

Analog Engineer's Circuit

适用于 SAR ADC 的高输入阻抗、真差分、模拟前端 (AFE) 衰减器电路



Luis Chioye

输入电压 (OPA197 缓冲器)	THS4551 输出、ADC 输入	ADS8912B 数字输出
$V_{inP} = -12V$, $V_{inN} = +12V$, $V_{inMin} (Dif) = -24V$	$V_{outDif} = -4.00V$, $V_{outP} = 0.25V$, $V_{outN} = 4.25V$	238E3 _H -116509 ₁₀
$V_{inP} = +12V$, $V_{inN} = -12V$, $V_{inMax} (Dif) = +24V$	$V_{outDif} = +4.0V$, $V_{outP} = 4.25V$, $V_{outN} = 0.25V$	1C71C _H +116508 ₁₀

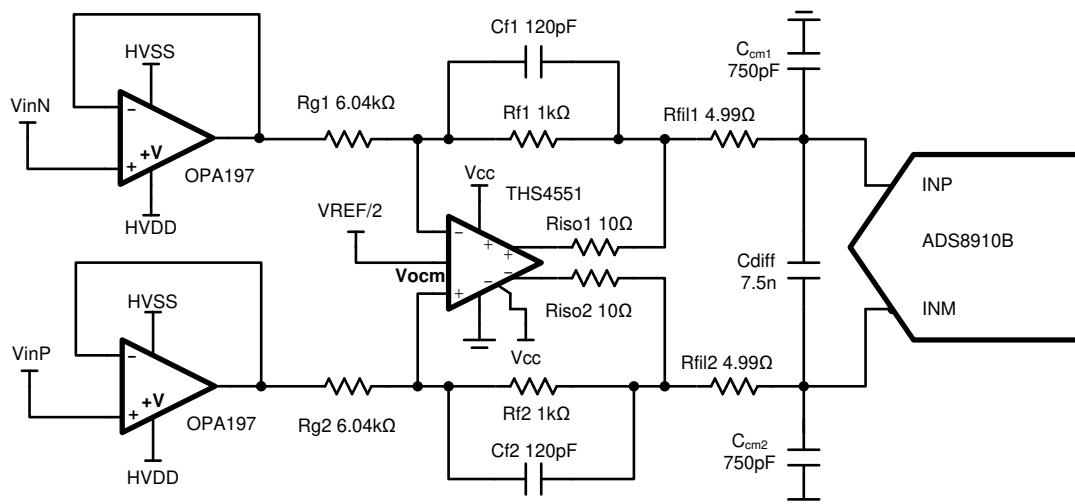
电源和基准电压

HVDD	HVSS	Vcc	Vee	Vref	Vcm
+15V	-15V	+5.0V	0V	+4.5V	2.5V

设计说明

此模拟前端 (AFE) 和 SAR ADC 数据采集解决方案可测量 $\pm 24V$ 范围 (或绝对输入范围 $V_{inP} = \pm 12V$, $V_{inN} = \pm 12V$) 内的真差分电压信号, 提供高输入阻抗, 支持高达 500ksps 的数据速率, 且具有 18 位分辨率。此解决方案采用具有低输入偏置电流的精密 36V 轨到轨放大器来缓冲全差分放大器 (FDA) 的输入。FDA 可使信号衰减并将其转换为 SAR ADC 的差分电压和共模电压范围。您可以调整元件选择部分的值以允许不同的输入电压电平。

该电路实现用于精确测量可编程自动控制 (PAC)、离散控制系统 (DCS) 和可编程逻辑控制 (PLC) 应用中使用的参数测量单元 (PMU)、精密多功能输入和输出 DAQ 和模拟输入模块中的真实差分电压。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

规格

规格	目标值	计算值	仿真值
瞬态 ADC 输入稳定 (500ksps)	$\ll 1 \text{ LSB} ; \ll 34\mu\text{V}$	不适用	$0.5\mu\text{V}$
噪声 (ADC 输入端)	$10\mu\text{V}_{\text{RMS}}$	$9.28\mu\text{V}_{\text{RMS}}$	$9.76\mu\text{V}_{\text{RMS}}$
带宽	1.25MHz	1.25MHz	1.1MHz

设计说明

- 根据线性运行的共模、输出摆幅规格，验证运算放大器（缓冲器）的线性范围。*元件选择*部分中介绍了该内容。选择一个具有低输入偏置电流的放大器。
- 查找 ADC 满量程范围和共模范围规格。*元件选择*中介绍了该内容。
- 根据 FDA 的输入信号幅度、ADC 满量程范围和输出摆幅规格，确定 FDA 所需的衰减。*元件选择*部分中介绍了该内容。
- 选择 COG 电容器以最大限度地减少失真。
- 使用 0.1% 20ppm/°C 薄膜电阻器或更佳电阻器，以实现良好的精确度、低增益漂移并最大限度地减少失真。
- [了解和校准 ADC 系统的失调电压和增益](#) 介绍了误差分析的方法。请查看该链接以了解最大限度减少增益误差、失调电压误差、漂移误差和噪声误差的方法
- [SAR ADC 前端元件选择简介](#) 介绍了选择电荷桶电路 Rfilt 和 Cfilt 的方法。此类元件值取决于放大器带宽、数据转换器采样速率以及数据转换器设计。此处展示的值将能够为本例中的放大器、增益设置和数据转换器提供良好的趋稳和交流性能。如果改动了设计，必须选择其他的 RC 滤波器。请观看 [高精度实验室](#) 视频，了解如何选择 RC 滤波器以实现最佳的趋稳性能和交流性能。

缓冲放大器和 FDA 的元件选择和设置

- 验证缓冲放大器线性运行的输入范围：

$$\text{Select Supplies } (V-) = -15\text{V}, (V+) = +15\text{V to allow } V_{\text{inP}} = \pm 12\text{V } V_{\text{inN}} = \pm 12\text{V range}$$

$$(V-) - 0.1\text{V} < V_{\text{cm}} < (V+) - 3\text{V from OPA197 common-mode voltage specification}$$

$$-15.1\text{V} < V_{\text{cm}} < +12\text{V allows required } \pm 12\text{V input voltage range}$$

- 验证缓冲放大器线性运行的输出范围：

$$(V-) + 0.6\text{V} < V_{\text{out}} < (V+) - 0.6\text{V from OPA197 Aol specification for linear operation}$$

$$-14.4\text{V} < V_{\text{out}} < 14.4\text{V allows required } \pm 12\text{V output voltage range}$$

- 查找 ADC 满量程输入范围。在该电路中， $V_{\text{REF}} = 4.5\text{V}$ ：

$$\text{ADC}_{\text{Full-Scale Range}} = \pm V_{\text{REF}} = \pm 4.5\text{V from ADS8910B data sheet}$$

- 查找所需的 ADC 共模电压：

$$V_{\text{CM}} = \frac{+V_{\text{REF}}}{2} = +2.25\text{V from ADS8910B data sheet, therefore set FDA VCOM} = 2.25\text{V}$$

- 查找 FDA 线性运行的绝对输出电压范围：

$$0.23 < V_{\text{out}} < 4.77\text{V from THS4551 output low / high specification for linear operation}$$

However, the positive range is limited by $\text{ADC}_{\text{Full-Scale Range}} = \pm 4.5\text{V}$, therefore

$$0.23\text{V} < V_{\text{out}} < 4.5\text{V where } V_{\text{outMin}} = 0.23\text{V}, V_{\text{outMax}} = 4.5\text{V}$$

- 查找 FDA 线性运行的差分输出电压范围。该电路的一般输出电压公式如下：

$$V_{\text{outMin}} = \frac{V_{\text{outDifMin}}}{2} + V_{\text{cm}} \text{ and } V_{\text{outMax}} = \frac{V_{\text{outDifMax}}}{2} + V_{\text{cm}}$$

Re - arrange the equations and solve for $V_{\text{outDifMin}}$ and $V_{\text{outDifMax}}$.

Find maximum differential output voltage range based on worst case :

$$V_{\text{outDifMax}} = 2 \times V_{\text{outMax}} - 2 \times V_{\text{cm}} = 2 \times (4.5\text{V}) - 2 \times (2.25\text{V}) = 4.5\text{V}$$

$$V_{\text{outDifMin}} = 2 \times V_{\text{outMin}} - 2 \times V_{\text{cm}} = 2 \times (0.23\text{V}) - 2 \times (2.5\text{V}) = -4.04\text{V}$$

Based on combined worst case, choose $V_{\text{outDifMin}} = -4.04\text{V}$ and $V_{\text{outDifMax}} = +4.04\text{V}$

7. 查找 FDA 差分输入电压范围 :

$$V_{\text{inDifMax}} = V_{\text{inPmax}} - V_{\text{inNmin}} = +12\text{V} - (-12\text{V}) = +24\text{V}$$

$$V_{\text{inDifMin}} = V_{\text{inPmin}} - V_{\text{inNmax}} = -12\text{V} - (+12\text{V}) = -24\text{V}$$

8. 查找 FDA 所需的衰减比 :

$$\text{Gain}_{\text{FDA}} = \frac{V_{\text{outDifMax}} - V_{\text{outDifMin}}}{V_{\text{inDifMax}} - V_{\text{inDifMin}}} = \frac{(+4.04\text{V}) - (-4.04\text{V})}{(+24\text{V}) - (-24\text{V})} = 0.166 \frac{\text{V}}{\text{V}} \approx \frac{1}{6} \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

9. 查找标准电阻值来设置衰减 :

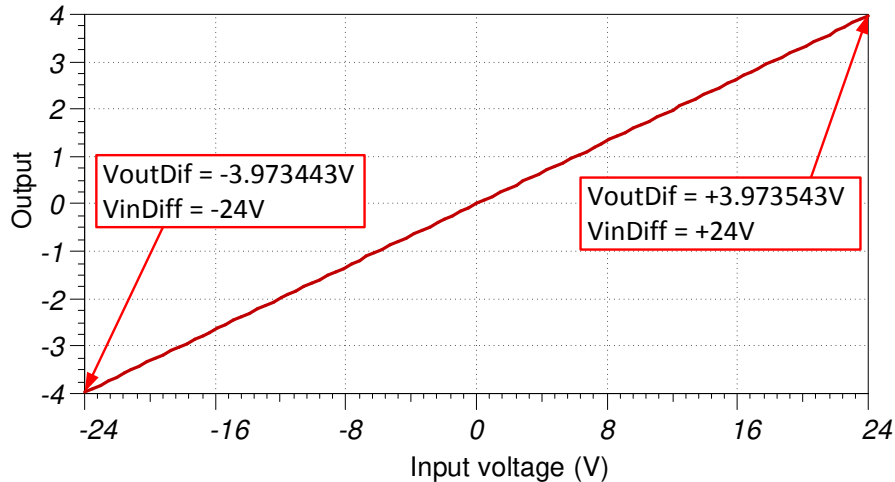
$$\text{Gain}_{\text{FDA}} = \frac{R_f}{R_g} = \frac{1}{6} \text{V/V} \Rightarrow \frac{R_g}{R_f} = \frac{1.00\text{k}\Omega}{6.04\text{k}\Omega} = \frac{1}{6.04} \text{V/V}$$

10. 查找 C_f (截止频率为 f_c , $R_{f\text{INA}} = 1\text{k}\Omega$) :

$$C_f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot R_{f\text{INA}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (1.25\text{MHz}) \cdot (1\text{k}\Omega)} = 127\text{pF} \text{ or } 120\text{pF} \text{ standard value}$$

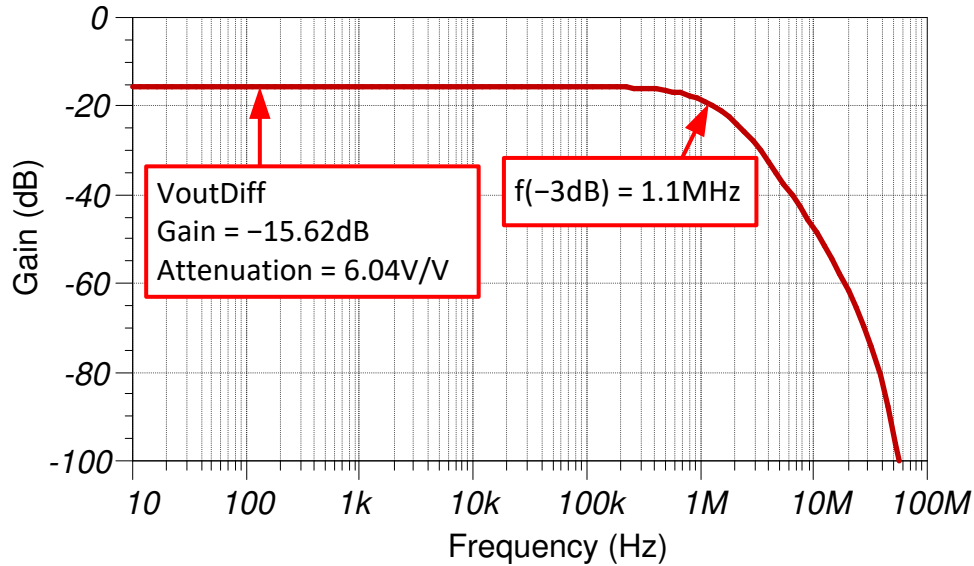
直流传输特性

下图展示了 +24V 至 -24V 差分输入的线性输出响应。



交流传输特性

仿真带宽约为 1.1MHz, 增益为 -15.62dB, 这是约为 0.166V/V 的线性增益 (衰减比为 6.04V/V)。



噪声仿真

Simplified Noise calculation for rough estimate :

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot C_f} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (1\text{k}\Omega) \cdot (120\text{pF})} = 1.33\text{MHz}$$

Noise contribution of OPA197 buffer referred to ADC input

$$E_{\text{nOPA197}} = e_{\text{nOPA197}} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c} \cdot \text{Gain}_{\text{FDA}}$$

$$E_{\text{nOPA197}} = (5.5\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}) \cdot \sqrt{1.57 \cdot 1.33\text{MHz}} \cdot 0.166\text{V} / \text{V} = 1.319\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

Noise of THS4551 FDA referred to ADC input

$$\text{Noise gain : } \text{NG} = 1 + R_f / R_g = 1 + \frac{1.00\text{k}\Omega}{6.04\text{k}\Omega} = 1.166\text{V} / \text{V}$$

$$e_{\text{noFDA}} = \sqrt{(e_{\text{nFDA}} \cdot \text{NG})^2 + 2(i_{\text{nFDA}} \cdot R_f)^2 + 2(4\text{kTR}_f \cdot \text{NG})}$$

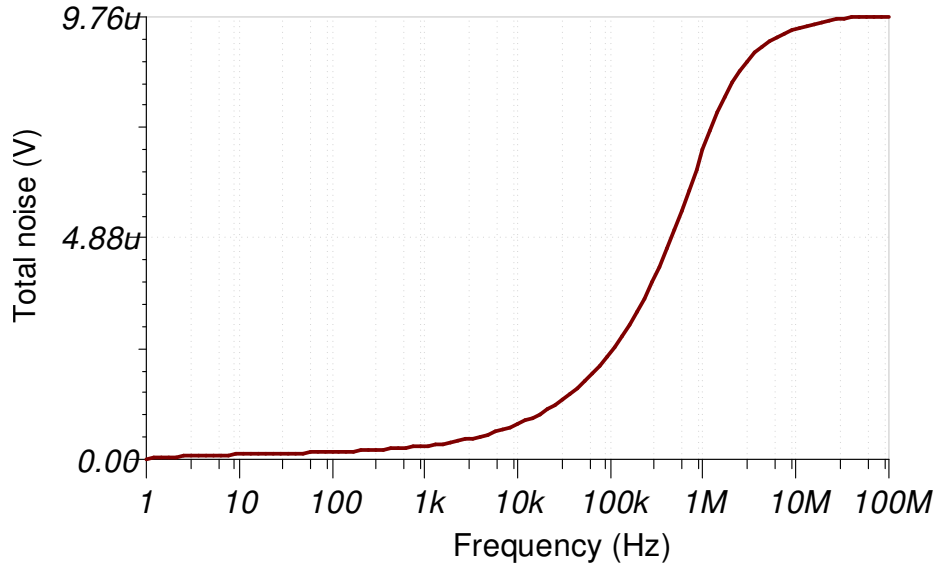
$$e_{\text{noFDA}} = \sqrt{(3.4\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot 1.166\text{V} / \text{V})^2 + 2(0.5\text{pA} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot 1\text{k}\Omega)^2 + 2(16.56 \cdot 10^{-18} \cdot 1.166\text{V} / \text{V})}$$

$$e_{\text{noFDA}} = 7.4\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$$

$$E_{\text{nFDA}} = e_{\text{noFDA}} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c} = (7.40\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}) \cdot \sqrt{1.57 \cdot 1.33\text{MHz}} = 9.28\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

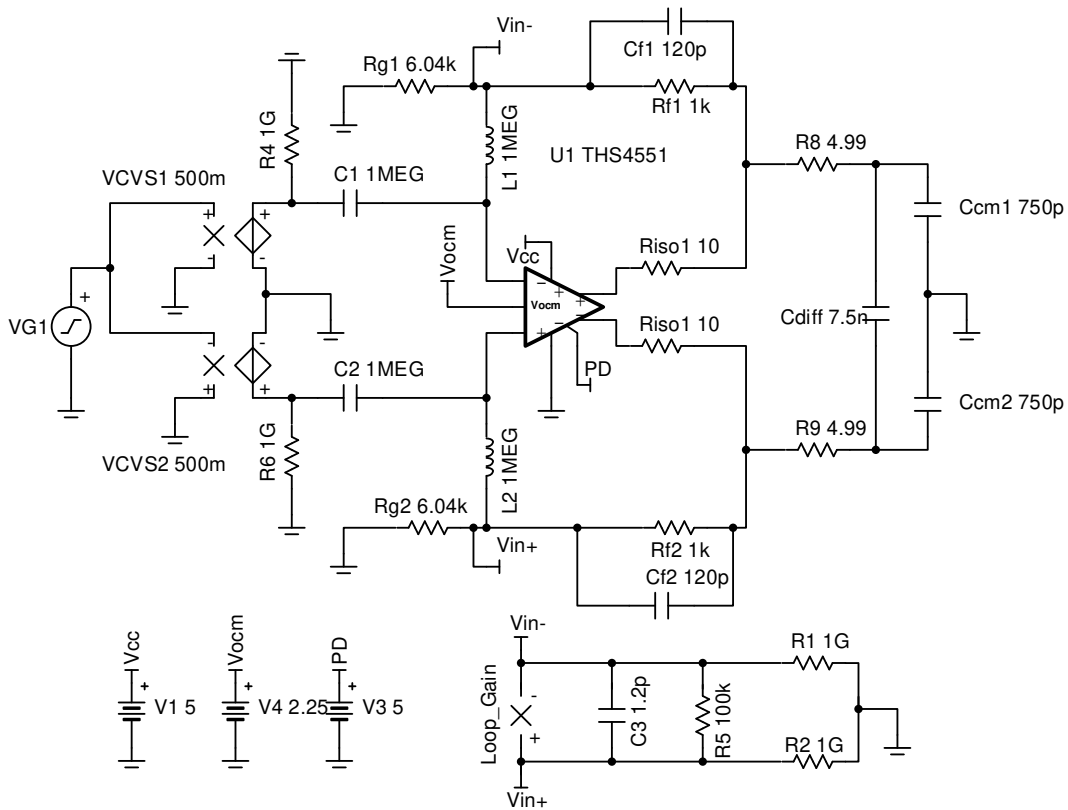
$$\text{Total Noise} = \sqrt{E_{\text{nFDA}}^2 + E_{\text{nOPA197}}^2} = \sqrt{(9.28\mu\text{V}_{\text{RMS}})^2 + (1.32\mu\text{V}_{\text{RMS}})^2} = 9.37\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

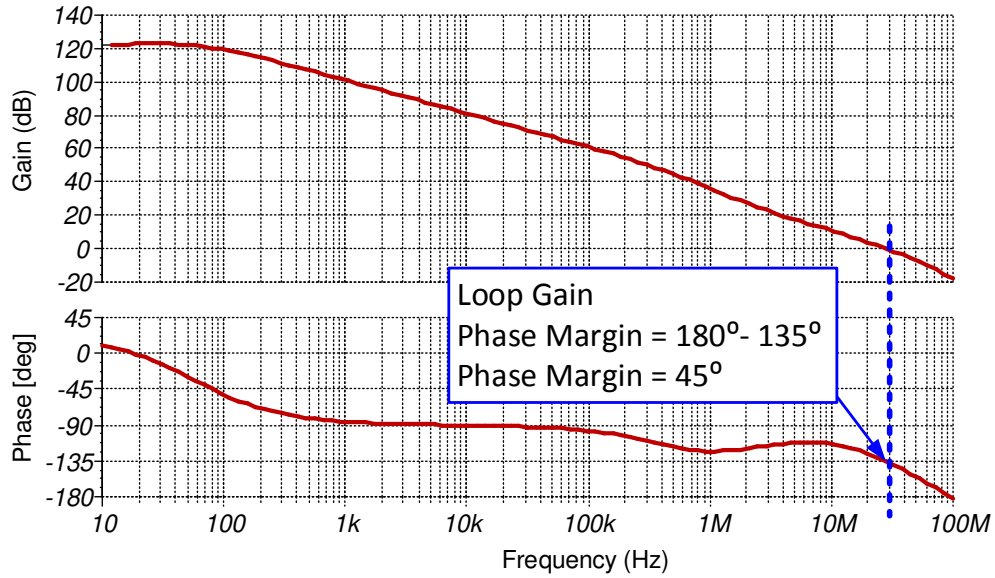
注意，计算结果与仿真结果匹配良好。有关该主题的详细理论，请观看[计算 ADC 系统的总噪声](#)。



稳定性仿真

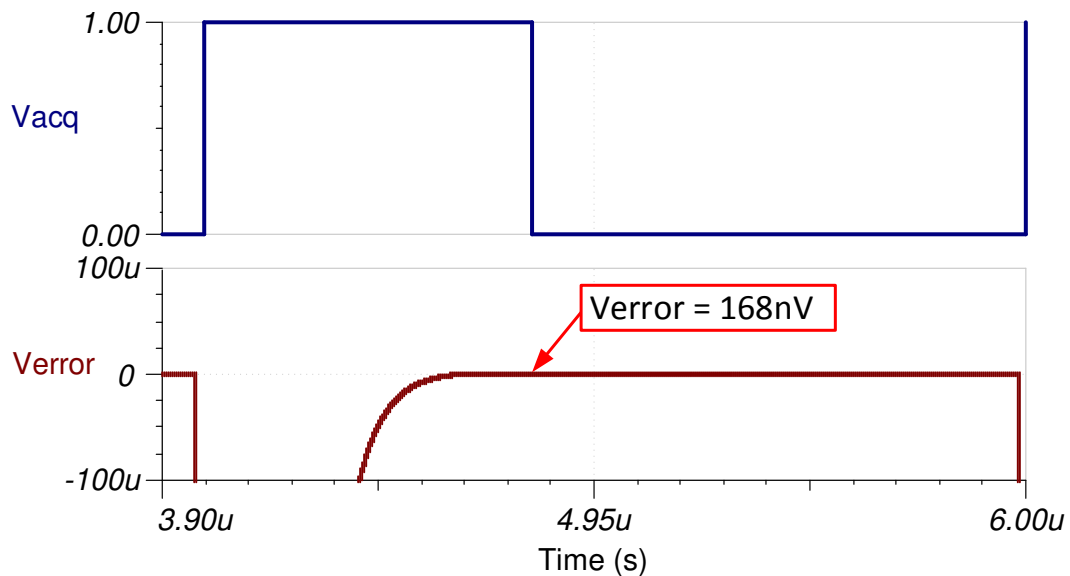
在 TINA 中使用以下电路来测量环路增益并使用 TINA 中的交流传输分析来验证相位裕度。电阻器 $R_{ISO} = 10\Omega$ 在反馈环路内用于增大相位裕度。该电路具有 45 度相位裕度。有关该主题的理论，请观看 [TI 高精度实验室 - 运算放大器：稳定性 4](#)。





瞬态 ADC 输入稳定仿真

以下仿真显示了在 OPA197 缓冲器输入设置为 +12V 和 -12V 条件下趋稳至 24V 直流差分输入信号的情况。该类型的仿真表明已正确选择采样保持反冲电路。有关该主题的详细理论，请观看 [优化 Rfilt 和 Cfilt 值](#)。



设计中采用的器件

器件	主要特性	链路	类似器件
ADS8912B ⁽¹⁾	18 位分辨率, 500ksps 采样速率, 集成基准缓冲器, 全差分输入, Vref 输入范围为 2.5V 至 5V。	具有内部 VREF 缓冲器、内部 LDO 和增强型 SPI 接口的 18 位 1MSPS 单通道 SAR ADC	模数转换器 (ADC)
THS4551	FDA, 150MHz 带宽, 轨到轨输出, VosDriftMax = 1.8μV/°C, en = 3.3nV/rHz	低噪声精密 150MHz 全差分放大器	运算放大器
OPA197	36V, 10MHz 带宽, 轨到轨输入/输出, VosMax = ±250μV, VosDriftMax = ±2.5μV/°C, 偏置电流 = ±5pA	单路、36V、轨到轨输入/输出、低失调电压精密运算放大器	运算放大器
REF5045	VREF = 4.5V, 3ppm/°C 漂移, 0.05% 初始精度, 4μVpp/V 噪声	4.5V、3μVpp/V 噪声、3ppm/°C 温漂精密串联电压基准	串联电压基准

(1) REF5045 可直接连接到 ADS8912B, 无需任何缓冲器, 因为 ADS8912B 具有内置的内部基准缓冲器。此外, REF5045 具有精密 SAR 应用所需的低噪声和漂移。THS4551 提供衰减功能并可将其模电平转换为 SAR ADC 的电压范围。此外, 该 FDA 通常用于高速精密全差分 SAR 应用, 因为它具有足够的带宽使 ADC 输入采样产生的电荷反冲瞬态稳定。OPA197 是一款 36V 运算放大器, 可提供非常高的输入阻抗前端, 从而对 FDA 输入进行缓冲

主要文件链接

德州仪器 (TI), [SBAC183 源文件](#), 软件支持

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 * (February 2018) to Revision A (March 2019) Page

- 将标题样式改为小写, 并将标题角色更改为“数据转换器”, 同时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