

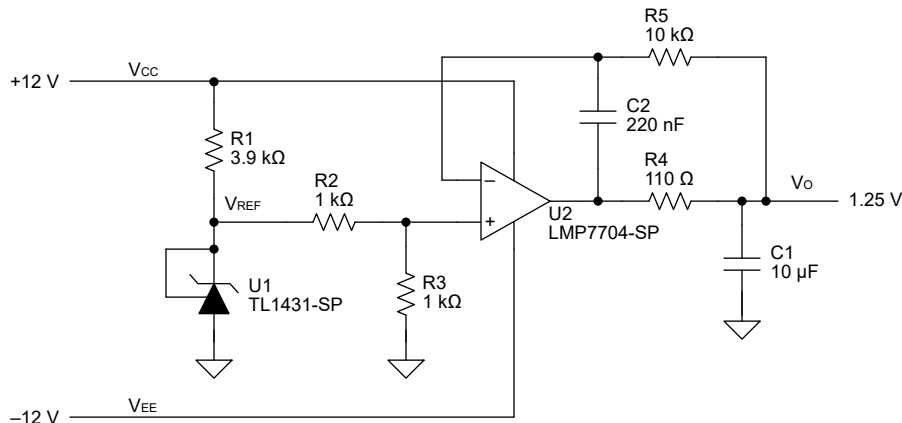
Nigel Smith, Akshat Garg

设计目标

参数	设计要求
电源电压	±12V
输出电压	1.25V
输出电流	1mA
输出噪声	在 1kHz 至 10MHz 范围内小于 25nV/√Hz
耐辐射性	100krad(Si)

设计说明

本电路设计使用低通滤波器和运算放大器来降低并联电压基准产生的宽带噪声。开发该电路最初是为了向卫星中的 CCD 传感器供电：单独的并联基准不能满足应用的性能要求，需要附加电路才能满足项目要求。



设计注意事项

TI 有许多适用的航天级电压基准，但对于本应用，选择的是 **TL1431-SP**，这是因为它具有良好的噪声性能和高辐射耐受性。U1 可以生成的最低电压为 2.5V，因此采用 R2 和 R3 生成针对 U2 的 1.25V 输入（它们还会使 U1 的噪声衰减一半）。R1 和 R2 以较低的值来限制这些组件产生的噪声。选择 R1 的理由是，即便连接 R2 和 R3，也会有 1mA 的偏置电流通过 U1。

R4 和 C1 形成低通滤波器，可衰减来自电压基准的噪声。根据显示的值，该滤波器的 3dB 频率为 145Hz。R4 和 C1 值的精度并不重要。但是，最好不要让 R4 太大，因为运算放大器必须纠正由流经 R4 的输出电流引起的误差，如果 R4 上的压降太大，运算放大器可能会没有余量。

R4 和 C1 为放大器响应添加了一个极点，而 R5 和 C2 添加了一个零点，以补偿该极点并实现稳定运行。选择 R5 和 C2 的理由是确保 $R5 \times C2 = 2 \times R4 \times C1$ ，从而尽可能减小响应中的噪声增益峰值。

与电压基准相比，用于本应用的运算放大器本身不应产生明显的噪声；然而，即使运算放大器产生任何噪声，由 R4 和 C1 形成的滤波器也会使该噪声衰减。请注意，对于 LMP7704-SP，在使用了组件值的情况下，电流噪声与电压噪声相比微不足道，可以忽略。

设计步骤

- 选择电阻器 R2 和 R3，以将 TL1431-SP 的 2.5V 输出电压衰减至 1.25V。在本示例中，R2 = R3 = 1kΩ 的值可提供所需的衰减，并确保这些电阻产生的热噪声与其他噪声源相比微不足道，可以忽略。
- 使用以下公式计算流过电阻器 R2 和 R3 的电流：

$$I_{(R2)} = I_{(R3)} = \frac{V_{REF}}{R2 + R3} = \frac{2.5\text{ V}}{1\text{ k}\Omega + 1\text{ k}\Omega} = 1.25\text{ mA}$$

- 使用以下公式计算 R1 的最大值：

$$R1(\text{max}) = \frac{(V_{CC} - V_{REF})}{I_{(U1)} + I_{(R2)}} = \frac{12\text{ V} - 2.5\text{ V}}{1\text{ mA} + 1.25\text{ mA}} = 4.22\text{ k}\Omega$$

因此，3.9kΩ 电阻值适合 R1。

- 为 R4 和 C1 选择将在所需截止频率处创建极点的值。本应用中选择了大约 150Hz 的截止频率：这一频率值可以在相关频率范围（1kHz 至 10MHz）内提供足够的噪声衰减。运算放大器将补偿 R4 上的压降，所以不要让压降太大。一般情况下，建议确保在最大输出电流下，R4 上的压降小于 1V。

使用以下公式计算在所需的截止频率下需要的 RC 时间常数：

$$R4 \times C1 = \frac{1}{2\pi f_{co}} = \frac{1}{2 \times \pi \times 150\text{ Hz}} = 1.06\text{ ms}$$

代入 R4 = 110Ω，C1 = 10μF，截止频率为 145Hz。

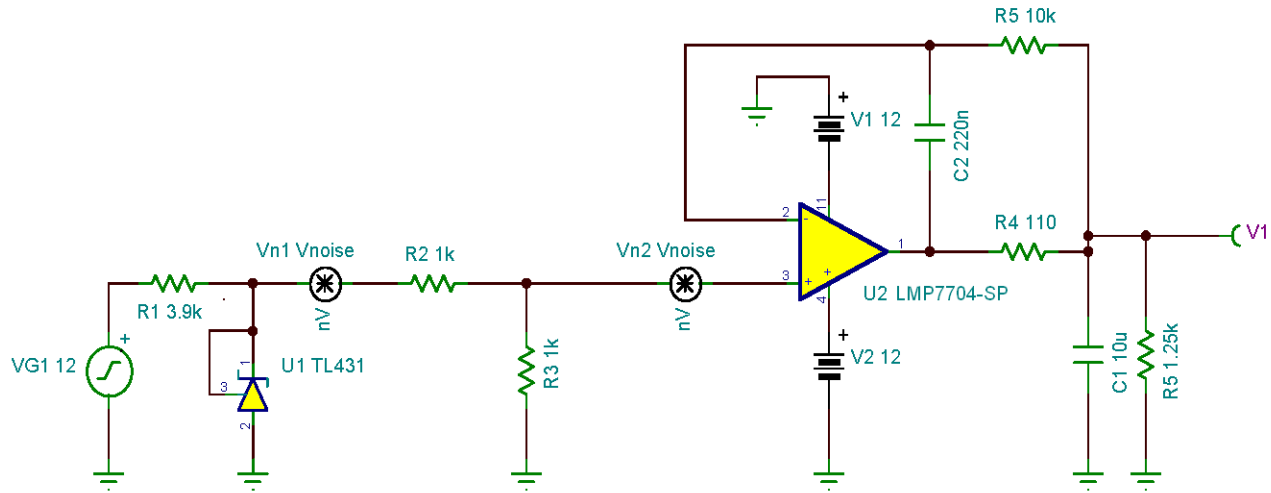
- 为了尽可能减小接近截止频率的噪声增益峰值，请选择 R5 和 C2，以确保：

$$R5 \times C2 = 2 \times R4 \times C1 = 2 \times 110\ \Omega \times 10\ \mu\text{F} = 2.2\text{ ms}$$

设计仿真

仿真设置

分析此类电路的噪声性能的最简单方法是使用 TINA 等仿真程序。



TL431 和 LMP7704 的 SPICE 宏 (包含在标准 TINA 库中)¹ 不包含噪声性能模型, 因此仿真电路中必须包含单独的电压噪声源 (请参阅前面 TINA 原理图中的 Vn1 和 Vn2)。可以在[此 E2E™ 主题](#)引用的 Vnoise.TSC 文件中复制噪声源的宏并进行编辑, 输入三个描述器件噪声特性的参数 (在以下宏摘录中以粗体突出显示)。

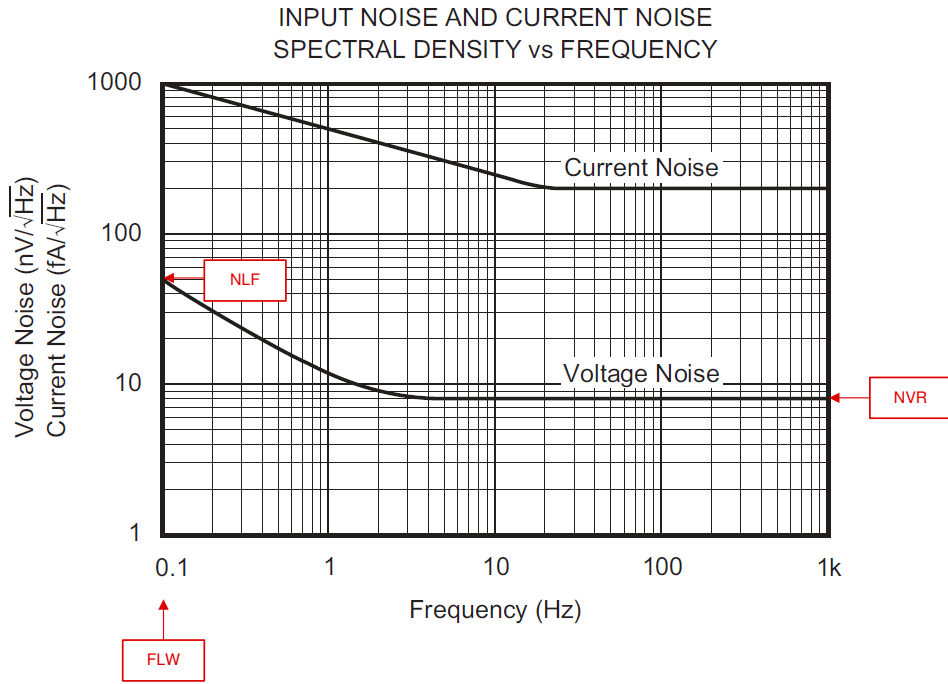
```

* BEGIN PROG NSE NANO VOLT/RT-HZ
.SUBCKT VNSE 1 2
* BEGIN SETUP OF NOISE GEN - NANO VOLT/RT-HZ
* INPUT THREE VARIABLES
* SET UP VNSE 1/F
* NV/RHZ AT 1/F FREQ
.PARAM NLF=225
* FREQ FOR 1/F VAL
.PARAM FLW=10
* SET UP VNSE FB
* NV/RHZ FLATBAND
.PARAM NVR=125
* END USER INPUT
* START CALC VALS
.PARAM GLF={PWR(FLW,0.25)*NLF/1164}
.PARAM RNV={1.184*PWR(NVR,2)}
.MODEL DVN D KF={PWR(FLW,0.5)/1E11}IS=1.0E-16
* END CALC VALS
I1 0 7 10E-3
I2 0 8 10E-3
D1 7 0 DVN
D2 8 0 DVN
E1 3 6 7 8 {GLF}
R1 3 0 1E9
R2 3 0 1E9
R3 3 6 1E9
E2 6 4 5 0 10
R4 5 0 {RNV}
R5 5 0 {RNV}
R6 3 4 1E9
R7 4 0 1E9
E3 1 2 3 4 1
C1 1 0 1E-15
C2 2 0 1E-15
C3 1 2 1E-15
  
```

¹ LMP7704 的更新型号包含噪声源。该模型现在已上传到 ti.com 上的产品文件夹。使用 SPICE 模型评估电路性能时, 请注意确定模型包含和包含哪些参数。

```
.ENDS
* END PROG NSE NANOV/RT-HZ
```

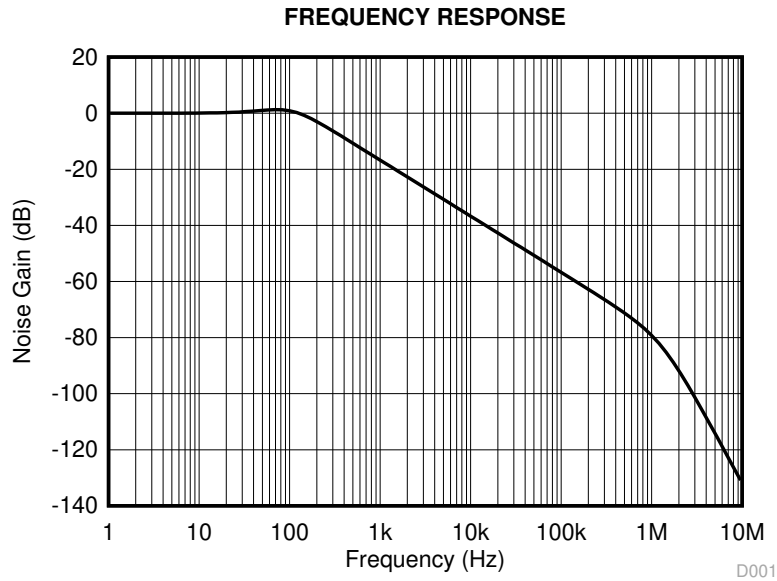
NLF 是曲线在最小频率下与 y 轴相交处的噪声幅度，而 FLW 是发生这种情况的频率。NVR 是宽带噪声的幅度。很容易从器件的数据表中获取这些参数（请参阅下图）。在宏中输入的所有值都必须以 nV/\sqrt{Hz} 为单位。



仿真结果

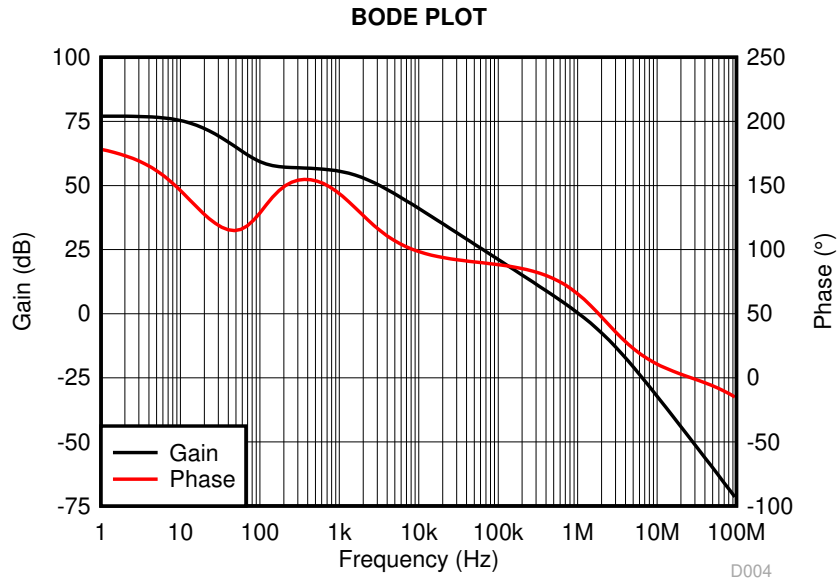
运算放大器频率响应

下图显示了运算放大器电路的整体频率响应，可以看出，截止频率处的增益峰值可以忽略不计。



运算放大器稳定性

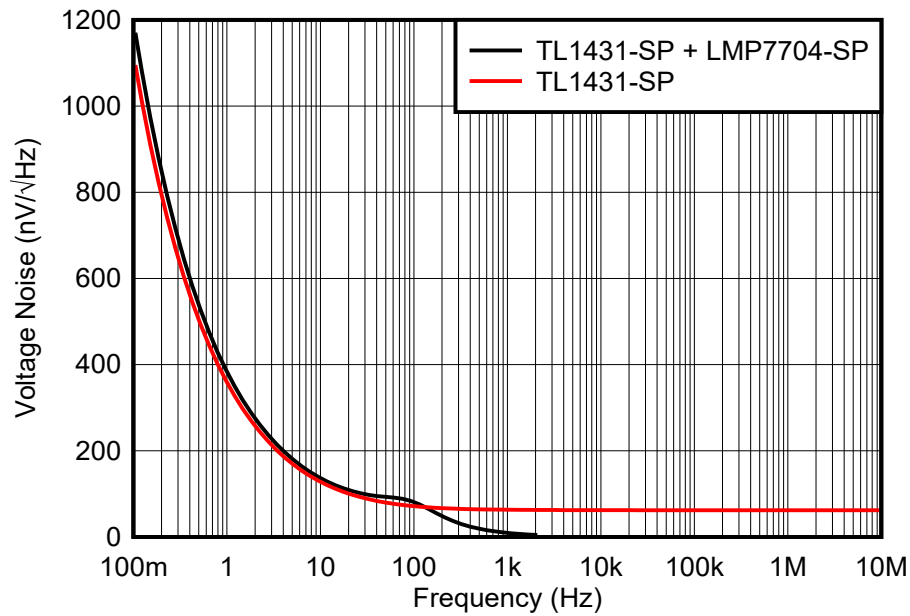
下图显示了运算放大器电路的波特图。相位裕度为 64° ，增益裕度为 49dB。



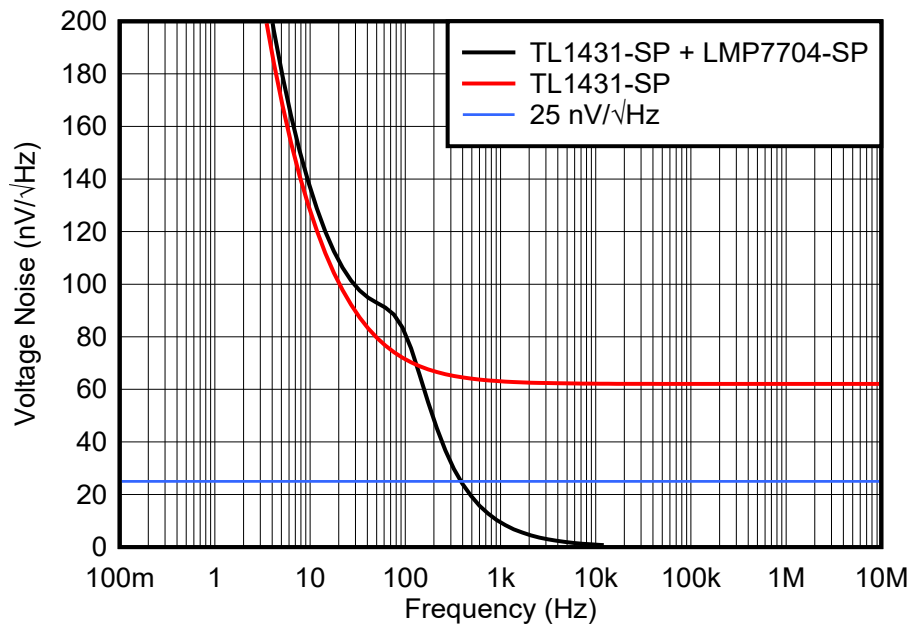
噪声性能

以下各图显示了完整电路在正常标度和扩展标度下的噪声性能。这些图表明，在 1kHz 至 10MHz 的频率范围内，噪声性能超出了 25nV/√Hz 的设计要求限值。

NOISE PERFORMANCE



NOISE PERFORMANCE – EXPANDED SCALE



设计参考资料

请参阅 [TINA/Spice : 噪声发生器 E2E™](#) 主题，以了解更多信息。

设计特色运算放大器

LMP7704-SP	
电源电压范围	2.7 V 至 12 V
失调电压	±60 μV (最大值)
开环增益	130dB
静态电流	2.9 μA/放大器 (典型值)
输入偏置电流	±500fA
输入电压噪声密度	9nV/√Hz (典型值)
输入电流噪声密度	1fA/√Hz (典型值)
电离辐射总剂量	100krad(Si)
单粒子闩锁抗扰度	85 MeV-cm ² /mg
LMP7704-SP	

设计中采用的电压基准

TL1431-SP	
输出电压范围	2.5 V 至 36 V
灌电流能力	1 mA 至 100mA
初始电压精度	- 1%/+1.6% (25°C)
基准输入偏置电流	1.5 μA (典型值, 25°C)
输出阻抗	0.2 Ω (典型值, 25°C)
电离辐射总剂量	100krad(Si)
单粒子闩锁抗扰度	不适用 (双极工艺)
TL1431-SP	

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司