

使用双运算放大器电路实现单端转差分

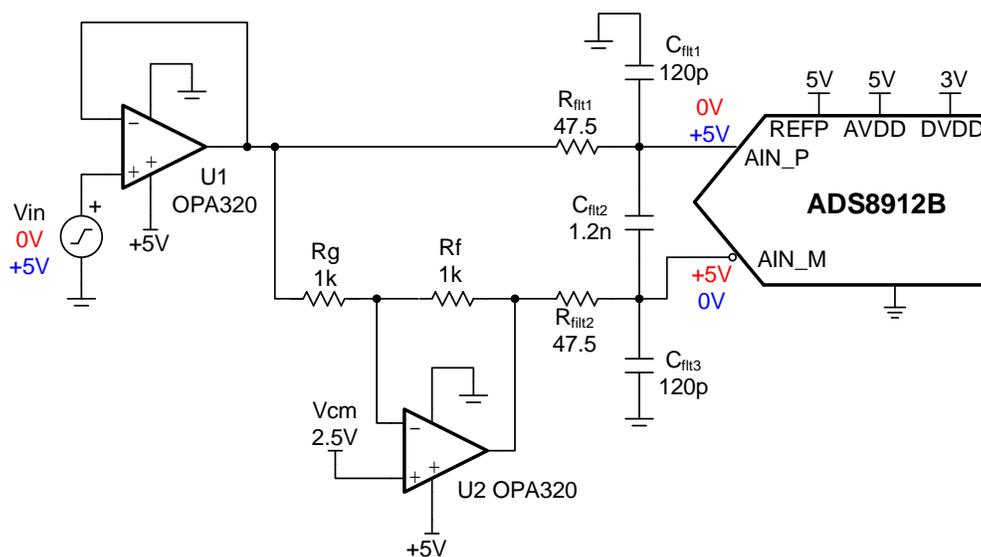
Bryan McKay, Art Kay

输入	ADC 差分输入 (Vdif)	ADC 共模输入 (Vcm)	数字输出 ADS9110
0V	-5V	2.5V	20000 _H
5V	+5V	2.5V	1FFFF _H

电源			
V+ (运算放大器)	AVDD	DVDD	REFP
5V	5V	3V	5V

设计说明

该电路使用两个 OPA320 运算放大器来执行单端至差分转换，以驱动 ADS8912B 全差分 ADC。解决该问题的另一种方法是使用全差分放大器 (FDA)。有关 FDA 示例，请参阅《对单极信号采用运算放大器和 FDA 进行单端到差分信号转换》。由于市面上有数千种不同类型的运算放大器，与其使用全差分放大器，不如轻松地选择可满足您的特定要求的运算放大器。例如，大多数 FDA 不像许多精密运算放大器那样具有良好的相对于电源轨的摆幅、失调电压、偏置电流和漂移。另一方面，运算放大器方法在反相和同相路径中具有非对称群延迟。此外，FDA 放大器通常具有更佳的失真和 ADC 驱动特性。一般而言，FDA 方法可实现最佳的 SNR 和 THD，运算放大器方法可实现最佳的直流特性。然而，特定的运算放大器或 FDA 会影响两种拓扑的比较。



规格

规格	目标值	计算值	仿真值
瞬态 ADC 输入趋稳 (1MSPS)	$< 0.5\text{LSB} = 19.1\mu\text{V}$	不适用	5 μV
输入/输出范围	不适用	不适用	$0.1 < V_{\text{IN}} < 4.9\text{V}$ $-4.8\text{V} < V_{\text{OUT}} < 4.8\text{V}$
噪声	不适用	30.5 μV_{RMS}	28.4 μV_{RMS}

设计说明

1. 对 R1 和 Rg 使用 0.1% 电阻器，以最大限度地降低 U2 上的增益误差和漂移。
2. 为 C_{filt1}、C_{filt2} 和 C_{filt3} 选择 COG (NPO) 电容器，以最大限度地降低失真。
3. [TI 高精度实验室 – ADC](#) 培训视频系列介绍了选择电荷桶电路 R_{filt} 和 C_{filt} 的方法。此类组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。此处所示的规格值可为本示例中的放大器和数据转换器提供良好的趋稳和交流性能。如果改动此设计，则需要选择其他的 RC 滤波器。请观看 [《SAR ADC 前端组件选择简介》](#) 培训视频，了解如何选择 RC 滤波器以实现最佳的趋稳和交流性能。

组件选择

1. 选择运算放大器以满足系统要求。需要考虑的主要规格如下所示：

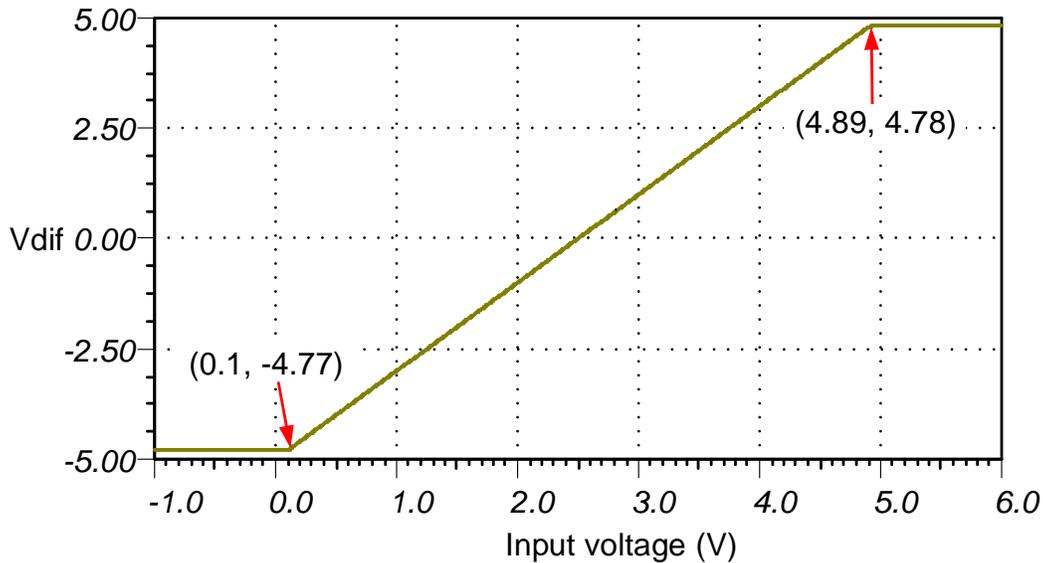
- 相对于电源轨的摆幅 - 对于 5V 电源轨，通常使用轨至轨零交叉失真器件（例如 [OPA320](#)、[OPA325](#) 和 [OPA365](#)）。
- 失调电压和漂移 - 该电路相对于 FDA 方法的一项优势是某些运算放大器可能具有很好的直流性能。
- 带宽和静态电流 - 该电路相对于 FDA 方法的另一项优势是可提供各种运算放大器带宽和相关的静态电流。对于较低的采样率，低带宽、低电流运算放大器可能是理想的选择。

2. 选择 R_g 和 R_f 以最大程度地降低噪音。该电路的增益始终为 1，因此 $R_g = R_f$ 。此处的主要考虑因素是在保持负载电阻合理的同时最大程度地降低噪声。将电阻器噪声设置为放大器噪声的大约 $\frac{1}{3}$ 。在该示例中， $R_f = R_g = 1k\Omega$ 可以实现 $2.8nV/\sqrt{Hz}$ 的噪声，这大约是 $7nV/\sqrt{Hz}$ 运算放大器噪声的 $\frac{1}{3}$ 。此外，最大负载电流为 $2.5mA$ ($5V/2k\Omega = 2.5mA$)，与运算放大器短路限制 ($65mA$) 相比较低。

3. 确定可在 1kSPS 的采样率下实现趋稳的 R_{filt} 和 C_{filt} 。请观看《[优化 \$R_{filt}\$ 和 \$C_{filt}\$ 值](#)》，以了解选择 R_{filt} 和 C_{filt} 的算法。经证实， $200k\Omega$ 和 $510pF$ 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

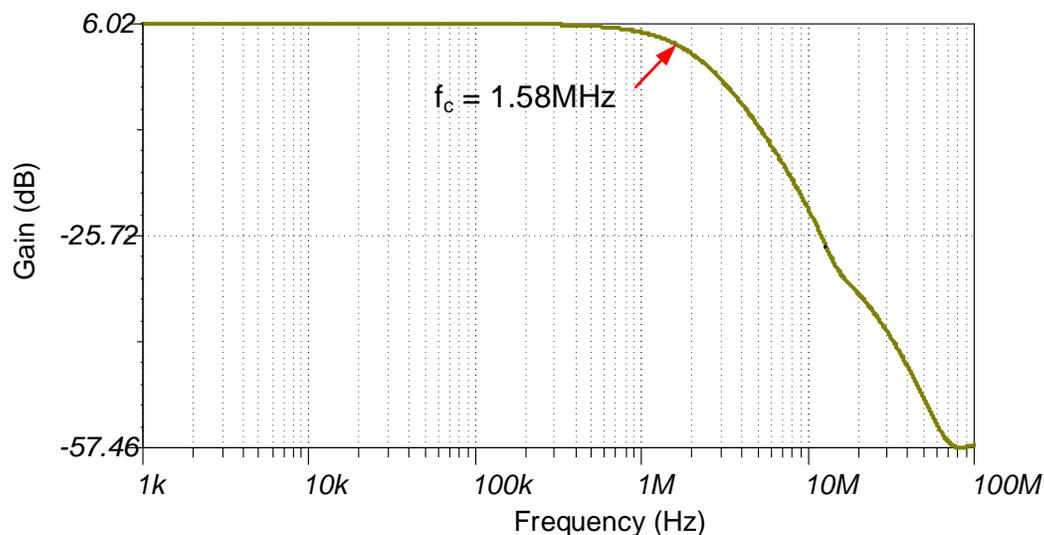
下图显示了该电路的直流传输特性（0V 至 5V 单端输入、-5V 至 +5V 全差分输出）。请注意，线性范围限制在大约相对于两个电源轨 0.1V（ V_{in} 线性范围大约为 0.1V 至 4.9V）。限制来自放大器输出摆幅限制。为了改善线性摆幅，需要调整放大器的负电源和正电源。有关该操作的示例，请参阅《低功耗传感器测量：3.3V、1ksps、12 位、单端、双电源电路》。



交流传输特性

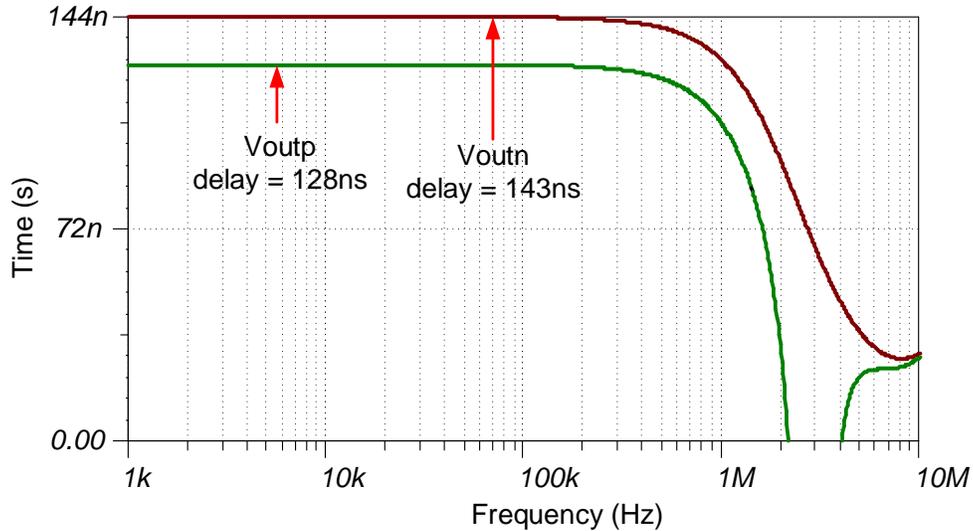
在这种情况下，带宽限制主要由 R_{fit} 、 C_{fit} 值设置。放大器闭环带宽也可能影响总体带宽。请注意，U2 带宽是 U1 带宽的一半，因为其噪声增益是二 ($BW_{U2} = GBW/G_n = 20MHz/2 = 10MHz$)。

$$f_c = \frac{1}{2\pi R \cdot C} = \frac{1}{2\pi(2 \cdot 47.5\Omega) \cdot 1.2nF} = 1.4MHz$$



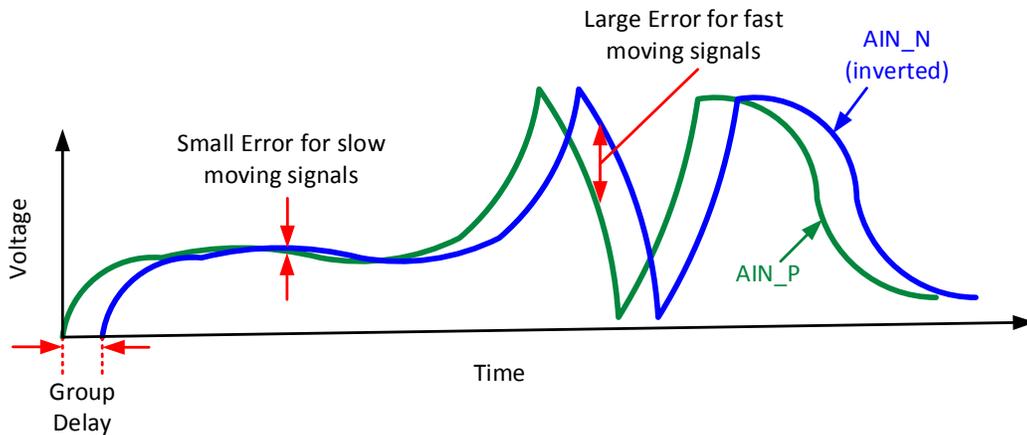
群延迟 (频域)

群延迟是施加的输入信号和输出信号之间的延时时间。所有放大器和滤波器都会具有群延迟。群延迟是该电路的亮点，因为反相和同相路径都具有不同的群延迟。对于较高频率的信号，这可能会产生失真。有关其他详细信息，请参阅时域图中的群延迟。



群延迟 (时域)

下图定性显示了群延迟如何影响时域信号。该图中的误差被夸大，以强调群延迟的影响。绿色信号表示 AIN_P 上的输出，蓝色信号表示 AIN_N 上的反相输出。理想情况下，两个信号应该跟踪，但群延迟将蓝色信号向右移动。请注意，当信号缓慢移动时，误差相对较小，当它们快速移动时，误差较大。因此，低频信号将具有良好的失真性能，频率较高的信号将具有较低的失真性能。SPICE 不对 THD 进行仿真，因此对于量化值，需要进行测量。不过，如果输入信号周期比通道之间的群延迟大 1,000 倍以上，那么该影响一般可以忽略不计。



噪声仿真

以下噪声计算考虑放大器和电阻器噪声。请注意，来自 U1 的噪声被 U2 反相并添加到差分输出中。由于该噪声是直接相关的，所以它直接相加，而不是通常用于噪声源的平方和根加法。另请注意，输出滤波器近似表示为一阶滤波器，但它是一个更复杂的滤波器。计算得出的噪声与仿真噪声非常接近（计算值 = $30.5\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ ，仿真值 = $28.4\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ ）。

$$e_{nU1} = e_{n320} + e_{n320} = 7\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} + 7\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} = 14\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad \text{Note these two sources are correlated}$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_f \cdot R_g}{R_f + R_g} = \frac{1\text{ k}\Omega \cdot 1\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega + 1\text{ k}\Omega} = 500\Omega$$

$$e_{n\text{Re}q} = \sqrt{4K_n \cdot T_K \cdot R_{\text{eq}}} = \sqrt{4(1.38 \cdot 10^{-23}\text{ J/K}) \cdot (298.15) \cdot (500\Omega)} = 2.87\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

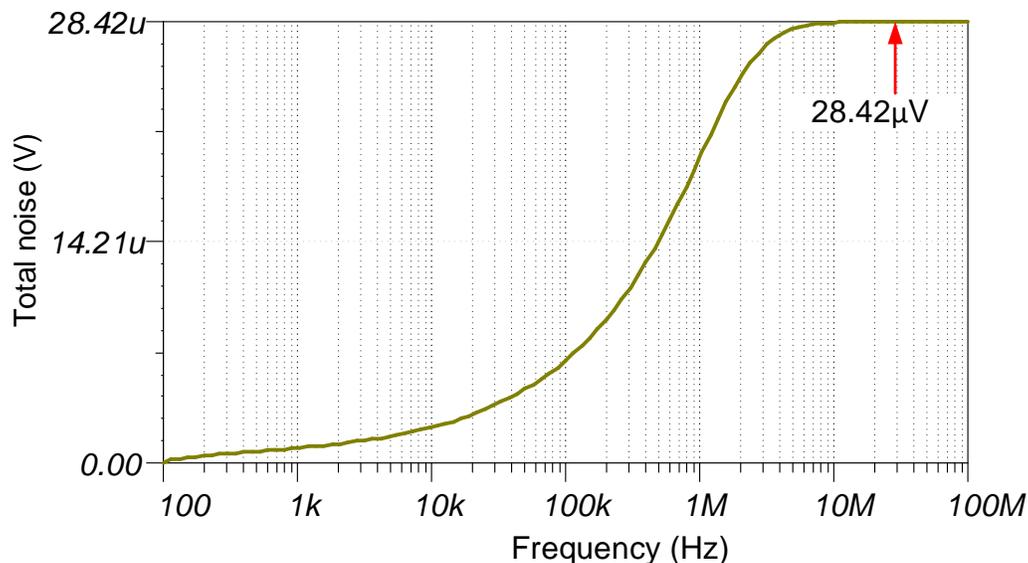
$$e_{nU2} = \sqrt{(e_{n\text{Re}q} \cdot G_n)^2 + (e_{n320} \cdot G_n)^2} = \sqrt{(2.87\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot 2)^2 + (7\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot 2)^2} = 15.1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$e_{nT} = \sqrt{(e_{nU1})^2 + (e_{nU2})^2} = \sqrt{(14\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2 + (15.1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}})^2} = 20.6\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R \cdot C} = \frac{1}{2\pi(2 \cdot 47.5\Omega) \cdot 1.2\text{ nF}} = 1.4\text{ MHz}$$

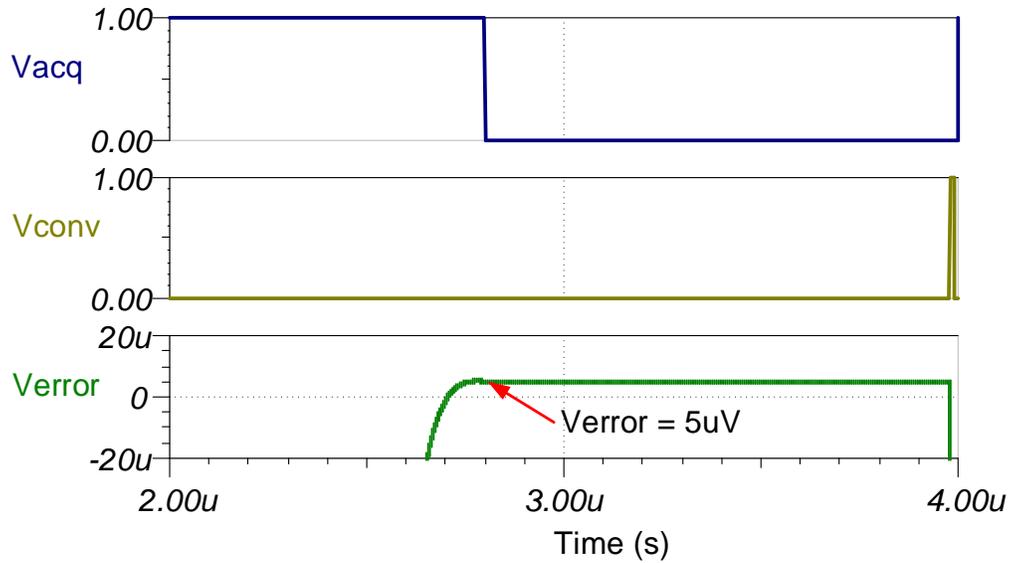
$$E_{nT} = e_{nT} \cdot \sqrt{1.57 \cdot f_c} = 20.6\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1.57 \cdot 1.4\text{ MHz}} = 30.5\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

计算得出的噪声与仿真噪声非常接近（计算值 = $30.5\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ ，仿真值 = $28.4\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ ）。请观看《[计算 ADC 系统的总噪声](#)》，了解有关该主题的理论。



瞬态 ADC 输入趋稳仿真

以下仿真显示了在 500kSPS 的采样率下趋稳至满量程直流输入信号的情况。该类型的仿真表明已正确选择采样保持反冲电路。请观看《SAR ADC 前端组件选择简介》，了解有关该主题的理论。



设计中采用的器件

器件	主要 特性	链接	其他可能的器件
ADS8912	18 位分辨率，500kSPS 采样率，集成基准缓冲器，全差分输入，Vref 输入范围为 2.5V 至 5V。	http://www.ti.com.cn/product/cn/ADS8912B	http://www.ti.com/adcs
OPA320	20MHz 带宽，轨至轨（具有零交叉失真），VosMax = 150 μ V，VosDriftMax = 5 μ V/C，en = 7nV/ \sqrt Hz	http://www.ti.com.cn/product/cn/OPA320	http://www.ti.com/opamps

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

该电路的源文件 - <http://www.ti.com/cn/lit/zip/SBAC193>。

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 © 2021，德州仪器 (TI) 公司