中，測量的放大器 RTO 雜訊曲線與模擬 RTO 雜訊非常匹配。測量的放大器 RTO 雜訊也比頻譜分析器測量的雜訊基準高 10dB (如要求)，因此可實現高於 95% 的量測準確度。

同樣，透過將測量的 RTO 雜訊除以 NG 所計算出的放大器 RTI 雜訊，與模擬 RTI 雜訊吻合良好。測量的放大器 RTI 雜訊可做為 LDO 雜訊測量的新 (經改善) 雜訊基準。

在對 LDO (DUT) 進行雜訊量測之前，TI 建議驗證另一項量測以確認放大器性能。使用像 NC6105A 這樣的平坦白雜訊產生器，在 10Hz - 10MHz 的 BW 中產生 10nV/Hz (-147dBm) 的平坦雜訊，然後使用此設計測量該雜訊。這種極低的雜訊位準略低於 HP4395A 的雜訊基準。圖 2-5 顯示測量到的平坦雜訊為 10nV/Hz。

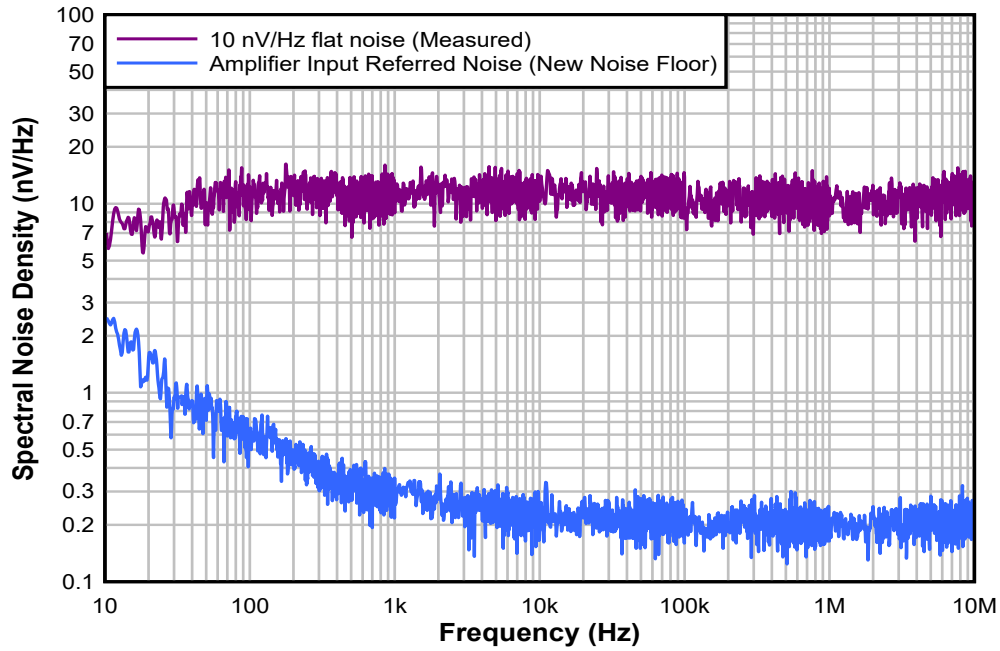


图 2-5. 在 10Hz - 10MHz BW 中測量到的平坦雜訊為 10nV/Hz

可使用此放大器測量較低的雜訊位準 ( 低至 1nV/Hz 且可能為 0.9nV/Hz ) ，但是，放大器的輸入雜訊低於實際放大器的雜訊 ( 運算放大器 1/f 雜訊 ) ，低於 1kHz，如圖 2-6 所示。

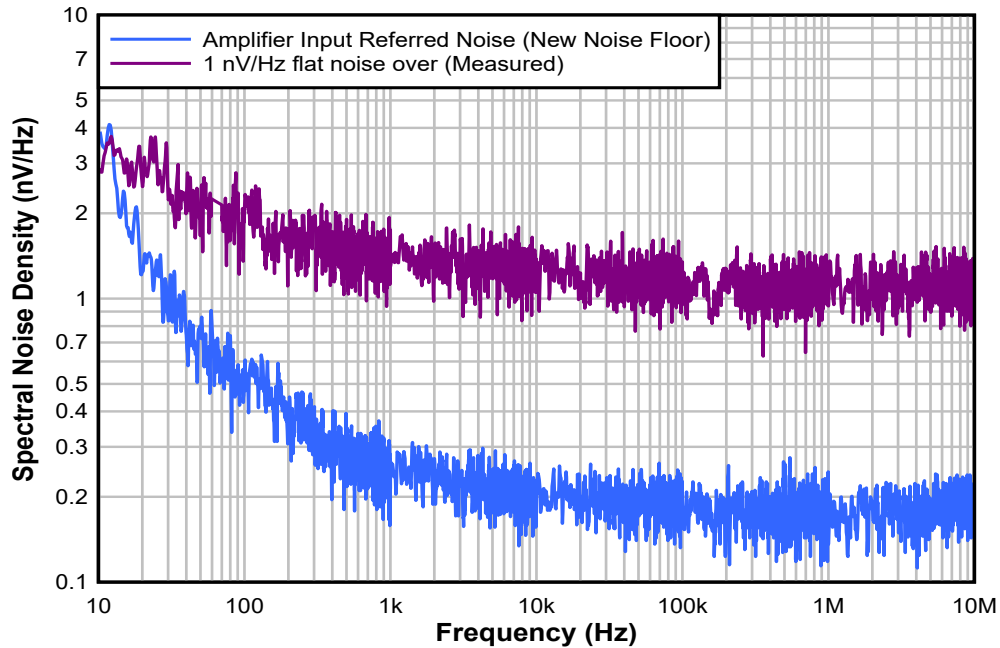


图 2-6. 在 1kHz - 10MHz BW 中測量到的平坦雜訊為 1nV/Hz

### 3 結論

本技術白皮書討論了使用頻譜分析器時 LDO 的雜訊測量基礎知識。本文件也探討了設計測量超低雜訊 LDO 雜訊所需超低雜訊放大器電路的需求。設計的放大器電路採用 [參考資料](#) [3] 部分討論的並聯運算放大器技術，以降低放大器的輸入參考雜訊。由於輸入雜訊的大幅減少，此放大器設計成為 BW 在 3Hz-10MHz 內放大微型訊號的重要工具。此外，為改善任何頻譜分析器的雜訊基準測量，放大器電路也可用於改善任何網路分析器的雜訊基準測量。

使用陶瓷電容器作為阻斷 DC 的濾波器，可讓放大器處理具有正或負補償電壓的雜訊（微小訊號）。

### 4 參考資料

1. 德州儀器，[LDO 雜訊解密](#)，應用報告。
2. Keysight Technologies, [Understanding Noise and Sensitivity in Spectrum Analyzers](#), white paper, Keysight Technologies website (2000 – 2025), viewed 21 October 2025.
3. G. Scandurra, G. Cannatà, G. Giusi and C. Ciofi, 2013. [Configurable Low Noise Amplifier for Voltage Noise Measurements](#), 2013 22nd International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF), Montpellier, France, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICNF.2013.6578999.
4. 德州儀器，[運算放大器電路中的雜訊分析應用報告](#)，應用說明。

## 重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的智慧財產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#)、[TI 的通用品質指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](http://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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025