

## Analog Engineer's Circuit

## 使用高压输入驱动低压单端 SAR ADC 电路



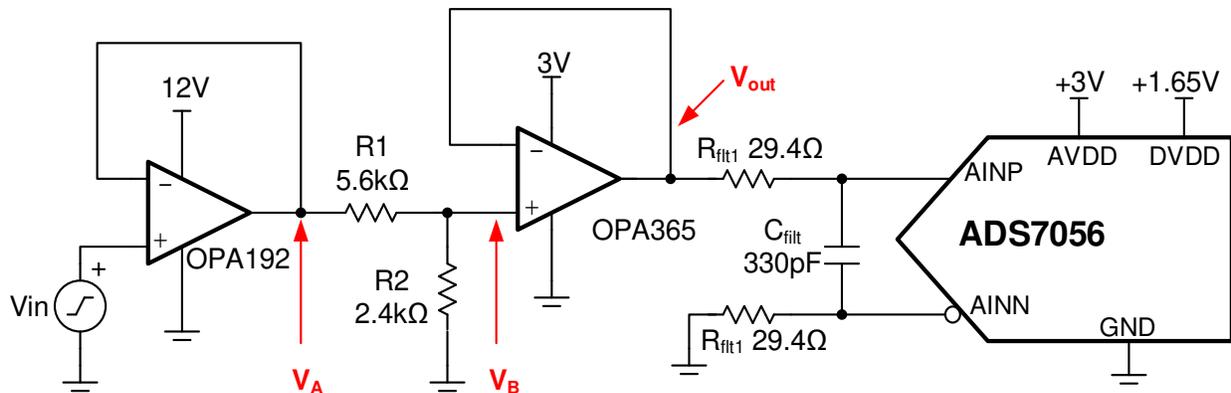
Hasan Babiker

输入	ADC 输入	数字输出 ADS7056
VinMin = 0V	AIN_P = 0V, AIN_M = 0V	000 <sub>H</sub> 或 0 <sub>10</sub>
VinMax = 10V	AIN_P = 3.3V, AIN_M = 0V	FFF <sub>H</sub> 或 4096 <sub>10</sub>

电源		
Vcc	AVDD	DVDD
12V	3V	1.65V

## 设计说明

该设计旨在通过衰减输入信号以匹配满量程范围，从而扩大低功耗 SAR ADC 的输入范围。通过调整元件选型部分的值，可实现放大器的不同输入电压范围和 ADC 的满量程范围。该设计中的输入信号首先由 OPA192 高压精密放大器进行缓冲，用于避免信号源阻抗产生增益误差。然后，OPA192 器件输出端的电阻分压器用于衰减信号，然后信号再次由 OPA365 器件进行缓冲。该宽带放大器支持在 2.5MSPS 的最大采样速率下使用 ADS7056 器件。此电路方案适用于测试和测量、电器和工厂自动化与控制应用。一般来说，此电路可用于电压较高的信号需要与低压单端 ADC 连接的大多数应用。



## 规格

规格	目标值	计算值	仿真值
瞬态 ADC 输入稳定性	$< 0.5 \times \text{LSB} = 91.5\mu\text{V}$		16 $\mu\text{V}$
带宽	$> 5\text{MHz}$	8.09MHz	7.04MHz
噪声	$< 0.5 \times \text{LSB}$	20.85 $\mu\text{V}_{\text{RMS}}$	22.74 $\mu\text{V}_{\text{RMS}}$

## 设计说明

1. 输入放大器 (OPA192) 需要 0V 至 10V 的共模范围。由于负电源接地，因此需要使输入摆幅到负电源轨或使用轨到轨放大器。OPA365 器件具有类似的轨到轨要求。
2. 放大器的输出摆幅限制了接近地电平的可用范围。可使用一个小型负电源 (如 -0.3V) 来提供输出摆幅至地。请参阅 [使用一个 LDO 为双电源运算放大器电路供电](#)，了解用于生成此电源的电路。
3. 为 Cfilt 选择 C0G 电容器，更大限度减少失真。

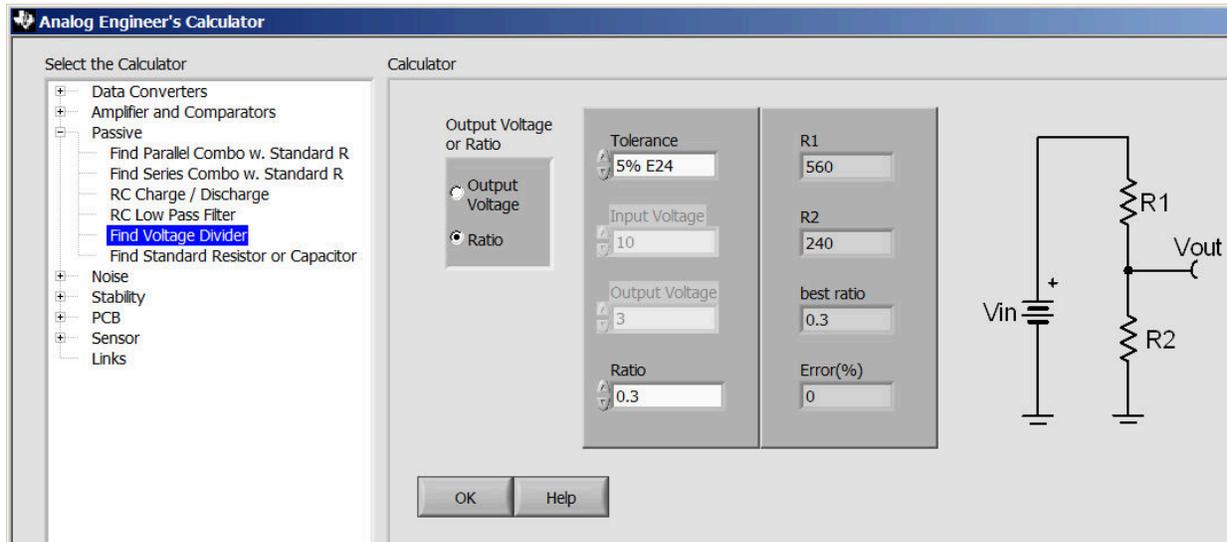
## 元件选型

1. 确定输入缓冲器 OPA192 线性运行的最大和最小输出，然后结合步骤 3 中的增益，计算 OPA192 器件的总线性范围。
  - $(V^-) - 0.1V < V_A < (V^+) + 0.1V$  (来自 OPA192 Vcm 规格)
  - $(V^-) + 0.110V < V_A < (V^+) - 0.110V$  (来自 OPA192 Vout 摆幅规格)
  - $(V^-) + 0.3V < V_A < (V^+) - 0.3V$  (来自 OPA192 Aol 线性区域规格)
  - 综合上述限制，总体范围为  $(V^-) + 0.3V < V_A < (V^+) - 0.3V$
  - 当 OPA192 电源替换为  $(V^-) = 0V$  和  $(V^+) = 12V$  时，限值为  $0.3V < V_A < 11.7V$
2. 根据输入信号和 ADC 满量程输入范围确定增益

$$\text{Gain} = \frac{V_{\text{ADC}(\text{range})}}{V_{\text{in}(\text{range})}} = \frac{3V}{10V} = 0.3V / V$$

3. 确定用于提供增益的分压器标准电阻值。使用 [模拟工程师计算器](#) 查找分压器分压比的标准值。

$$\text{Gain} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2.4k\Omega}{5.6k\Omega + 2.4k\Omega} = 0.3V / V$$



4.  $V_B$  的线性范围包括第一步中的范围乘以增益。因此，范围为： $0.09V < V_B < 3.51V$ 。
5. OPA365 线性运行的最大和最小输出：
  - $(V^-) - 0.1V < V_{\text{out}} < (V^+) + 0.1V$  (来自 OPA365 Vcm 规格)
  - $(V^-) + 0.02V < V_{\text{out}} < (V^+) - 0.02V$  (来自 OPA365 Vout 摆幅规格)
  - $(V^-) + 0.1V < V_{\text{out}} < (V^+) - 0.1V$  (来自 OPA365 Aol 线性区域规格)
  - 结合上述限制，OPA365 的总体范围为  $(V^-) + 0.1V < V_{\text{out}} < (V^+) - 0.1V$
  - 当 OPA365 电源替换为  $(V^-) = 0V$  和  $(V^+) = 3V$  时，限值为  $0.1V < V_A < 2.9V$

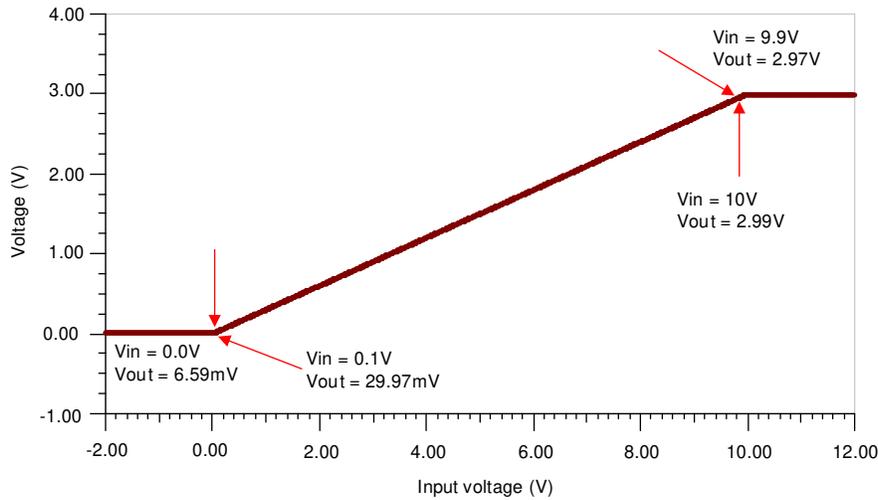
6. 结合 OPA192 和 OPA365 的范围：

- ADC 的线性范围是 OPA192 的  $V_B$  范围 ( 请参阅 [步骤 4](#) ) 和 OPA365 的  $V_{out}$  范围 ( 请参阅 [步骤 5](#) ) 中的最坏情况。
- ADC 范围：  $0.1V < V_{out} \leq 2.9V$

7. 查找可在 2.5MSPS 实现趋稳的  $R_{filt}$  和  $C_{filt}$ 。请参阅“TI 高精度实验室 - ADC”：[优化  \$R\_{filt}\$  和  \$C\_{filt}\$  值](#) 视频，其中介绍了选择  $R_{filt}$  和  $C_{filt}$  的算法。经证实， $29.4\ \Omega$  和  $330pF$  的最终值可确保趋稳至远低于最低有效位 (LSB)  $\frac{1}{2}$  的位置。

**直流传输特性**

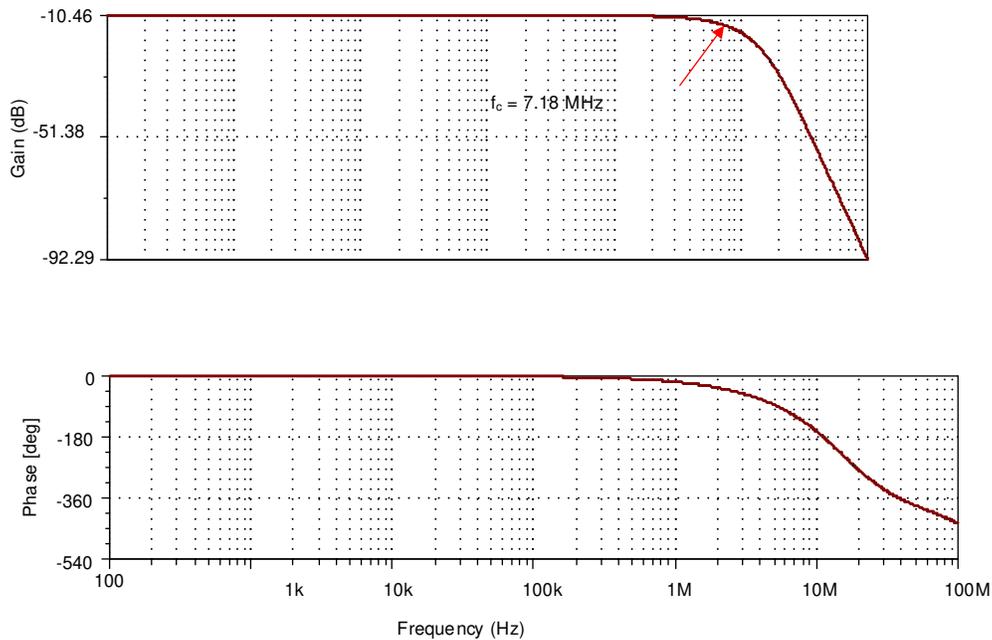
下图展示了 0V 至 10V 输入的线性输出响应。该图显示了性能在接近  $AV_{DD}$  和接地时都有所下降。这是由于 [元件选型](#) 部分中放大器的线性范围所致。为了提高这些极端条件下的性能，可以调整电源，使两个放大器的线性范围都处于 ADC 的满量程范围内。



**交流传输特性**

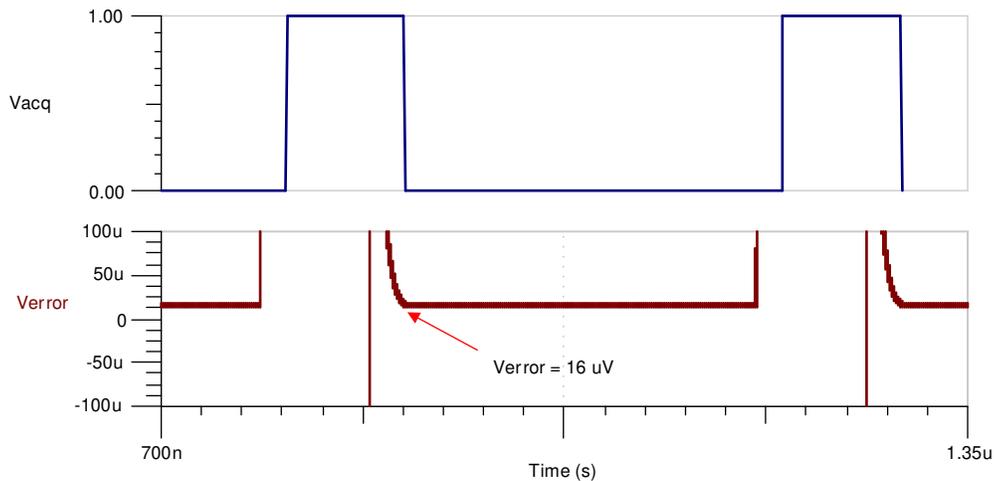
在  $-3dB$  点，模拟的带宽近似为  $7MHz$ 。带宽受限于 OPA192 器件和 RC 电荷桶电路 (  $R_{filt}$  和  $C_{filt}$  )。如以下公式所示，RC 电路的带宽为  $8.2MHz$ 。OPA192 器件具有  $10MHz$  的带宽，这也会影响电路的总体带宽。所选的带宽目标是采样频率的两倍，以便确保能够适当地稳定。

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot (2 \cdot 29.4\ \Omega) \cdot (330\ pF)} = 8.2\ MHz$$



### 瞬态 ADC 输入稳定仿真

以下仿真显示了趋稳至 9V 直流输入信号的情况。这种类型的仿真表明采样保持反冲电路已正确选择到  $\frac{1}{2}$  LSB (91.5 $\mu$ V) 范围内。请参阅 [SAR ADC 前端元件选型简介](#) 视频，了解有关此主题的详细理论。



### 噪声仿真

本部分详细介绍如何使用简化的噪声计算方法进行粗略估算。OPA192 的噪声通过电阻分压器进行衰减，如下所示：

$$e_{n\text{OPA192}} = 5.5 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}} \cdot 0.3 \frac{\text{V}}{\text{V}} = 1.65 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

电阻分压器噪声：

$$e_{\text{ndiv}} = \sqrt{4kTR} = \sqrt{4 \cdot (1.381 \cdot 10^{-23}) \cdot (273 + 25) \cdot 1.68 \text{ k}\Omega} = 5.259 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

OPA365 噪声密度：

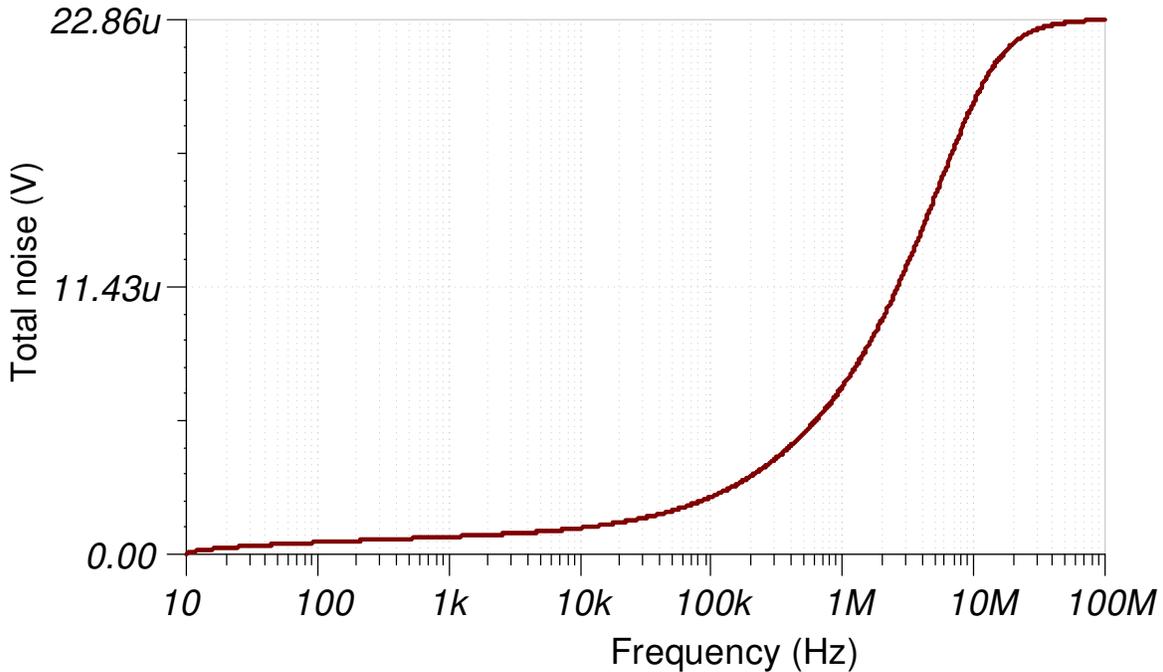
$$e_{n\text{OPA365}} = 4.5 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

总噪声：

$$e_{n\text{TOT}} = \sqrt{e_{n\text{OPA192}}^2 + e_{n\text{div}}^2 + e_{n\text{OPA365}}^2} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c}$$

$$e_{n\text{TOT}} = \sqrt{\left(1.65 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2 + \left(5.259 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2 + \left(4.5 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2} \cdot \sqrt{1.22 \cdot 7.18\text{MHz}} = 21.06 \mu\text{V}$$

注意，计算值与仿真值之间匹配良好。请参阅 [计算 ADC 系统的总噪声](#) 视频，了解有关此主题の詳細理论。



### 测得的交流结果 (FFT)

该性能是在 ADS7056EVM 的修改版本上以 2kHz 输入正弦波测得的。交流性能显示 SNR = 74.4dB 且 THD = -84.07dB，这与该 ADC 的额定性能 (SNR = 74.9dB 且 THD = -85dB) 非常匹配。此测试是在室温下进行的。有关此主题的更多详细信息，请参阅 [频域简介](#)。

参数	数据表规格 (典型值)	测量结果
SNR	74.9dB	74.4dB
THD	-85dB	-84.07dB



### 设计采用的器件和备选器件

器件	主要特性	链接	其他可能的器件
ADS7056	14 位分辨率, SPI, 2.5MSPs 采样速率, 单端输入, AVDD/V <sub>REF</sub> 输入范围为 2.35V 至 3.6V, DVDD 为 1.65V 至 3.6V。	<a href="#">具有 SPI 的 14 位 2.5MSPS 超低功耗、超小型 SAR ADC</a>	精密 ADC
OPA192	8kHz 带宽, 轨到轨输出, 450nA 电源电流, 单位增益稳定	<a href="#">高电压、轨到轨输入/输出、5μV、0.2μV/°C、精密运算放大器</a>	运算放大器
OPA365	50MHz 带宽, 轨到轨输出, 零交叉, 低失调电压 100μV, 低噪声 4.5nV/√Hz, 压摆率 25V/μs	<a href="#">2.2V、50MHz 低噪声单电源轨到轨运算放大器</a>	

### 主要文件链接

德州仪器 (TI), [SBAA371 源文件](#), 工具支持

### 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