

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

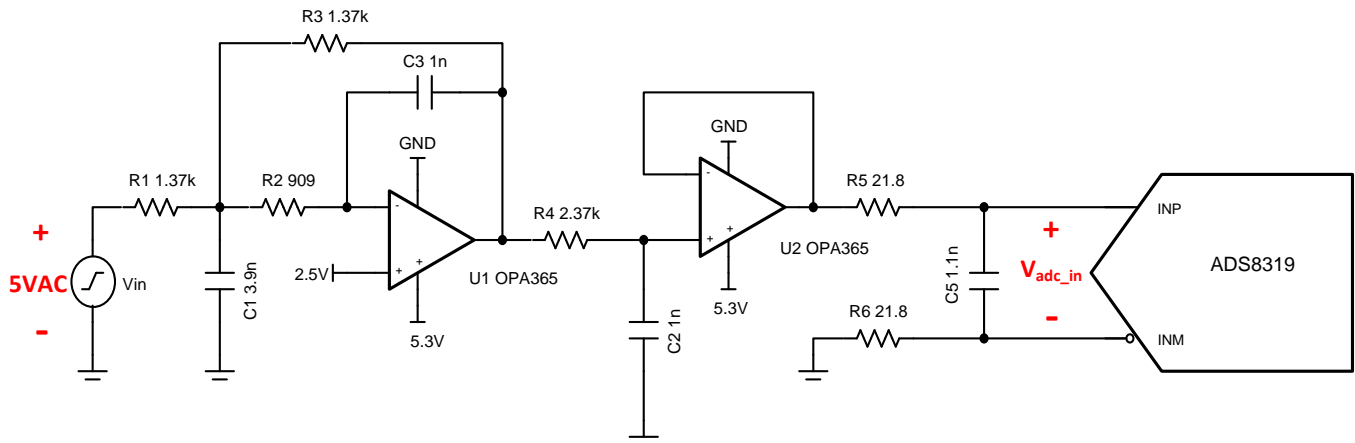
Manuel Chavez

| 输入 | ADC 输入 | 数字输出 ADS8319 |
|---|------------------------------------|---|
| $V_{in} \text{ Min} = -0.1\text{V}$ | $V_{\text{adc_in}} = 4.9\text{V}$ | FAE1 _H 或 64225 ₁₀ |
| $V_{in} \text{ Max} = V_{\text{REF}} = 4.9\text{V}$ | $V_{\text{adc_in}} = 0.1\text{V}$ | 051F _H 或 1311 ₁₀ |

| 电源 | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------|------|
| V_{CC} | V_{EE} | V_{CM} | V_{REF} | AVDD | DVDD |
| 5.3V | 接地 (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](#) 上来设计单端 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。这种单端设备电路适用于低功耗应用，如 [数据采集](#)、[实验室仪表](#)、[示波器](#)、[模拟输入模块](#) 和电池供电设备。



规格

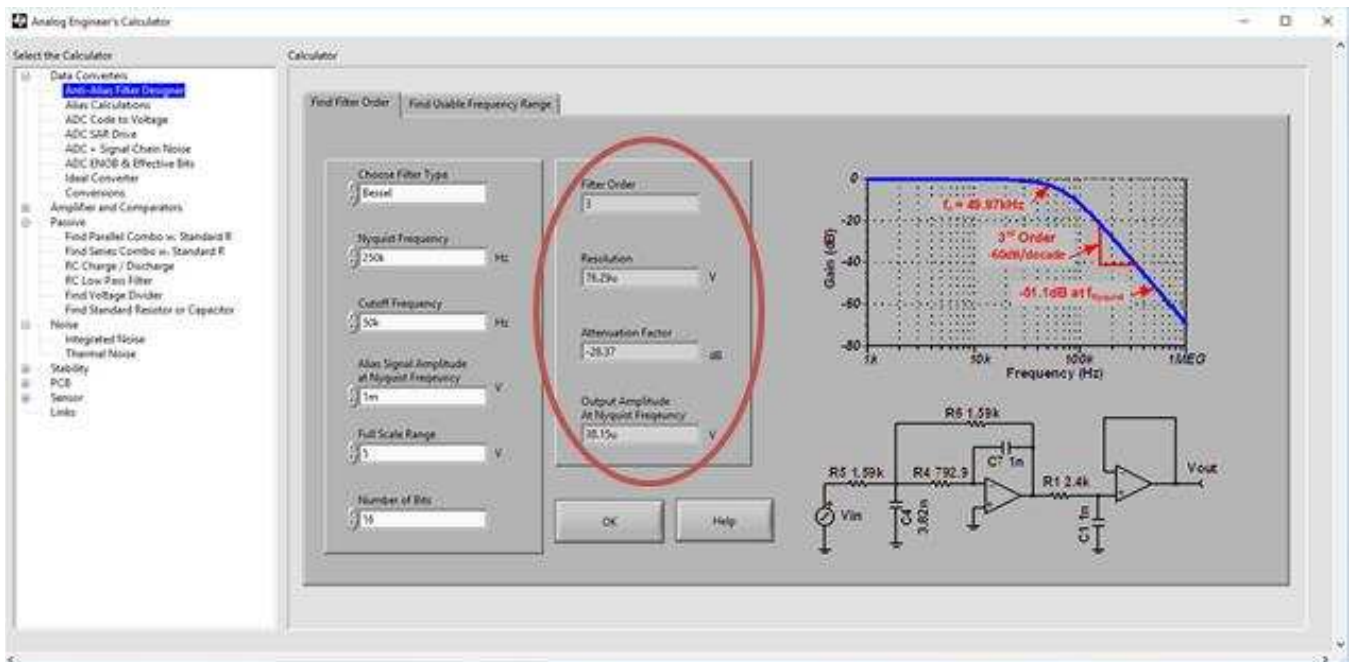
| 规格 | 计算值/目标值 | 仿真值 |
|---|---|---|
| 将奈奎斯特频率下的 1mV 混叠信号衰减至 ½ LSB $V_{in_Nyquist} = 1\text{mV} (250\text{kHz})$ | $V_{out_Nyquist} \leq \frac{1}{2} \text{LSB}$ $\frac{1}{2} \text{LSB} = 38.14\mu\text{V} (250\text{kHz})$ | $V_{out_Nyquist} = 21\mu\text{V}$ 衰减 = -33.43dB |
| 瞬态 ADC 输入趋稳 | < 0.5 LSB 或 38.15μV | 91.5nV |
| 噪声 | 78.9μV | 87.77μV |
| 带宽 | 50kHz | 50.1kHz |

设计说明

1. 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将这些混叠错误将至最低水平。
2. 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（点击下载）。该软件可用于设计面向多种应用中的环流的有源滤波器电路。
3. 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（点击下载）。
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 前端分量选取介绍](#)。

分量选取

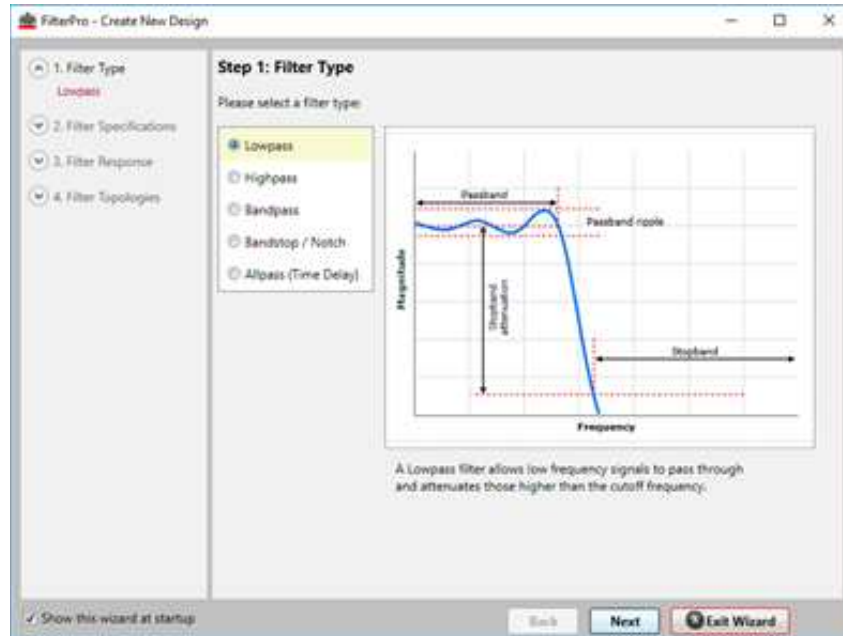
1. 选择单端 ADC 后，确定是利用设定的截止频率还是利用设定的滤波器阶来设计抗混叠滤波器。如果设置了频率，请继续执行以下步骤。如果设置了滤波器阶，请使用模拟工程师计算器中的“查找可用频率范围”选项卡。这两种方法都需要使用来自 [模拟工程师计算器](#) 的工具。
2. 使用抗混叠滤波器设计器中的查找滤波器阶选项卡，从选择滤波器类型选项卡下的贝塞耳和巴特沃斯滤波器中选择。此案例中，我们选择了贝塞耳滤波器，以便获得通带宽度以及线性相位响应的最佳平坦度。
3. 填写奈奎斯特频率，使其为 ADC 采样速率的 1/2。ADS8319 的采样率为 500kps，因此，奈奎斯特频率则为 250kHz。
4. 确定待设计滤波器所需截止频率，并将其输入至截止频率输入框；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. 对于奈奎斯特频率下的混叠信号振幅字段，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。该数值的范围可介于数微伏到全量程电压。在该低噪声系统中，预计可得到的最大混叠信号振幅为 1mVpp。
6. ADC 的满量程通常等于 Vref，并已在该系统被设置为 5V。ADS8319 的位分辨率是 16 位，并被填充至位数字段。
7. 单击 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。



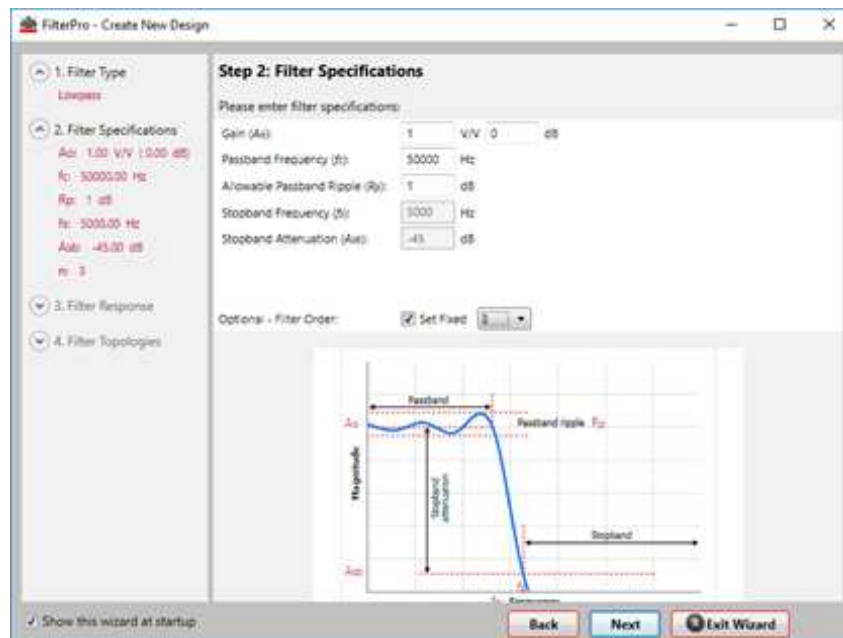
利用得出的滤波器规格，可以将这些数字转录到 [TI FilterPro](#) 来设计低通抗混叠滤波器。在本指导手册中，该电路规格的 $f_{\text{nyquist}} = 250\text{k}$ ， $f_c = 50\text{k}$ ， $V_{\text{alias}} = 1\text{mV}$ ，FSR = 5V，以及 N 位数 = 16，因此，继续使用了设计方案 1 中的贝塞耳滤波器示例。

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。

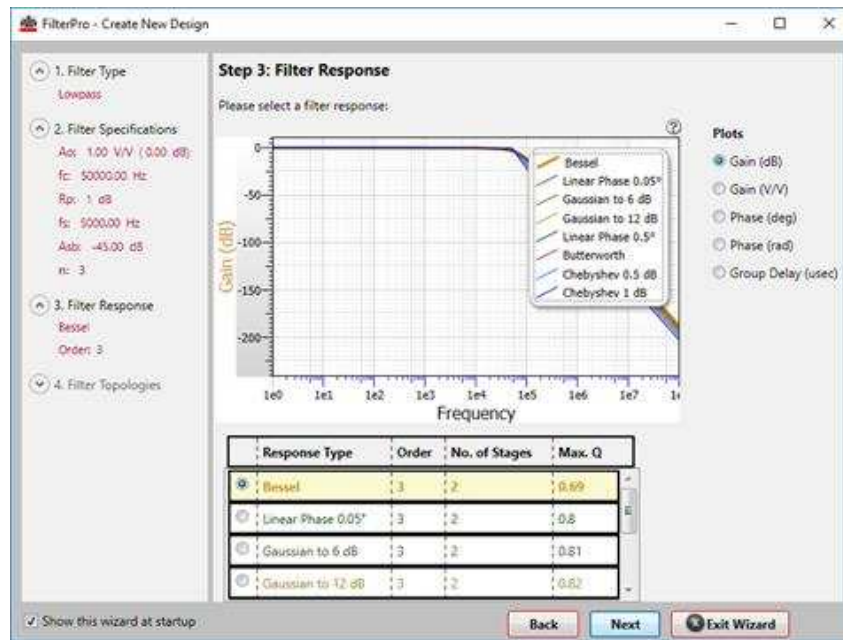
第 1 步，选择低通，因为抗混叠滤波器本身就是一种特殊的低通滤波器。



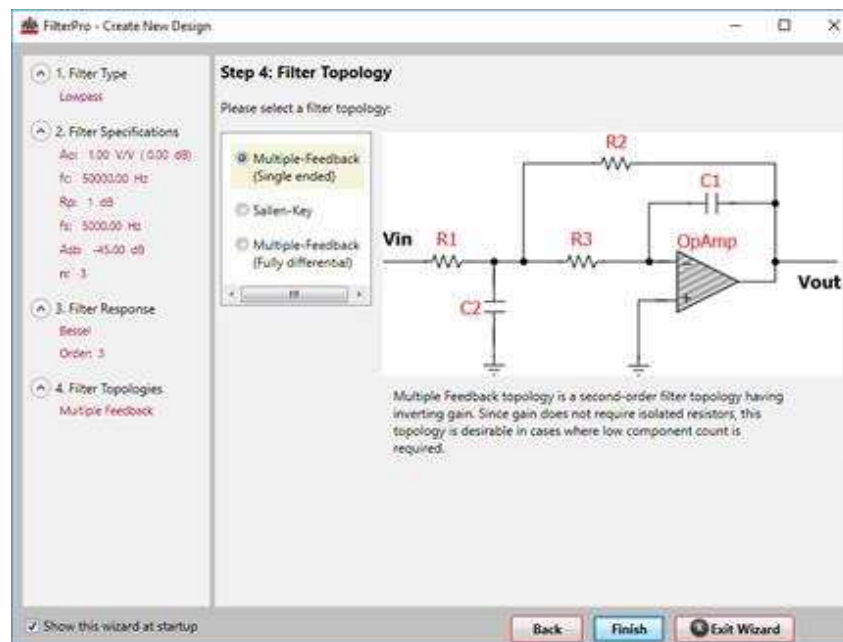
第 2 步，在模拟工程师计算器中填写通带频率 (f_p) 和滤波器阶的值。必须选择设置固定滤波器阶的选项，以便符合计算出的参数。



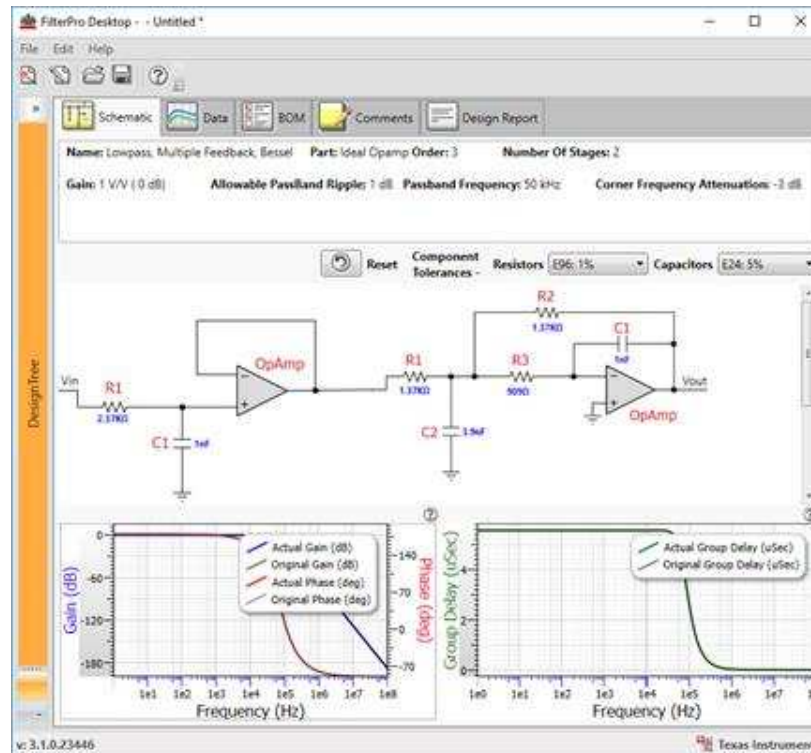
第 3 步，选择滤波器类型，以匹配计算的数值；在此示例中，我们选择了贝塞耳，以便获得通带宽度以及线性相位响应的最佳平坦度。



第 4 步，选择多重反馈拓扑，因为滤波器的衰减不会受到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。*Sallen-Key* 也是可以选择的，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。



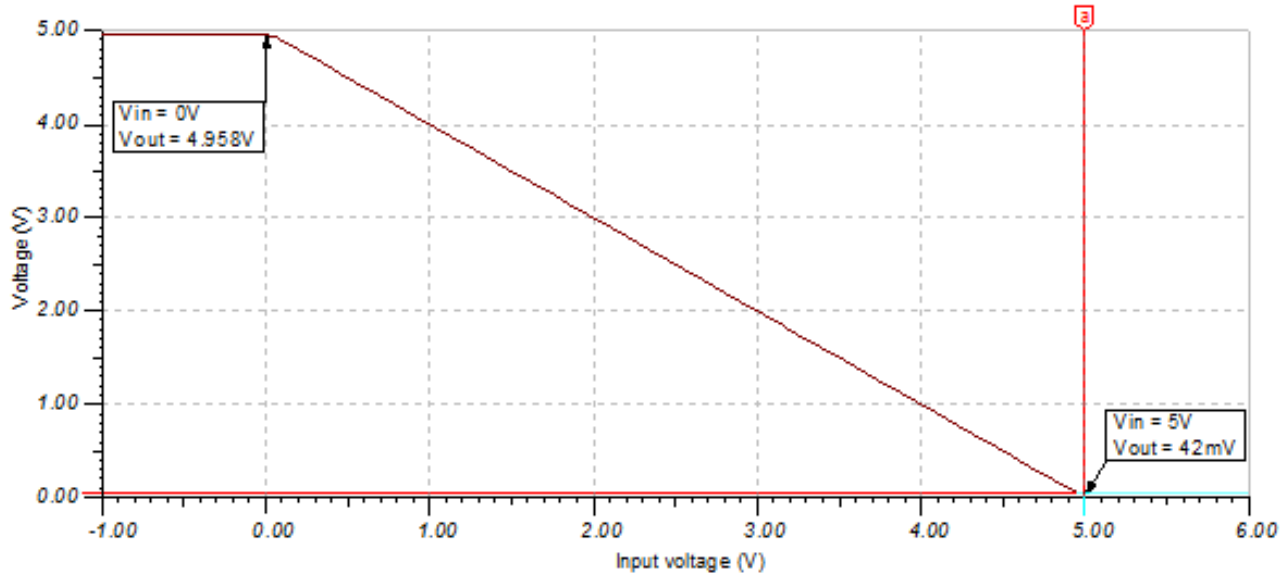
单击完成后，将显示滤波器原理图以及所设计滤波器的性能规格。分量容差可以使用右侧下拉菜单进行调整；根据实际情况考虑，我们在此将电阻器的容差选择为 1%，电容器为 5%。单击数字并输入新的值即可修改相应的分量值。



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。

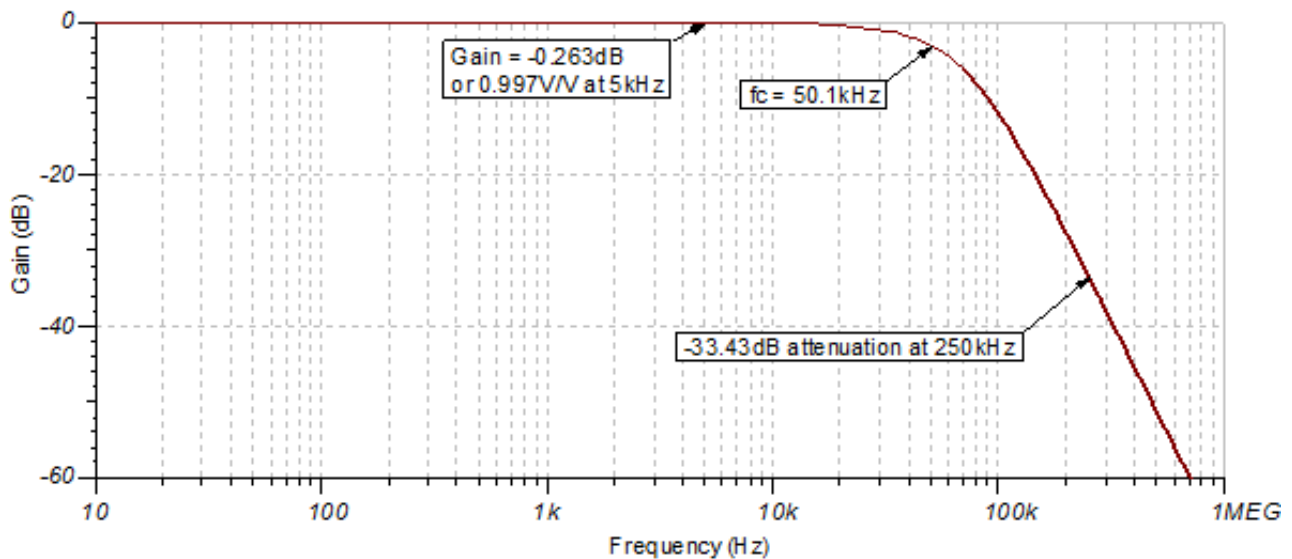
直流传输特性

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 $V_{out} = -V_{in} + 5V$ 。



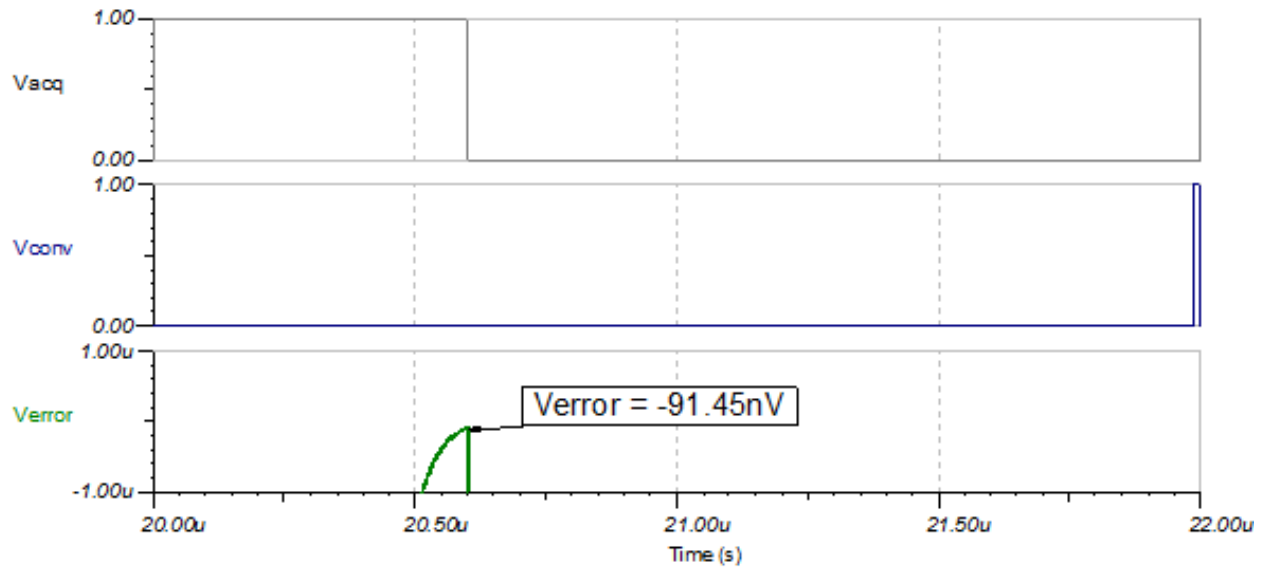
交流传输特性

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 21.3μv。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信息。



瞬态 ADC 输入趋稳仿真

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。

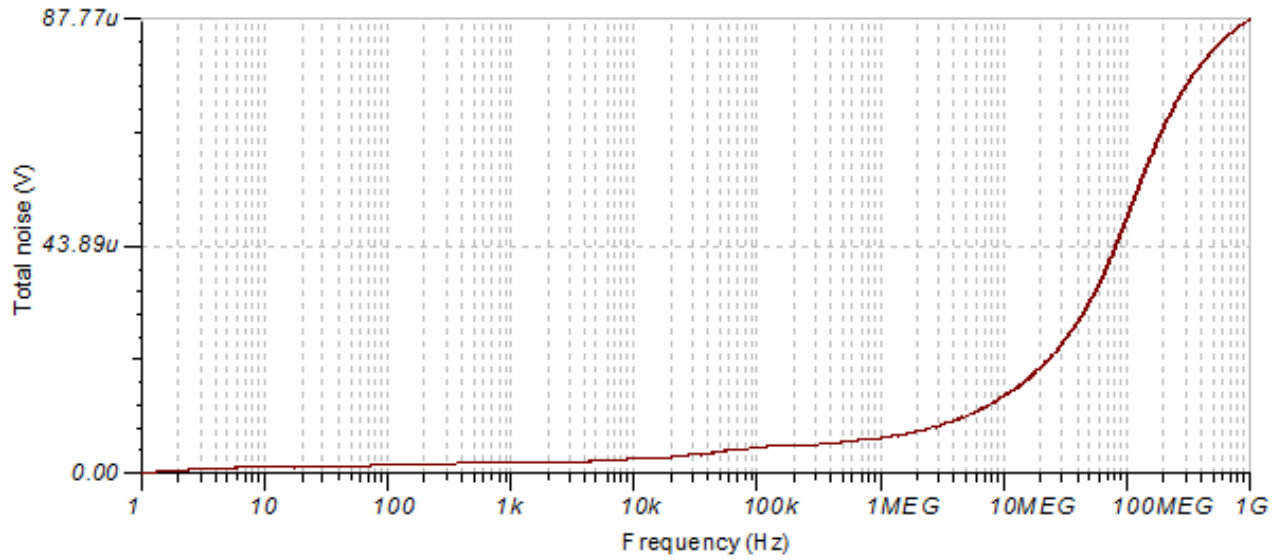


噪声仿真

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。

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

$e_{nOPA365}$ 的值取自产品说明书噪声曲线。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 | 链接 | 类似器件 |
|---|-------------------------------------|--|--|
| ADS8319 | 16-bit, 500-kl,串口, 低功耗, 微型, SAR ADC | www.ti.com.cn/product/cn/ads8319 | www.ti.com.cn/adcs |
| OPA365 | 50MHz、零交叉、低失真、高 CMRR、RRI/O、单电源运算放大器 | www.ti.com.cn/product/cn/opa365 | www.ti.com.cn/opamp |

设计参考资料

请参阅《[模拟工程师电路说明书](#)》，了解有关 TI 综合电路库的信息。

主要文件链接

此设计的源文件 – <http://www.ti.com/lit/zip/sbac197>。

修订历史记录

| 修订版本 | 日期 | 更改 |
|------|------------|---|
| A | 2019 年 3 月 | 缩短了标题并将标题角色更改为“数据转换器”。 添加了电路指导手册登录页面的链接。 |

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司