

Analog Engineer's Circuit

采用固定截止频率的单端 ADC 输入的抗混叠滤波器电路设计



Manuel Chavez

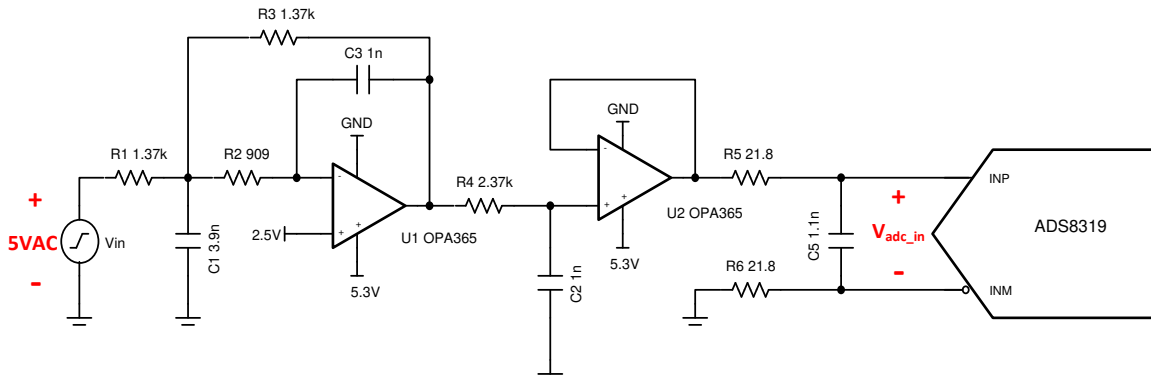
输入	ADC 输入	数字输出 ADS8319
V_{in} 最小值 = 0.1V	$V_{adc_in} = 4.9V$	FAE1 _H 或 64225 ₁₀
$V_{inMax} = V_{REF} = 4.9V$	$V_{adc_in} = 0.1V$	051F _H 或 1311 ₁₀

电源

V_{cc}	V_{ee}	V_{cm}	V_{REF}	AVDD	DVDD
5.3V	GND (0V)	2.5V	5V	5V	5V

设计说明

本详细手册旨在展示一种使用抗混叠滤波器设计器在 TI 的 [模拟工程师计算器](#) 上设计单端 SAR ADC 输入抗混叠滤波器的方法。该工具的目标是确定滤波器规格，以便将混叠信号衰减到给定 ADC 的 LSB 半数值。该设计方案采用固定截止频率，示例电路采用的是 ADS8319 ADC。此单端器件电路适用于低功耗应用，例如 [数据采集](#)、[实验室仪表](#)、[示波器和数字转换器](#)、[模拟输入模块](#) 和电池供电设备。



规格

规格	计算值/目标值	仿真值
将奈奎斯特频率下的 1mV 混叠信号衰减至 1/2 LSB $V_{in_Nyquist} = 1mV$ (250kHz)	$V_{out_Nyquist} \leq 1/2 \text{ LSB}$ $1/2 \text{ LSB} = 38.14\mu V$ (250kHz)	$V_{out_Nyquist} = 21\mu V$ 衰减 = -33.43dB
瞬态 ADC 输入趋稳	< 0.5 LSB 或 38.15 μV	91.5nV
噪声	78.9 μV	87.77 μV
带宽	50kHz	50.1kHz

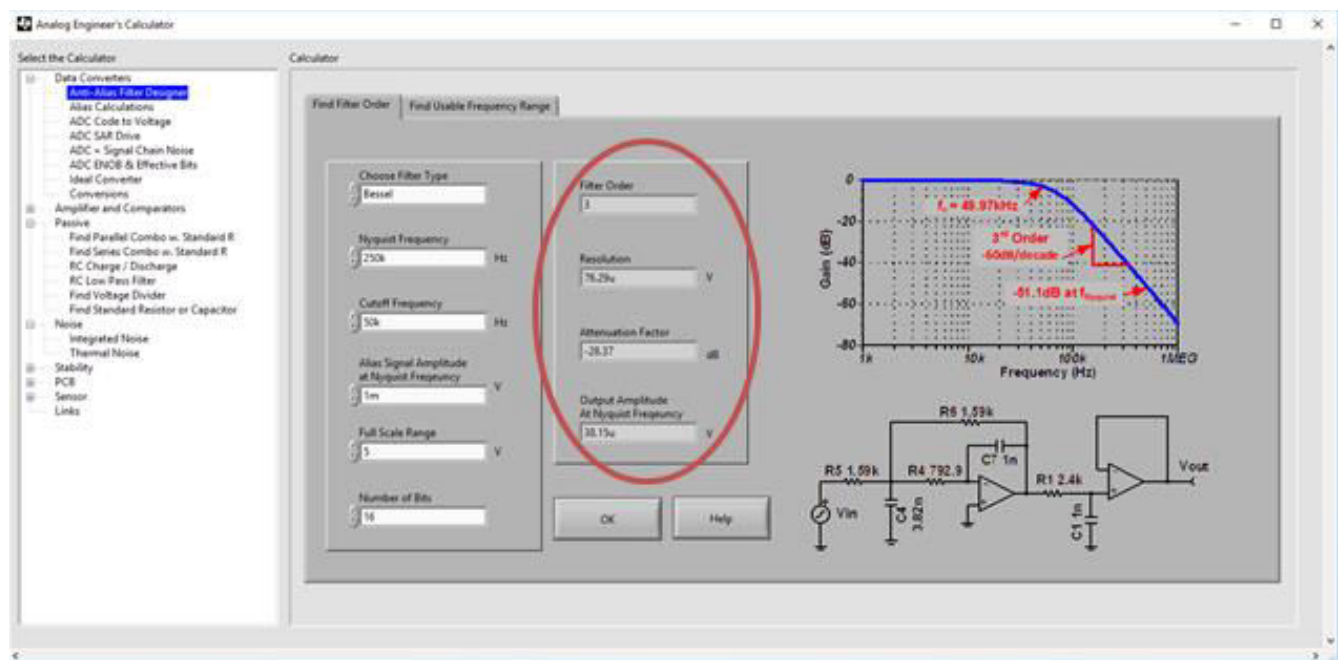
设计说明

- TI 高精度实验室提出了频域混叠的概念，并解释说明了混叠造成了误差源的产生，需要加以避免或降低。[混叠和抗混叠滤波器](#) 视频介绍了如何使用抗混叠滤波器尽可能减少这些混叠错误。
- 本指导手册中的有源滤波器使用 TI 的 [模拟工程师计算器](#) 和 [TI FilterPro](#) 进行设计。该软件可用于设计面向多种应用的有源滤波器电路。
- 使用 0.1-1% 容差的电阻器和 5% 容差的电容器或更高规格的器件来获得良好的系统精度。

4. 每个系统都有专门设计的 RC 电荷桶电路；TI 高精度实验室培训视频 [优化 Rfilt 和 Cfilt 值](#) 介绍了 RC 电荷桶电路的优化方式。
5. 电路仿真采用借助 [TINA-TI](#) 仿真软件制作的原理图和示意图进行建模。
6. 有关如何选择合适的驱动器运算放大器、创建并仿真 ADC 模型，以及确定 RC 电荷桶值的详细信息，请参阅 TI 高精度实验室的视频系列 [SAR ADC 前端元件选择简介](#)。

元件选型

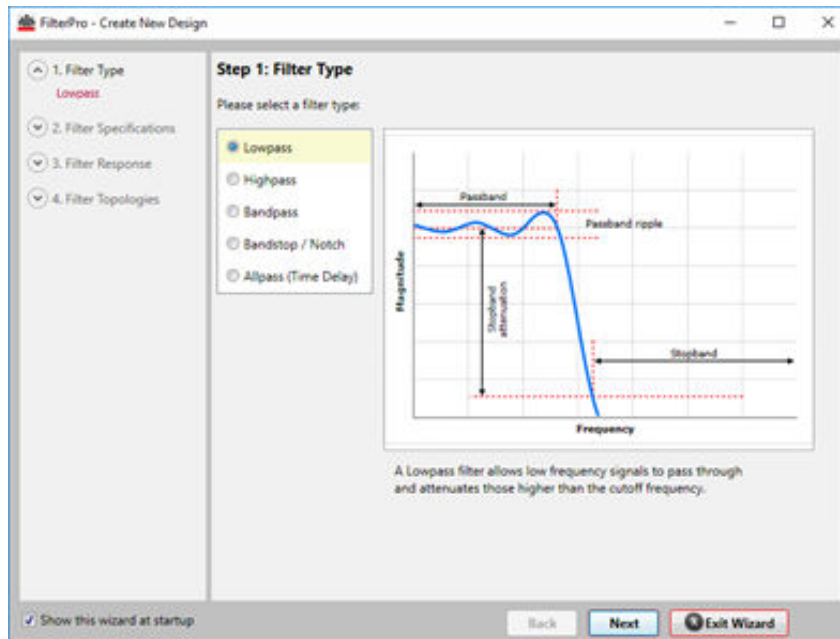
1. 选择单端 ADC 后，确定是利用设定的截止频率还是利用设定的滤波器阶来设计抗混叠滤波器。如果设置了频率，请继续执行以下步骤。如果设置了滤波器阶，请使用模拟工程师计算器中的“Find Usable Frequency Range”选项卡。这两种方法都需要使用来自 [模拟工程师计算器](#) 的工具。
2. 使用 [抗混叠滤波器设计器](#) 中的 [Find Filter Order](#) 选项卡，从 [Choose Filter Type](#) 选项卡下的 Bessel 和 Butterworth 滤波器中选择。此案例中，我们选择了 Bessel 滤波器，以便获得通带宽度以及线性相位响应的最佳平坦度。
3. 填写 [Nyquist Frequency](#)，使其为 ADC 采样速率的 1/2。ADS8319 的采样率为 500ksps，因此，奈奎斯特频率则为 250kHz。
4. 确定待设计滤波器所需截止频率，并将其输入至 [Cutoff Frequency](#) 输入框；一般准则是将截止频率设置为所需输入频率的一个十倍频程。在本例中，输入频率是 5kHz，因此截止频率就应设置为 50kHz。
5. 对于 [Alias Signal Amplitude at Nyquist Frequency](#) 字段，输入衰减至奈奎斯特频率下 1/2 LSB 所需最大混叠信号振幅。该数值的范围介于数微伏到满标量程电压。在该低噪声系统中，预计可得到的最大混频信号振幅为 1mVpp。
6. ADC 的 [满标量程](#) 通常等于 Vref，并已在该系统中被设置为 5V。ADS8319 的位分辨率是 16 位，并被填充至 [Number of Bits](#) 字段。
7. 点击 OK，即可使用计算器右侧显示的结果来设计需要的抗混叠滤波器。



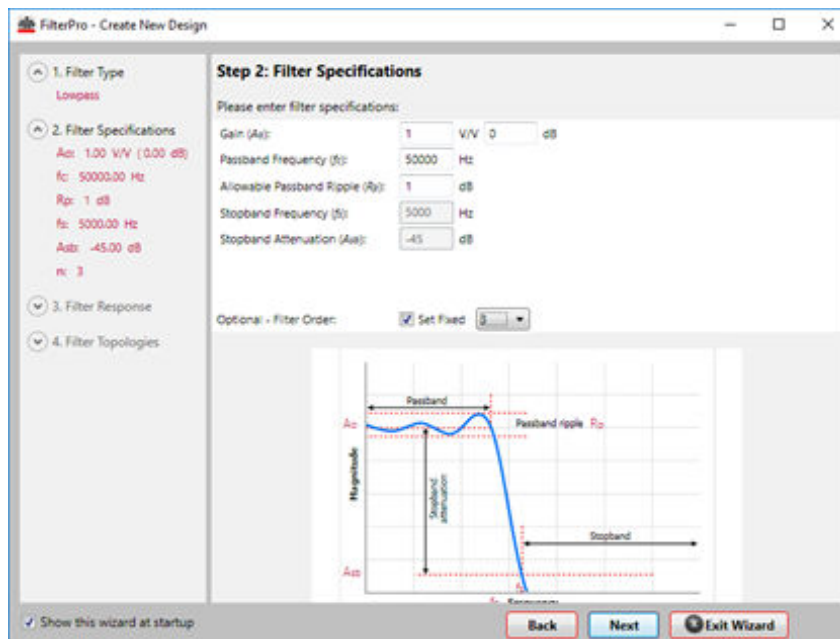
利用得出的滤波器规格，可以将这些数字转录到 [TI FilterPro](#) 来设计低通抗混叠滤波器。在本指导手册中，该电路规格的 $f_{nyquist} = 250k$ ， $f_c = 50k$ ， $V_{alias} = 1mV$ ， $FSR = 5V$ ，以及 N 位数 = 16，因此，继续使用了设计方案 1 中的贝塞耳滤波器示例。

启动时，[TI FilterPro](#) 需要滤波器规格来展开设计工作。在屏幕最后一屏后将会显示一个有源滤波器电路，即为该系统的抗混叠滤波器。有关 [FilterPro](#) 的使用步骤，请参考下面的截屏。

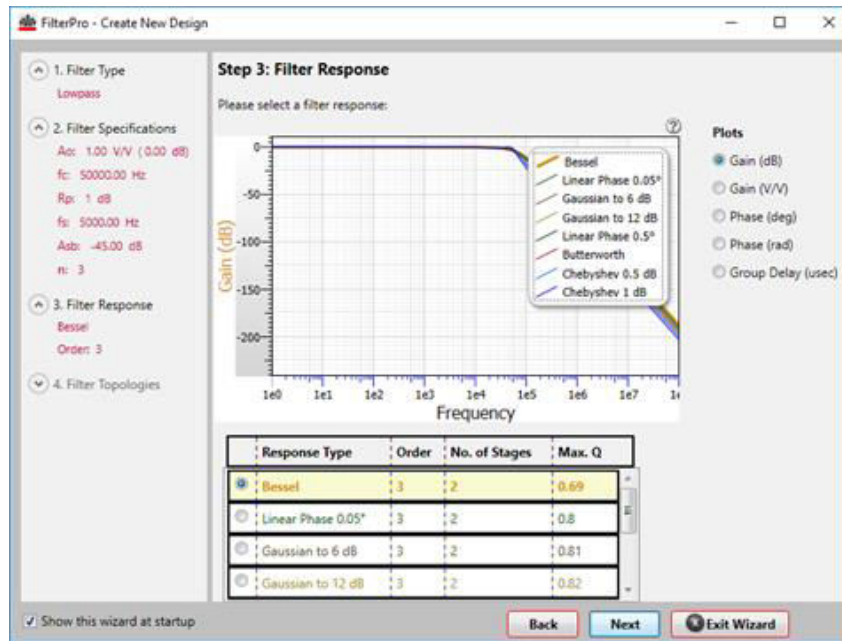
第 1 步，选择 **Lowpass**，因为抗混叠滤波器本身就是一种特殊的低通滤波器。



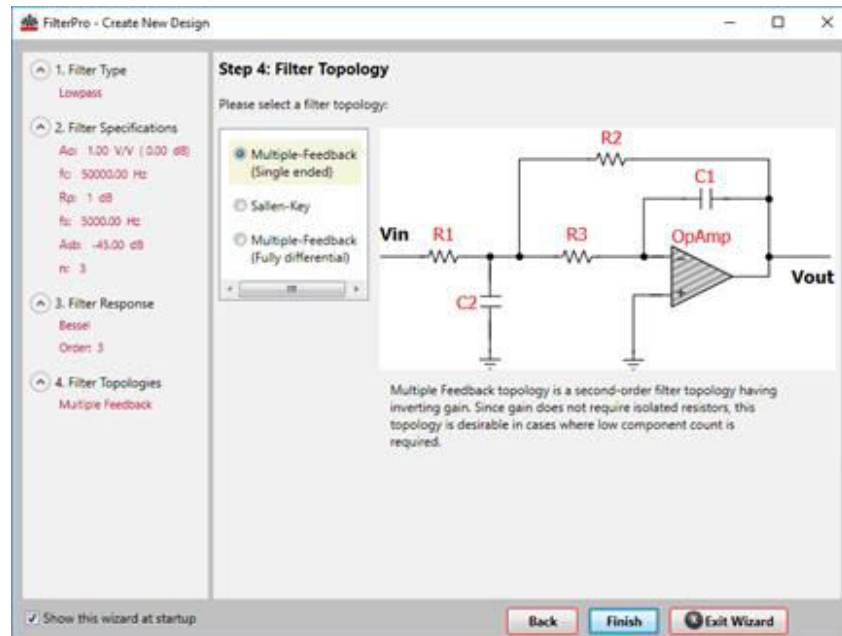
第 2 步，在模拟工程师计算器中填写 *Pass-band Frequency* (f_c) 和滤波器阶的值。必须选择 *Set Fixed* 滤波器阶的选项，以便符合计算出的参数。



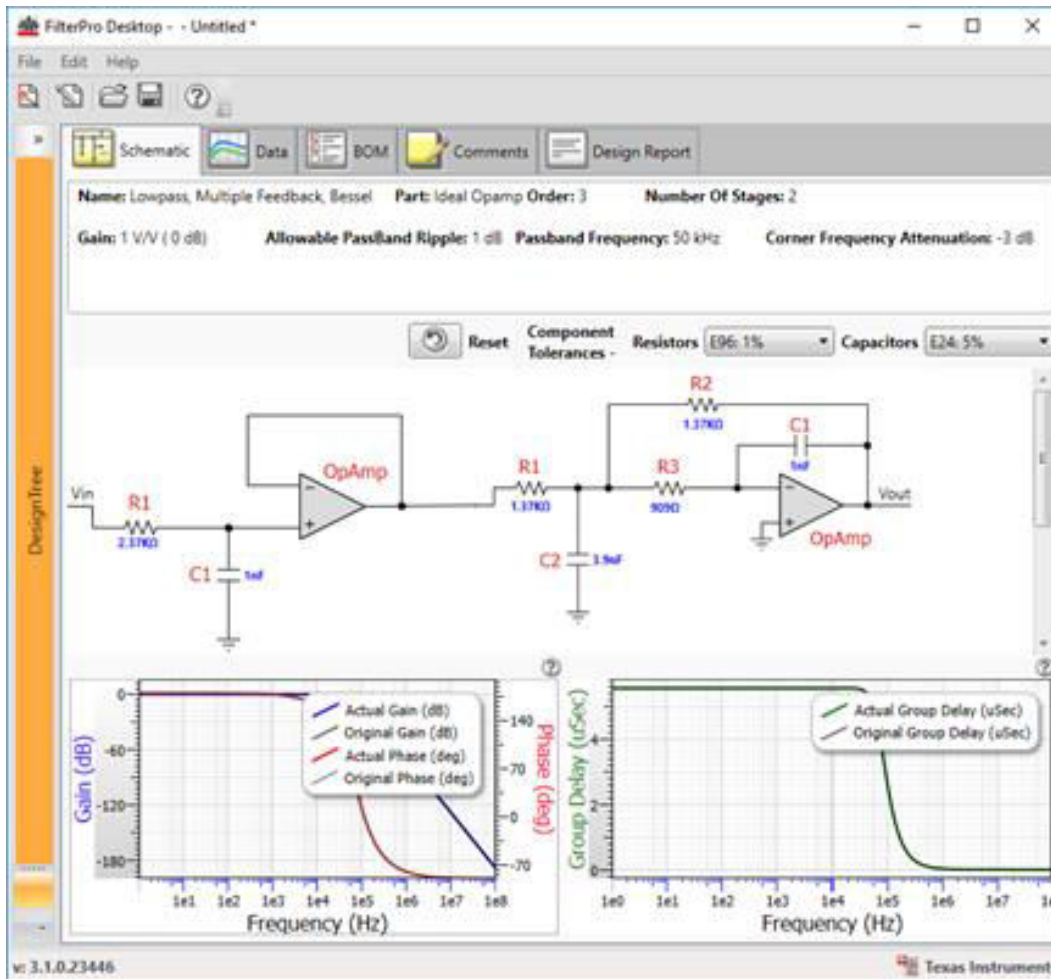
第 3 步，选择滤波器类型，以匹配计算的数值；在此示例中，我们选择了 *Bessel*，以便获得通带宽度以及线性相位响应的最佳平坦度。



步骤 4 中选择了多反馈拓扑，因为滤波器衰减不受运算放大器带宽的限制。这种拓扑结构的缺点是，可以使信号反相，但提供较低的输入阻抗。还可以选择 **Sallen-Key**，因为虽然它是一个具有高输入阻抗的同相拓扑，但是在较高的频率下，由于运算放大器的带宽限制，滤波器的衰减会收敛，甚至上升。



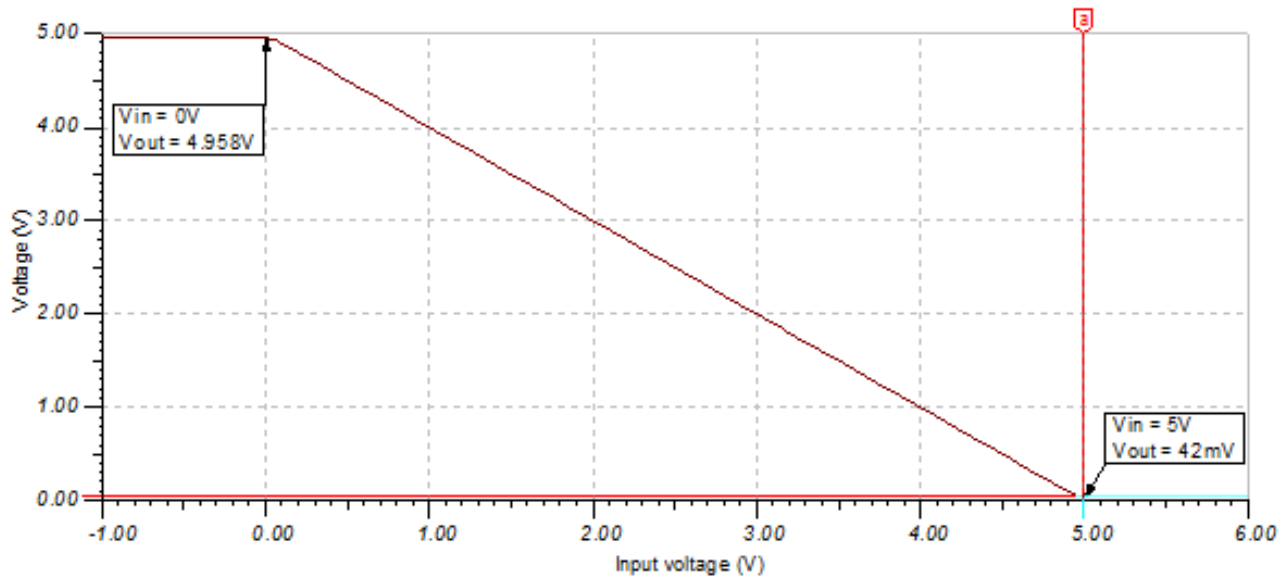
点击 **Finish** 后，将显示滤波器原理图以及所设计滤波器的性能规格。分量容差可以使用右侧下拉菜单进行调整；根据实际情况考虑，我们在此将电阻器的容差选择为 **1%**，电容器为 **5%**。点击数字并输入新的值即可修改相应的分量值。



上文所示的电路可以在 TINA-TI 中进行仿真设计。性能特征将在后续部分介绍。

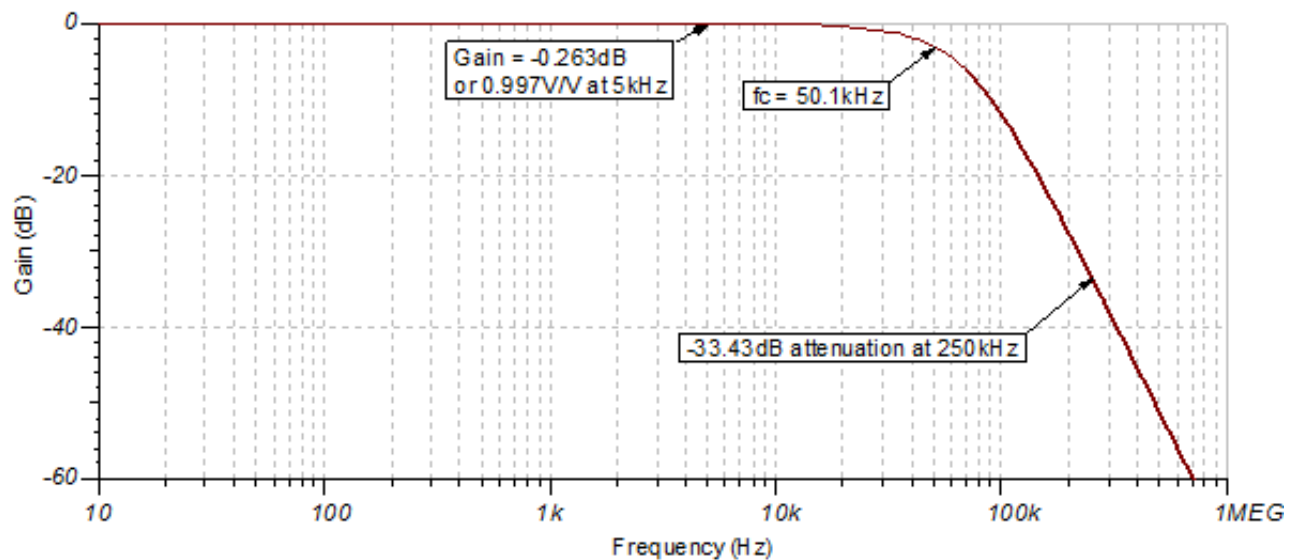
直流传输特性

下图显示了 0V 至 5V 电压范围内，滤波器输入的线性输出响应情况。由于滤波放大器为反相配置，输出电压与输入电压的函数关系为 $V_{out} = -V_{in} + 5V$ 。



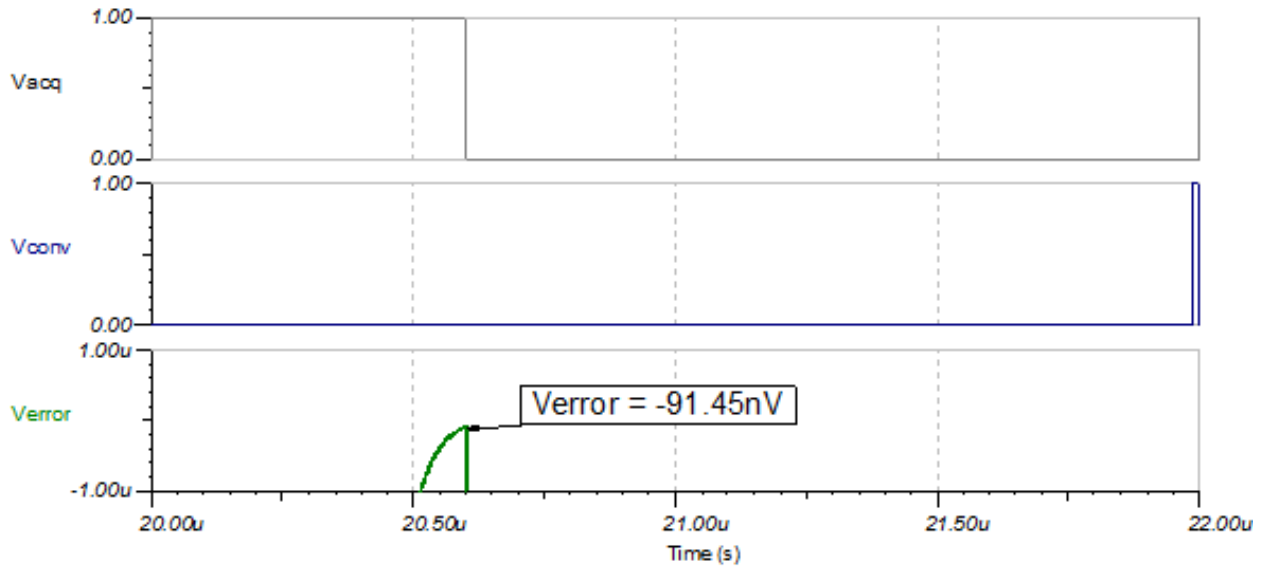
交流传输特性

带宽被仿真为 50.1kHz，与模拟工程师计算器中输入的期望值大约相差 100Hz。在奈奎斯特频率下，信号衰减了 -33.43dB，这样，输入混叠信号的振幅就会下降至 $21.3\mu V$ 。请参阅 TI 高精度实验室 [运算放大器：带宽 1](#)，了解有关此主题的更多详细信息。



瞬态 ADC 输入稳定仿真

下面的仿真图显示了数据采集期间，频率为 5kHz 条件下，ADS8319 趋稳至 5Vpp 交流信号的情况。这种类型的仿真表明，RC 电荷桶分量选择正确。请参阅 TI 高精度实验室培训视频 [优化 Rfilt 和 Cfilt 值](#)，了解有关此主题的详细理论。

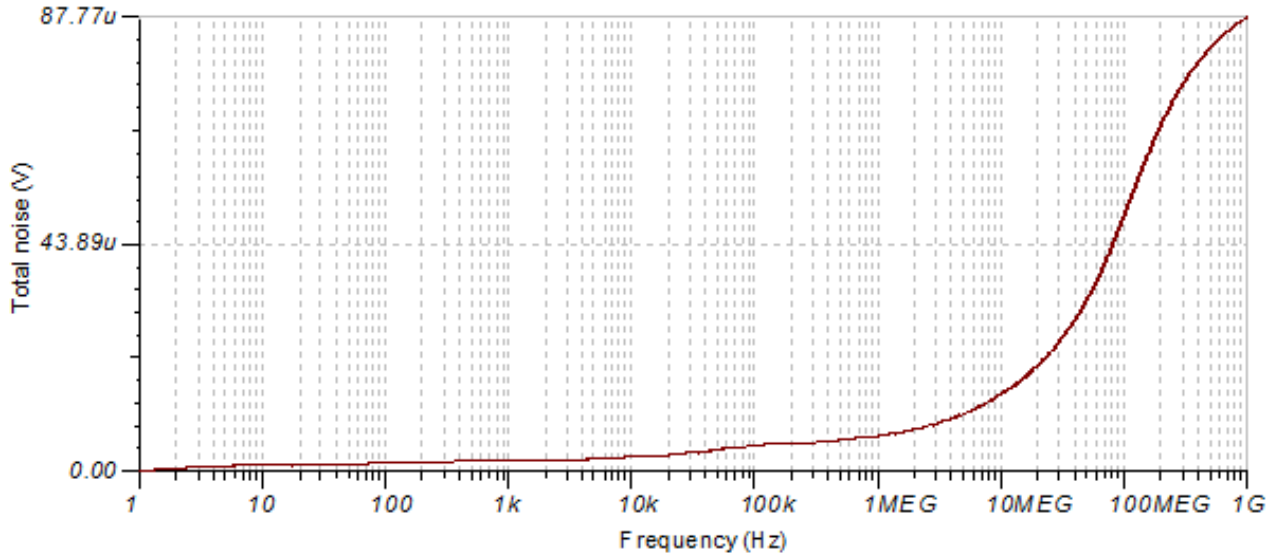


噪声仿真

我们在此使用简化的噪声计算方法对噪声进行粗略估算。我们在计算中忽略了来自抗混叠滤波器的噪声，因为在频率大于 50kHz 的情况下此噪声会有所衰减。

$$E_{nOPA365} = e_{nOPA365} \cdot G_{OPA} \sqrt{K_n \cdot f_c} = (7.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}) \cdot 1\text{V}/\text{V} \sqrt{1.57 \cdot 50\text{MHz}} = 63.8 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

$e_{nOPA365}$ 的值取自数据表噪声曲线。注意，噪声的计算值与仿真值之间匹配良好。噪声仿真值和计算值之间存在一定差异的原因在于 OPA365 模型的带宽不准确。请参阅 TI 高精度实验室 [ADC 系统总噪声计算](#)，了解有关噪声计算的详细理论。



设计中采用的器件

器件	主要特性	链路	类似器件
ADS8319	16 位、500ks、串口、低功耗、微型、SAR ADC	具有 SPI 的精密 16 位 SAR 模数转换器 (ADC)	模数转换器 (ADC)
OPA365	50Mhz、零交叉、低失真、高 CMRR、RRIO、单电源运算放大器	2.2V、50MHz 低噪声单电源轨到轨运算放大器	运算放大器

主要文件链接

德州仪器 (TI), [SBAC197 源文件](#), 支持软件

修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (March 2019) to Revision B (September 2024)	Page
• 通篇更新了表格、图和交叉参考的格式.....	1

Changes from Revision * (March 2018) to Revision A (March 2019)	Page
• 缩短了标题并将标题角色更改为“数据转换器”添加了指向电路指导手册登录页面的链接.....	1

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司