

高分辨率工业应用中的精密信号调理

作者: Gustavo Castro和Kristina Fortunado

简介

工业测量和控制系统通常需要在高噪声环境中与传感器对接。由于传感器通常产生的电气信号极为微弱，将其输出信号从噪声中提取出来是一项有难度的工作。利用信号调理技术(如放大和滤波)有助于提取信号，因为这些技术可提升系统的灵敏度。然后可对信号进行缩放与转换，以便充分利用高性能ADC。

本应用笔记介绍一款通用精密信号调理前端，可填补传感器和高分辨率ADC之间的空白。本文将对电路进行分析，以便了解其噪声贡献、环境噪声抑制以及执行高灵敏度测量的能力。

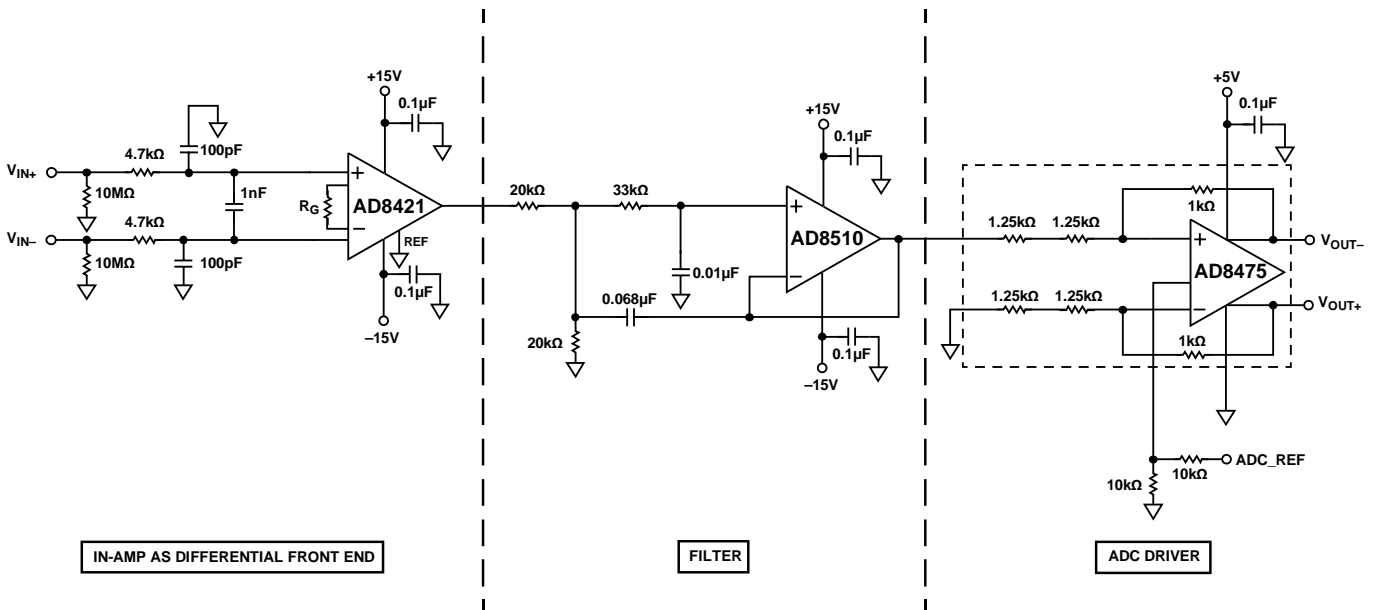


图1. 精密信号调理电路原理图

11795-001

目录

简介.....	1	放大器噪声考虑因素.....	3
修订历史.....	2	总系统性能.....	5
精密信号调理电路描述.....	3	结论.....	7
		参考文献.....	7

修订历史

2013年12月—修订版0：初始版

精密信号调理电路描述

精密信号调理电路主要由3级组成：放大级、滤波级和ADC驱动级。这些组件为电路提供灵活性。

放大在第一级中通过差分前端实现。首选差分输入，因为其本身具备了噪声抑制特性，而环境噪声通常表现为共模信号(例如，电源线噪声和接地环路)。第一级提供更宽的输入范围、可调增益以及随增益而增加的高共模抑制比(CMRR)。第二级使用了一个滤波器；ADC驱动在最后一级中实现。最后一级实现单端至差分的转换，以及输出信号的转换与缩放，并将结果输入ADC。

精密信号调理电路的各级

精密信号调理电路的原理图如图1所示。该图第一部分显示采用低噪声仪表放大器AD8421实现的放大功能，其输入电压噪声密度为 $3\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。使用单位增益时，该放大器可让系统具有94 dB以上的共模抑制能力。使用单个电阻即可设置不同的增益值。由于这款器件采用专利的引脚排列以及经过仔细设计的架构，同时由于CMRR随增益增加而增加，因此当增益为1000时，共模抑制能力将保证高于140 dB。前端电路的输入端还包含一个RFI滤波器，防止高频噪声破坏测量结果。

为了限制噪声带宽并避免混叠，采用低噪声JFET运算放大器AD8510进行滤波，其电压噪声密度为 $8\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。图1的中央部分显示该器件配置为2极点Sallen-Key滤波器，转折频率为460 Hz。该滤波器仅允许目标频率通过，从而防止ADC对混叠频率进行采样。来自AD8421的信号进入由两个 $20\text{ k}\Omega$ 电阻组成的电阻分压器，以便该信号能缩放至ADC的输入(采用 2.5 V 基准电压源)。使用此分压器以及配置为单位增益的放大器，则滤波器级的总增益为0.5。

AD8475是一款差分ADC驱动器，配置为增益0.4，如图1中的最右边所示。它可执行单端至差分的转换，同时提供VOCM引脚，允许用户将输出信号转换为对ADC而言的最佳电平。本电路中，输出共模电平是用于ADC的一半基准电压。这样可以确保输入ADC的信号具有最大的动态范围。考虑到上一级的增益，则信号调理电路的输出增益为0.2。在此衰减系数下，当ADC使用 2.5 V 基准电压时，可获得 $\pm 10\text{ V}$ 可用输入范围。

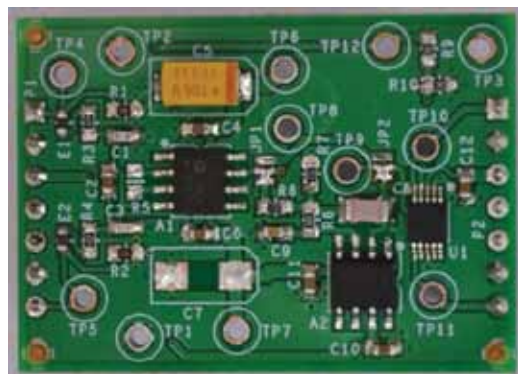


图2. 精密信号调理电路板

放大器噪声考虑因素

实际中，估算任何调理电路的预期噪声贡献可让用户计算系统的有效分辨率。注意，信号调理电路自身的有源器件也会对电路贡献某种形式的噪声。

例如，图3显示了AD8421折合到输入端的电压噪声密度图。

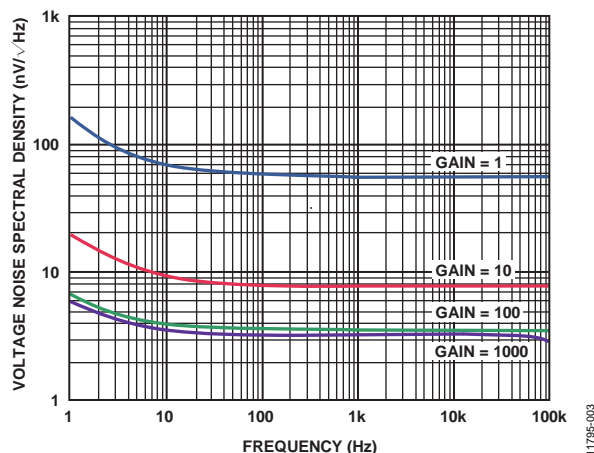


图3. AD8421的电压噪声密度

放大器噪声通常由 $1/f$ 噪声和宽带噪声组成。随着频率的下降， $1/f$ 噪声表现为频谱密度的上升。此噪声通常对低频产生影响。低转折频率的放大器在接近直流的应用中噪声极低。相反，宽带噪声在其余频段内的频谱密度不变。计算应用中的总噪声贡献时，必须考虑工作带宽。对于AD8421而言，其转折频率为10 Hz。

从图3中可以看出，噪声还受增益的影响。仪表放大器的输入和输出中都存在噪声分量。增益增加时，输出噪声分量以增益为系数缩小，使折合到输入的总噪声降低。

AN-1264

其他因素导致的噪声分量各自不相关。因此，电路的输出噪声可通过计算其平方和的平方根(称为RSS)求得(更多信息可参考技术文章MS-2066：传感器电路的低噪声信号调理)。

由于对电路的直流性能进行评估，因此来自放大器的噪声贡献主要受 $1/f$ 噪声影响。ADC还可消除宽带噪声，因此不计入计算中。根据0.1 Hz至10 Hz噪声规格，对于每个放大器而言，折合到输出(RTO)的噪声增量见表1。本节中的所有分析均假定AD8421的增益状态为1。

表1. ADC驱动器精密信号调理电路的总预期噪声

器件	典型噪声 ($\mu\text{V p-p}$)	增益 ¹	噪声RTO ($\mu\text{V p-p}$)
AD8421	2	0.2	0.4
AD8510	2.4	0.4	0.96
AD8475	2.5	1	2.5

¹增益指放大器输出到ADC输入的增益。

然后，便可求解精密信号调理电路的预期总RSS噪声。

$$\text{噪声}_{PSC} = \sqrt{0.4^2 + 0.96^2 + 2.5^2}$$

$$\text{噪声}_{PSC} = 2.7 \mu\text{V p-p}$$

将信号调理电路与低噪声模数转换器对接可测量此噪声。AD7195是一款24位 Σ - Δ 型ADC，集成内部PGA。通过表征2.5 V基准电压下的ADC，可以观察到10 Hz输出数据速率(ODR)以及 $\pm 19.5 \text{ mV}$ 输入电压范围下的噪声分布为63 nV p-p (内部PGA增益设为128)。由于该数值比计算得到的 $2.7 \mu\text{V p-p}$ 前端噪声幅度低两个数量级，此噪声贡献可以忽略不计。

这一假设同样适用于实际设置中精密信号调理电路的噪声验证。

图4显示单芯片评估板上信号调理电路与AD7195的对接。为了测量系统噪声，将输入短路至地。由于噪声是随机噪声，因此测量其峰峰值和均方根值；后者等于高斯分布的标准差。评估板软件可收集这些测量的结果。

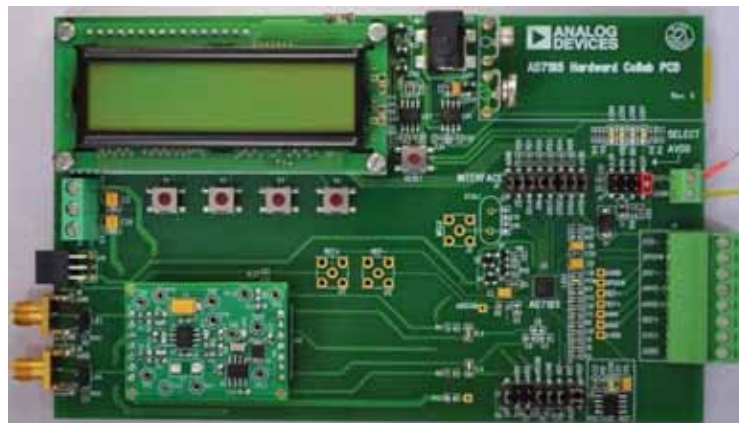


图4. 噪声评估设置

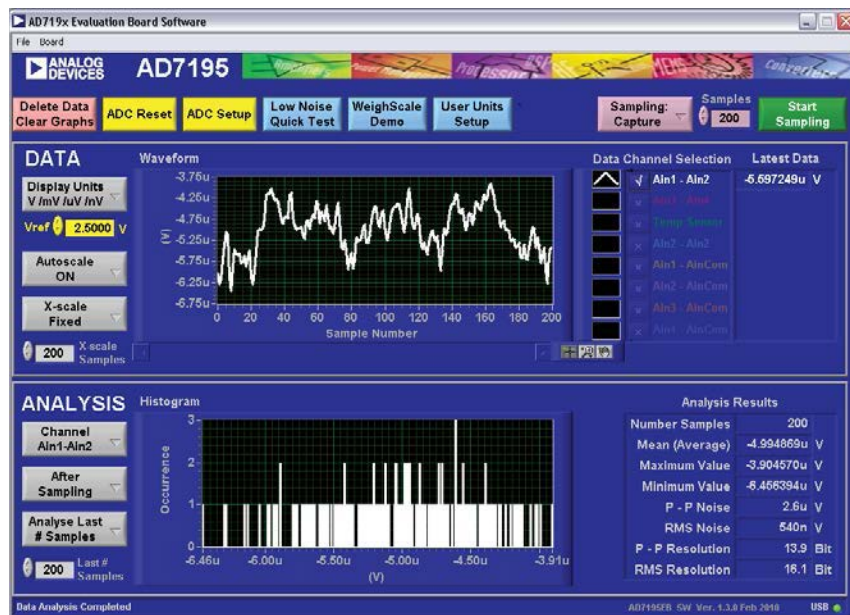


图5. 10 Hz ODR时的噪声结果(内部PGA增益设为128)

噪声测量结果如图5所示。图中，ADC的内部PGA增益设为128，ODR为10 Hz。图中可以观察到 $2.6 \mu\text{V}$ p-p的噪声测量结果与 $2.7 \mu\text{V}$ p-p的计算值相关。考虑到估算数值时使用的是典型规格数据，因此可以预期获得这样的性能。

总系统性能

系统灵敏度和有效分辨率由电路的内部噪声决定。使用精密信号调理电路驱动AD7195时，噪声计算可用来预测系统性能。由于目标频段为0.1 Hz至10 Hz，因此需注意若要使计算得到的噪声值有效，采集时间应当为10秒。

可测量极微弱信号的系统也应当能在有较大干扰信号的情况下这样做，结果才有效。共模抑制可作为衡量这种能力的品质因数，并且主要由电路前端部分决定。

灵敏度

噪声分析可用来确定系统的灵敏度。若在内部PGA增益为1的情况下使用，则ADC噪声会影响系统噪声。预期噪声值如表2所示。

表2. 不同采样速率下的预期噪声

输出数据速率(Hz)	前端 (μV p-p)	模数转换器(μV p-p)	预期噪声 ¹ (μV p-p)
10	2.7	1.2	3.0
50	2.7	2.7	3.8
60	2.7	2.7	3.8

¹10 Hz至50 Hz以及60 Hz范围内的宽带噪声可以忽略不计，并且未纳入计算。

以10 Hz ODR为例，使用相应的配置，在实际设置中测量噪声。如图6所示， $3.0 \mu\text{V}$ p-p读数与计算值相关。

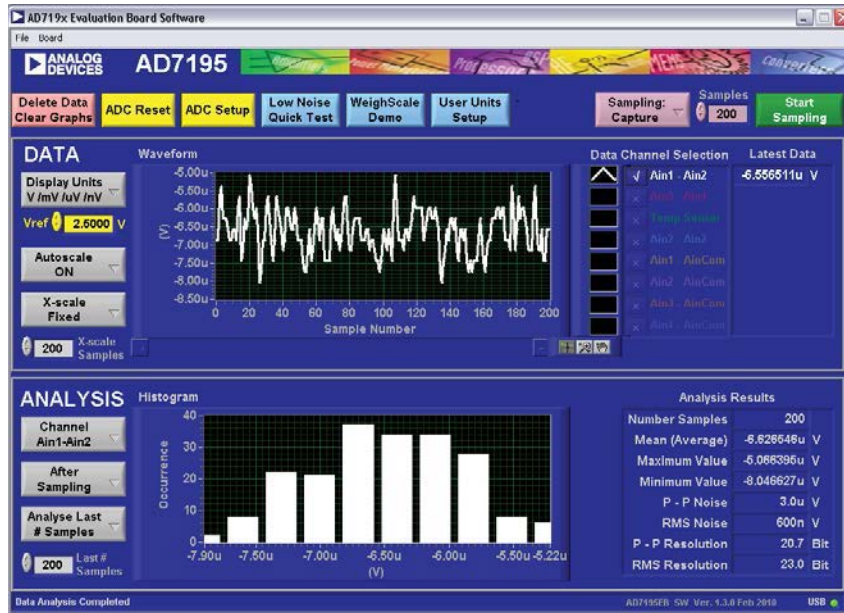


图6. 10 Hz ODR时的噪声结果(内部PGA增益设为1)

采用10 Hz ODR时获得的数据，可以将最大计算噪声值折合到系统的输入端，以得到其大致的灵敏度，即系统所能检测的最小电压变化。由表2可知：

$$V_{IN-Noise} = \frac{\text{预期输出噪声}}{\text{增益}}$$

$$V_{IN-Noise} = \frac{3 \mu\text{V p-p}}{0.2}$$

$$V_{IN-Noise} = 15 \mu\text{V p-p}$$

然后，就可以预测系统将能正确解析其输入端的15 μV 电压变化。由于在增益1下使用AD8421，此结果适用于 $\pm 12.5 \text{ V}$ 输入范围。

显然，执行这些步骤后，灵敏度随着增益的增加而增加。考虑AD8421配置为增益100的情况。在该增益下，输入范围为 $\pm 125 \text{ mV}$ ，信号调理电路的总增益为20。增益为100时的AD8421峰峰值噪声为70 nV p-p。将此数据用于信号调理电路的噪声计算中，则有：

$$\text{噪声}_{PSC} = \sqrt{(0.07 \times 20)^2 + (2.4 \times 0.4)^2 + (2.5 \times 1)^2}$$

$$\text{噪声}_{PSC} = 3 \mu\text{V p-p}$$

将来自ADC的1.2 μV p-p峰峰值噪声纳入计算中，则总预期系统噪声为3.2 μV p-p。

现在可以计算系统灵敏度了：

$$V_{IN-Noise} = \frac{3.2 \mu\text{V p-p}}{20}$$

$$V_{IN-Noise} = 160 \text{ nV p-p}$$

输入范围为 $\pm 125 \text{ mV}$ 时，系统灵敏度为160 nV p-p。它演示了系统增益的增加如何使灵敏度增加。

无噪声分辨率

下列公式可以确定采用AD7195所能达到的无噪声分辨率：

$$\text{无噪声分辨率} = \log_2 \frac{\text{Full-scale range}}{\text{p-p noise}}$$

由于ADC使用了双极性输入，因此满量程范围为基准电压的两倍。将上式代入前面的公式可得：

$$\text{无噪声分辨率} = \log_2 \left(\frac{2 \times 2.5 \text{ V}}{3 \times 10^{-6}} \right)$$

无噪声分辨率也可表示为有效位数(ENOB)，当AD8421配置为单位增益时，ENOB为20.7位。当配置为增益100时，分辨率几乎不变，为20.6位。

不同的采样速率和增益下的分析方法相同，采用该方法同样可获得系统性能的估计值。这些测量结果可让人们了解该电路在所需应用中的性能。

共模抑制

有关灵敏度和分辨率的讨论可以用来表示系统针对内部噪声的性能。共模抑制适合用作系统针对外部噪声的性能品质因数。

与电路的前端部分相同，电路的共模抑制主要由AD8421确定。CMRR表示差分增益与共模增益之比。它还可以通过数学方式表示为：

$$CMRR (dB) = 20 \log A_{diff} \frac{V_{CM}}{V_{OUT}}$$

其中：

A_{diff} 表示差分增益。

V_{CM} 表示放大器输入端的共模电压。

V_{OUT} 表示共模电压对输出电压的贡献。

假设不需要的共模电压在两个输入端均含有10 V p-p信号，并且增益为1时，AD8421的最小CMRR为94 dB。利用这些数据便可求解AD7195输入端的环境噪声贡献。

$$94 \text{ dB} = 20 \log \left[\left(1\right) \frac{10 \text{ V p-p}}{V_{OUT}} \right]$$

$$V_{OUT} = 200 \text{ } \mu\text{V p-p}$$

可以观察到200 $\mu\text{V p-p}$ 输出电压，这是由于AD8421输出端的共模噪声造成的。电路的衰减功能使其下降至40 $\mu\text{V p-p}$ (AD7195的输入端)。

将其与增益配置为100的AD8421进行比较，则参数相同的情况下，ADC输入端的共模噪声依然处于40 $\mu\text{V p-p}$ 的水平，但灵敏度更高。它演示了增益和CMRR的增加如何有助于提升相对外部噪声的灵敏度。

此共模噪声是电源线上最常见的噪声源，而经过前端CMRR大幅抑制后可进一步通过AD7195的串模抑制比(NMRR)加

以衰减。这是因为其数字陷波滤波器可配置为线路频率等于50 Hz和60 Hz时下降。使用AD7195的Sinc4滤波器和10 Hz ODR，可以保证具有高于100 dB的NMRR。40 $\mu\text{V p-p}$ 共模噪声贡献将被衰减至1 nV以下，从而电路有效抑制了线路噪声。

结论

精密信号调理电路可让用户高效提取目标信号，哪怕信号位于高噪声环境中。性能参数(如灵敏度、有效分辨率和稳定的环境噪声抵抗力)可以通过考虑内部噪声和共模抑制估算。这些指标最终决定系统的性能，并协助用户设计工业应用。在接口处使用不同的模数转换器还可进一步优化系统。

参考文献

- AD7195 Data Sheet. 2010. Analog Devices, Inc.
- AD8421 Data Sheet. 2012. Analog Devices, Inc.
- AD8475 Data Sheet. 2011. Analog Devices, Inc.
- AD8510 Data Sheet. 2009. Analog Devices, Inc.
- Kitchin, Charles and Lew Counts. *A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers (3rd ed)*. Analog Devices, Inc.
- Moghimi, Reza. 2010. *Low Noise Signal Conditioning for Sensor-Based Circuits*. MS-2066 Technical Article. Analog Devices, Inc.
- Motchenbacher, C. D. and E. C. Fitchen. 1973. *Low-Noise Electronic Design*. New York: Wiley.
- National Instruments. 2010. *Digital Multimeter Measurement Fundamentals*. Available online from National Instruments.
- Ott, Henry. 1988. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems (2nd ed)*. Wiley.

注释