

Technical White Paper

测量超低噪声 LDO 的输出噪声



Haidar Hamoo

摘要

本技术白皮书概述了如何测量低压降稳压器 (LDO) 的噪声。本文件还为测量超低噪声 LDO 的噪声提供了解决方案。电流 LDO 的输出噪声水平可远低于市面上绝大多数频谱分析仪的灵敏度阈值。本文档探讨了 LDO 的噪声测量基础知识以及测量极低噪声 LDO 的方案。所提出的解决方案不仅限于 LDO 的噪声测量，该方案还可应用于多种其他类型的测量或传感应用中。

内容

1 LDO 噪声和噪声测量简介.....	2
1.1 LDO 噪声和 LDO 噪声表征方法.....	2
1.2 使用频谱分析仪测量 LDO 噪声.....	2
2 测量超低噪声 LDO 的解决方案 (噪声放大器要求)	4
2.1 估算放大器的最大噪声.....	4
2.2 估算放大器所需增益.....	4
2.3 选择放大器电路反馈电阻值.....	5
2.4 放大器输入/输出直流阻断滤波器.....	7
2.5 验证所设计的放大器性能.....	8
3 结语.....	10
4 参考资料.....	10

插图清单

图 1-1. LDO 的典型噪声图.....	2
图 1-2. 典型 LDO 噪声与典型频谱分析仪本底噪声间的关系.....	3
图 1-3. LDO 的超低噪声与典型频谱分析仪本底噪声间的关系.....	3
图 2-1. 建议采用的放大器电路.....	5
图 2-2. 同相运算放大器器件的噪声分析.....	5
图 2-3. 电阻器热噪声.....	6
图 2-4. 测得的放大器与仿真的 RTO 和 RTI 噪声间的关系.....	8
图 2-5. 在 10Hz - 10MHz 的带宽范围内测得的平坦噪声为 10nV/Hz.....	9
图 2-6. 在 1kHz - 10MHz 的带宽范围内测得的平坦噪声为 1nV/Hz.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 LDO 噪声和噪声测量简介

1.1 LDO 噪声和 LDO 噪声表征方法

在任何电气系统中作为纯物理现象发生的噪声可定义为干扰、畸变或与该系统输入或输出信号叠加的任何有害电压或电流信号。即使消除了所有外部（外源性）噪声源均被隔绝于系统之外（正如噪声定义所示），系统内部仍会产生内在（内源性）噪声。这种内源性噪声存在于系统输出端，通常必须考虑和测量这种内源性噪声。像 LDO 这类简单系统（器件）会产生内部噪声，可在输出端测量该噪声。LDO 的噪声是数据表中的一项关键规格，通常以 10Hz - 100kHz（典型值）的频率带宽 (BW) 表示。有关 LDO 噪声的更多详细信息，请参阅[参考文献](#) [1] 一节。数据表中的图形常用于表示 LDO 的输出噪声。[图 1-1](#) 展示了典型 LDO 的输出噪声。

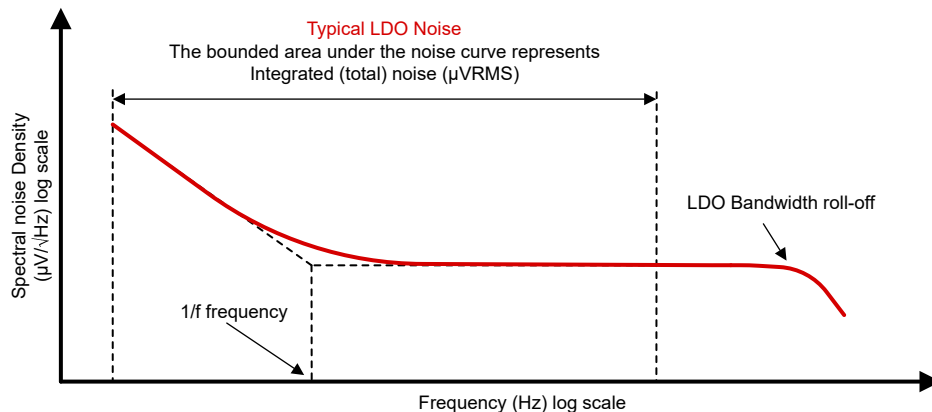


图 1-1. LDO 的典型噪声图

噪声曲线上的任何点都会被识别为 LDO 在该频率下的频谱噪声密度。在低频下，LDO 的噪声主要由闪烁噪声主导，随后噪声在 1/f 频率处衰减至更低噪声水平——热噪声——最后 LDO 噪声曲线因 LDO 带宽衰减而逐渐平缓。总噪声或 RMS 是 LDO 电气特性表中报告的附加指标，需配合特定频率带宽使用。此 RMS 噪声只是特定带宽范围内噪声曲线下的谱噪声密度累积积分值，通常为 10Hz - 100kHz，单位为 μVRMS 。

1.2 使用频谱分析仪测量 LDO 噪声

通常使用频率带宽大于 LDO 带宽的频谱分析仪来测量 LDO 的噪声。与 LDO 类似，频谱分析仪具有内部噪声，称为分析仪本底噪声（灵敏度）。分析仪的本底噪声（技术上称为所显示的平均噪声水平 - DANL）是分析仪数据表中有关分析仪频率带宽的关键规格参数。在进行任何噪声测量之前，测量分析仪的本底噪声并进行相应调整至关重要，如[参考文献](#) [2] 一节所述。

要测量任何分析仪的本底噪声，只需在目标噪声测量带宽范围内，以分析仪最低分辨率带宽 (RBW) 设置进行多次平均的频率扫描即可。测得的噪声曲线（本底噪声）是分析仪可以在该带宽上解析的最低噪声。了解该噪声水平后，可以确定是否使用此类分析仪来测量 LDO 的噪声（DUT 噪声）。

为确保 LDO 工作带宽内噪声测量精度高于 95%，LDO 的噪声曲线必须比分析仪的本底噪声曲线高 10dB，如 图 1-2 所示。

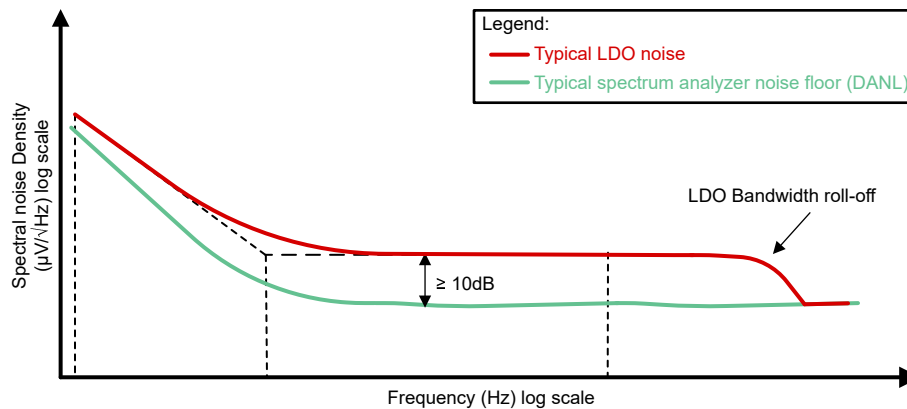


图 1-2. 典型 LDO 噪声与典型频谱分析仪本底噪声间的关系

通过将曲线组合为两个不相关噪声源，分析仪和 LDO 噪声之间的 10dB (或 3.16V/V) 增益可实现 95% 的精度。如果一个噪声源 (LDO) 比另一个噪声源 (分析仪) 高 3.16 (V/V)，则在产生的总噪声中有超过 95% 的噪声由更高的噪声源主导，如 方程式 1 所示：

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

考虑到噪声现象的随机性质，在 LDO 的任何噪声测量中，选择 95% 精度是合理的。如果裕度低于 10dB，则 LDO 带宽滚降区域的测量精度将显著降低，如 图 1-2 所示。当 图 1-2 中的 LDO 噪声 (红色曲线) 接近频谱分析仪本底噪声 (绿色曲线) 时，噪声测量结果将失真，且明显受频谱分析仪噪声主导。这种平坦噪声并不是 LDO 的固有噪声，而是由 LDO 和分析仪的噪声叠加而成的，主要受分析仪的本底噪声影响。

分析仪的内部电路可能会影响测得的 DUT 噪声，但产生的噪声等于或接近噪声的绝对最小值 -174dBm/Hz。这个极低的噪声水平是热噪声水平 (功率)；分析仪与 LDO (DUT) 的噪声水平将在后续章节中详细探讨。

图 1-3 显示了超低噪声 LDO 的噪声曲线，其噪声水平比典型频谱分析仪的本底噪声低 10dB 以上。那么，问题是如何测量这种超低噪声 LDO？

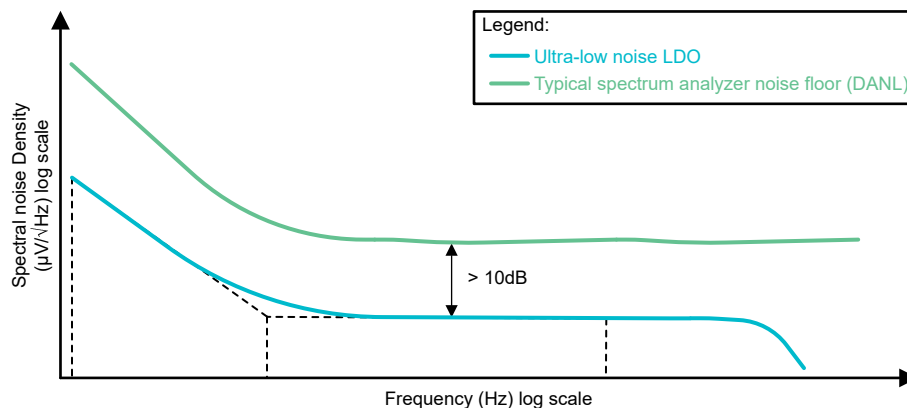


图 1-3. LDO 的超低噪声与典型频谱分析仪本底噪声间的关系

解决方案相对简单——即使用一个放大器将 LDO 的噪声增益提高到比分析仪本底噪声高 10dB (或更高) 的水平, 因此我们可以测量 LDO 噪声。很少有频谱分析仪内置适用于这类低噪声信号的前置放大器; 即便配备前置放大器, 其增益通常也受限在 40dB 以下, 且这些前置放大器的带宽往往从 1kHz 或更高频率开始升高。

那么当需要更高增益且测量必须从更低频率开始时该如何应对?

下一章节将探讨带宽为 10Hz – 10MHz 的更高增益放大器的设计要求。

2 测量超低噪声 LDO 的解决方案 (噪声放大器要求)

备注

在深入探讨噪声放大器的设计细节之前, 请先考虑放大器噪声与 LDO 和分析仪噪声的叠加效应, 如前所述。

由于分析仪的噪声已经比 LDO 的噪声高了很大的裕度 (如 [图 1-3](#) 所示), 因此首先可以安全地考虑 LDO 和放大器的噪声。一旦确定了所需放大器的噪声, 我们就可以考虑必要的放大器增益了。

2.1 估算放大器的最大噪声

设计放大器的起点是 LDO (DUT) 的输出噪声。得益于硅工艺技术的最新进展, 德州仪器 (TI) 现可提供超低噪声 LDO。通过检查此类 LDO 的噪声水平, 可以确定 1kHz 时频谱噪声密度为 1.3 – 1.1nV/Hz, 10kHz 时频谱噪声密度为 1nV/Hz (或更低)。这些噪声水平与当前高性能运算放大器器件提供的噪声水平相当。根据上述噪声水平 (结合前文提及的 10dB 裕度) 反向推导可知, 正如该 10dB 裕量所要求的, 需要一款放大器, 其在 1kHz 和 10kHz 频率下的输入基准噪声水平需分别约为 350pV/Hz 和 250pV/Hz。这些噪声水平相当于晶体管的噪声水平 (未考虑典型 LDO 所需的 10Hz 至 10MHz 带宽测量要求)。

幸运的是, 通过并联运放级叠加技术可以实现类似甚至可能更低的噪声水平, 如 [参考文献 \[3\]](#) 一节所述。因此, 请选择噪声最低的运算放大器, 分别实现更低的等效输入电压 (EIVN) 和等效输入电流噪声 (EICN)。所选的运算放大器必须具有足够宽的带宽, 以满足噪声测量带宽内的增益要求。

德州仪器 (TI) 能提供大量低噪声运算放大器产品。此设计需要最低的噪声和最宽的带宽电流, 以满足设计的要求。因此, 在 1kHz 时具有 700pV/Hz 至 950pV/Hz 噪声水平的运算放大器是理想候选器件。放大器设计另一个必需的特性是, 运算放大器必须在 1kHz 时具有极低的 1/f 噪声水平。

采用并联运算放大器技术 (详见 [参考文献 \[3\]](#) 一节) 并选用噪声约为 800pV/Hz 的运算放大器, 可实现约十级并联级联, 如 [方程式 2](#) 所示:

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

仿真和原型设计结果表明, 十级级联在保持超过 10dB 裕度应对寄生效应和元件公差的同时, 并未显著增加放大器电路设计的复杂度。

2.2 估算放大器所需增益

本节重新探讨放大器设计所需的增益。若考察典型频谱分析仪 (1kHz – 100kHz 范围内的带宽) 的 DANL, DANL 典型值接近 -120dBm/Hz (224nV/Hz)。当噪声水平达到 10dB 或更高时, 该值约为 -110dBm/Hz 或 708nV/Hz。结合 LDO 约 1nV/Hz 的噪声水平, 可实现约 708(V/V) 的增益。

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

该估算值是我们设计的最小增益值的粗略估算值。该最小增益值远高于仅少数配备前置放大器的分析仪所能提供的 40dB 增益。

[图 2-1](#) 所示的是建议采用的放大器电路。

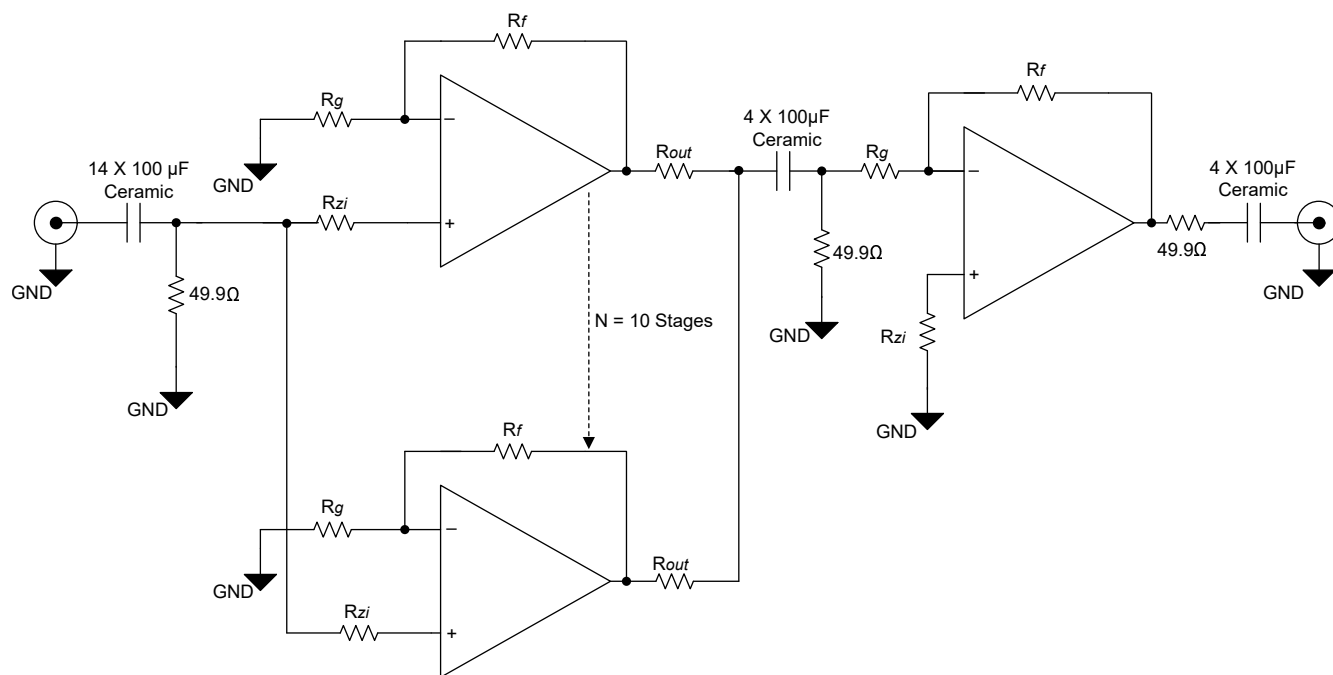


图 2-1. 建议采用的放大器电路

为了在 10Hz - 10MHz 的带宽测量范围内保持平坦的增益响应，所需的放大器总增益 (大约 70dB，调整到 57dB 的最小值以上) 通过两级串联方式实现。第一级严格采用同相配置，它承载大部分增益，可将 LDO (DUT) 的噪声快速提高到更高水平。第二级采用反相配置，用于微调放大器的总增益。

2.3 选择放大器电路反馈电阻值

前文所述的放大器电路在串联和并联级中采用相同的运算放大器器件，以优化性能、简化设计及节约成本。为充分发挥运算放大器的超低噪声性能，必须采用极小值的反馈电阻。

参见 图 2-2 中所示的同相运算放大器器件的噪声分析。

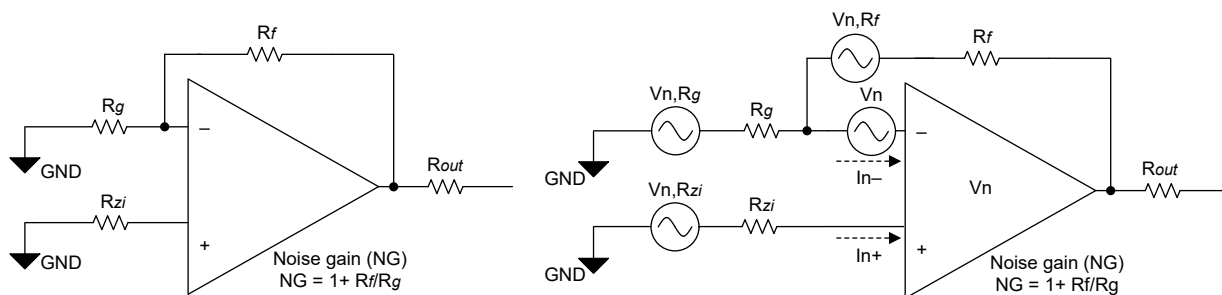


图 2-2. 同相运算放大器器件的噪声分析

V_n ：表示运算放大器电压噪声。

V_n, R_x ：电路中每个电阻器产生的电压噪声。电压噪声可以根据公式 (4) 计算：

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

其中 K 是玻尔兹曼常数 = 1.380649×10^{-23} (1/K°)，K 是以开尔文为单位的温度。

$I_{n\pm}$ ：表示流经任一输入电阻器的运算放大器电流产生的热噪声。

公式 5 可用于计算运算放大器输入电流的噪声。

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

参照 [参考文献 \[4\]](#) 一节中的非反相运算放大器噪声计算方法，可通过 [公式 6](#) 获得输入等效噪声 (RTI)：

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

若将电阻器热噪声 ([公式 4](#)) 绘制成电阻为 x 轴，而噪声为 y 轴的曲线，结果如 [图 2-3](#) 所示。

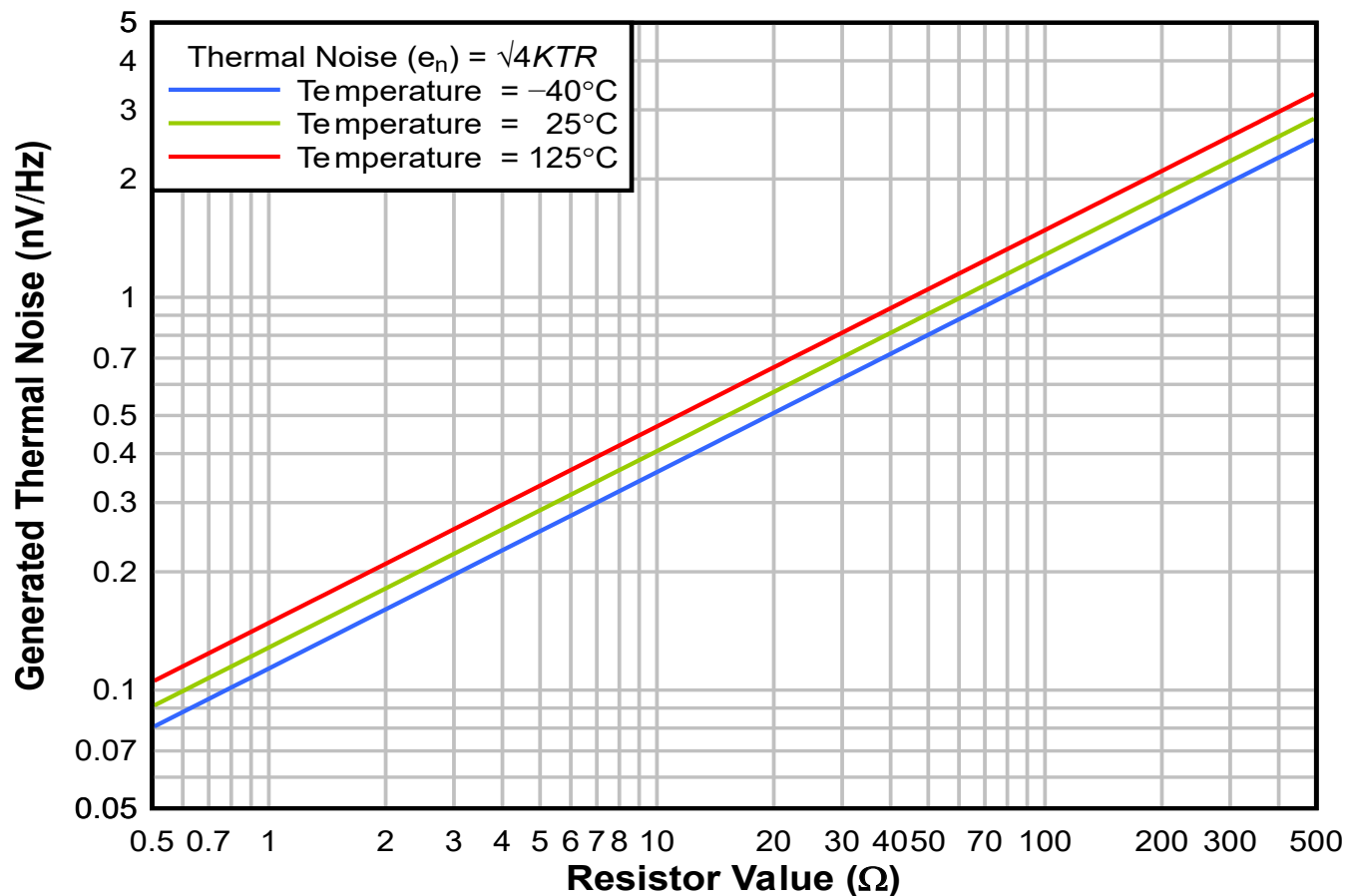


图 2-3. 电阻器热噪声

图 2-3 所示的是一个 $50\ \Omega$ 电阻器在室温下产生的热噪声相当于 $900\text{pV}/\text{Hz}$ 运算放大器在 1kHz 频率下的噪声。在此放大器设计中, 选择非常小的反馈电阻值至关重要, 因为此类电阻产生的热噪声可能超过所选运算放大器的噪声。通过查阅公式 6 可知, 当 R_{zi} 、 R_g 和 R_f 相对于运算放大器的噪声较大时, 这些电阻值会产生显著的噪声。本设计需选择使运算放大器噪声成为公式 6 中主导噪声源的电阻值。电阻器的 R_{zi} 和 R_g 值可采用相同的小阻值以平衡运算放大器的输入电流, 从而保持最小输出偏置电压。电阻器的 R_f 值可以相对较大, 以适应第一级并联级所需的显著增益, 该级承担放大器电路的大部分总增益。薄膜电阻器是该放大器电路的首选元件, 因其相较于厚膜电阻器能提供更优的稳定性, 同时保持更低的噪声水平。

第二个串联级的反馈电阻值并不那么重要, 因为放大的信号 (噪声) 已高于运算放大器和电阻器的噪声。上述所有电阻器的封装尺寸必须保持较小的封装, 以减小其底部的寄生电容。

2.4 放大器输入/输出直流阻断滤波器

在放大器输入端、第二级串联输入端以及分析仪输入端均采用高通滤波器阻隔直流信号, 以防止任何直流偏移渗入放大的噪声信号。输入滤波器具有 3Hz 的截止频率, 必要时可在此类低频下实现足够平坦的噪声测量。其余滤波器具有 10Hz 截止频率, 这是 LDO 的带宽噪声测量所要求的。

钽电容器是阻隔直流进入放大器输入端的滤波器首选元件, 但尽管陶瓷电容器具有压电特性, 仍可用于此类应用。本设计使用陶瓷电容器, 因其具有中性极性特性并具有极低的 ESR 和 ESL 特性。这使得该放大器可同时用于正负 LDO。将放大器电路置于无振动且具有射频抗扰性的测试箱中, 可消除此类电容器的不利压电特性。

2.5 验证所设计的放大器性能

了解 NG 后，可以轻松测量 RTO 噪声并计算放大器电路的 RTI 噪声。图 2-4 展示了测得的放大器与 HP4395A 频谱分析仪的仿真 RTO 噪声、RTI 噪声和测得的本地噪声之间的关系。

备注

本底噪声低于放大器 RTO 噪声的任何频谱分析仪均可用于拟定的放大器设计中。

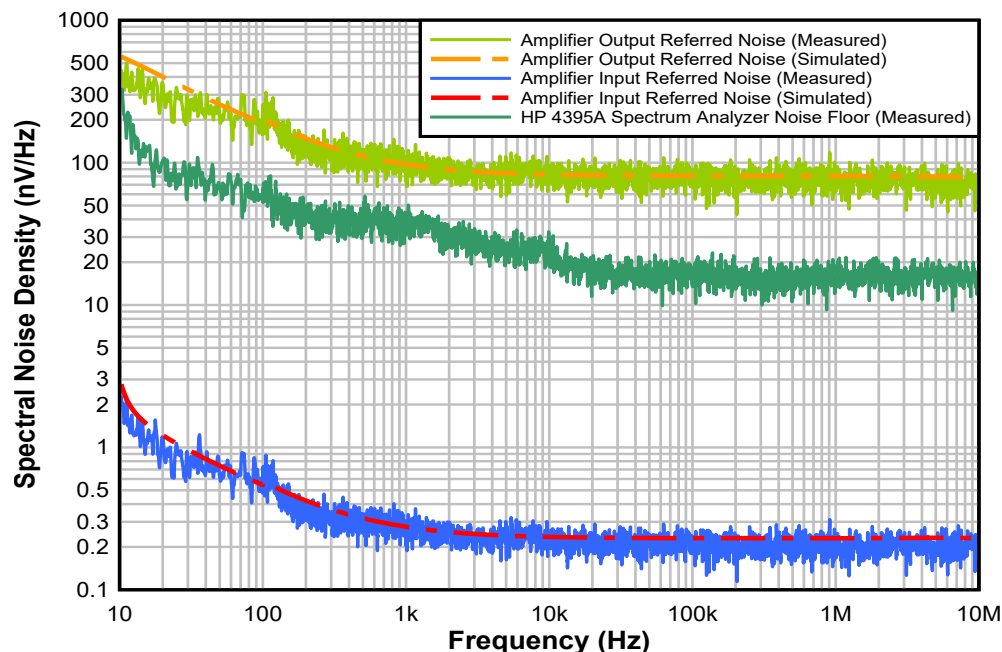


图 2-4. 测得的放大器与仿真的 RTO 和 RTI 噪声间的关系

在图 2-4 中，放大器测得的 RTO 噪声曲线与仿真的 RTO 噪声非常匹配。该放大器的测得 RTO 噪声也比频谱分析仪的测得本底噪声高出 10dB (符合要求)，从而实现了大于 95% 的测量精度。

同样，通过将测得的 RTO 噪声除以 NG，计算出的放大器 RTI 与仿真的 RTI 噪声完全匹配。测得的放大器 RTI 噪声现作为 LDO 噪声测量时的新本底噪声 (改进后的)。

在测量 LDO (DUT) 的噪声之前，TI 建议先对另一项测量进行验证，以确认放大器性能。使用 NC6105A 等平坦白噪声发生器在 10Hz - 10MHz 的带宽上生成 10nV/Hz (-147dBm) 平坦噪声，然后在此次设计中测量该噪声。这一极低的噪声水平略低于 HP4395A 的本底噪声。图 2-5 所示为测得的 10nV/Hz 平坦噪声。

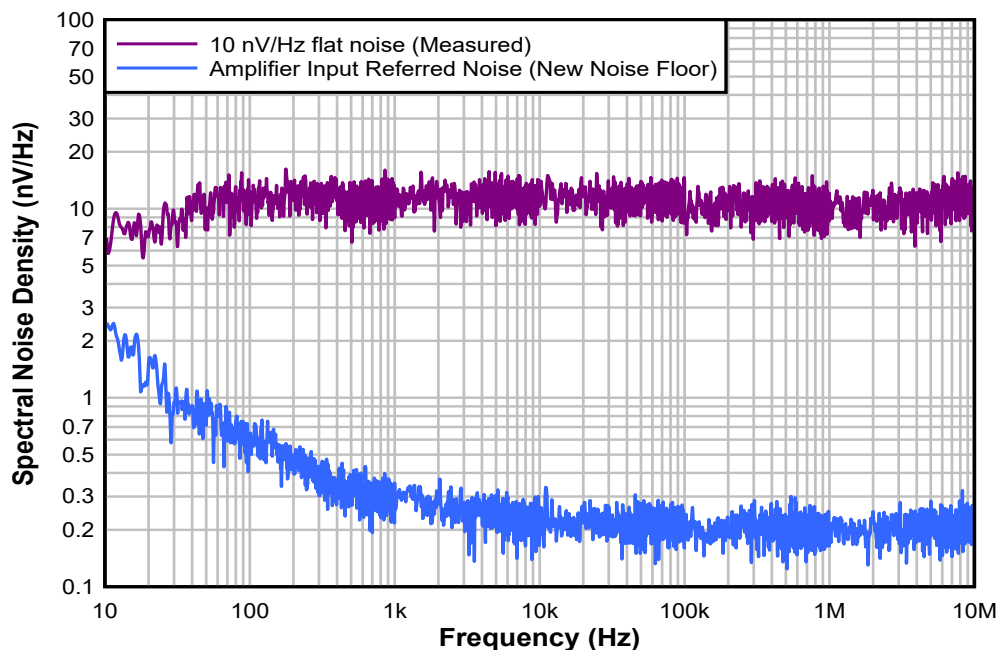


图 2-5. 在 10Hz - 10MHz 的带宽范围内测得的平坦噪声为 10nV/Hz

使用该放大器可以测量出较低的噪声水平 (低至 1nV/Hz, 理论可达 0.9nV/Hz), 但是放大器的输入噪声低于实际放大器的噪声 (运算放大器 1/f 噪声), 低于 1kHz 时尤为显著, 如 图 2-6 所示。

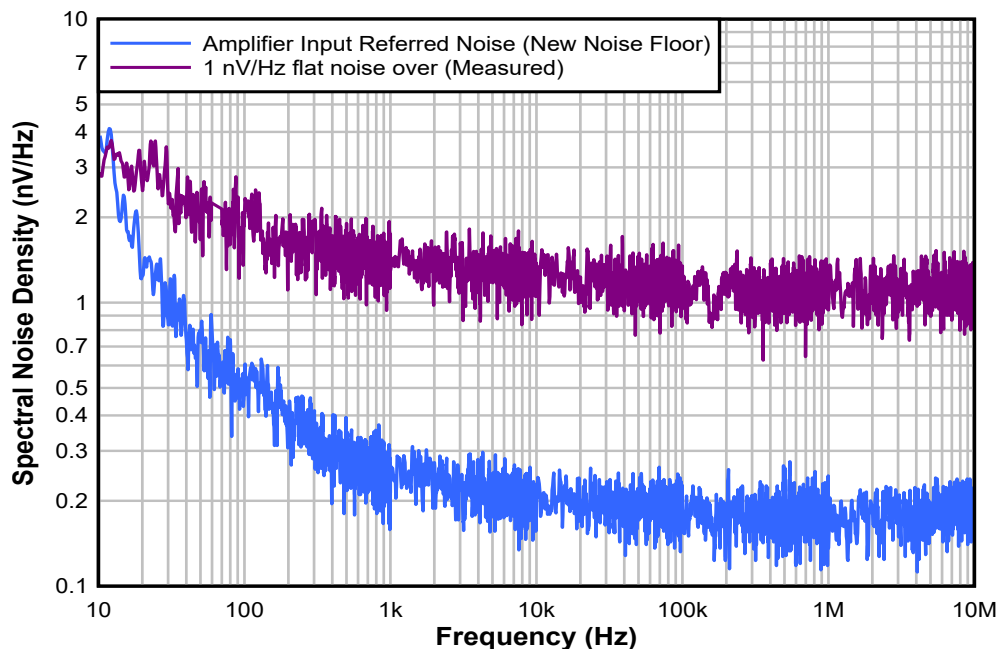


图 2-6. 在 1kHz - 10MHz 的带宽范围内测得的平坦噪声为 1nV/Hz

3 结语

本技术白皮书探讨了使用频谱分析仪测量 LDO 噪声的基础原理。本文档还阐述了设计超低噪声放大器电路的必要要求，该电路用于测量超低噪声 LDO 的噪声。所设计的放大器电路采用[参考文献\[3\]](#)一节中提到的并联运算放大器技术，有效降低了放大器的输入等效噪声。输入噪声的这种显著降低使此放大器设计成为在 3Hz - 10MHz 带宽内放大微弱信号的重要工具。此外，为了改进任何频谱分析仪的本底噪声测量，放大器电路还可用于改进任何网络分析仪的本底噪声测量。

采用陶瓷电容器作为直流阻隔滤波器，使放大器能够处理具有正负偏置电压的噪声（微弱信号）。

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[LDO 噪音揭秘](#)，应用手册。
2. Keysight Technologies，《[理解频谱分析仪中的噪声与灵敏度](#)》，白皮书，Keysight Technologies 网站 (2000 - 2025)，于 2025 年 10 月 21 日查阅。
3. G. Scandurra, G. Cannatà, G. Giusi 和 C. Ciofi, 2013。[测量电压噪声时所用的可配置低噪声放大器](#)，2013 年第 22 届国际噪声和波动会议 (ICNF)，法国蒙彼利埃，2013 年，第 1-4 页，doi : 10.1109/ICNF.2013.6578999。
4. 德州仪器 (TI)，[运算放大器电路噪声分析应用报告](#)，应用说明。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月