

# 精密数据采集信号链的噪声分析

Maithil Pachchigar  
ADI公司

## 简介

在很多应用中，模拟前端接收单端或差分信号，并执行所需的增益或衰减、抗混叠滤波及电平转换，之后在满量程电平下驱动ADC输入端。本文探讨精密数据采集信号链的噪声分析，并深入研究这种信号链的总噪声贡献。

如图1所示，低功耗、低噪声、全差分放大器ADA4940-1驱动差分输入、18位、1 MSPS PulSAR® ADC AD7982，同时低噪声精密5 V基准电压源ADR435用来提供ADC所需的5 V电源。此信号链无需额外驱动器级和基准电压缓冲器，简化了模拟信号调理，可节省电路板空间和成本。一个单极点截止频率2.7 MHz RC(22 Ω, 2.7 nF)低通滤波器放在ADC驱动器输出和ADC输入之间，有助于限制ADC输入端噪声，并减少来自逐次逼近型(SAR) ADC输入端容性DAC的反冲。

ADA4940-1用作ADC驱动器时，用户可以进行必要的信号调理，包括对信号实施电平转换和衰减或放大，以便使用四个电阻实现更大动态范围，从而不再需要额外的驱动器级。采用反馈电阻(R2 = R4)对增益电阻(R1 = R3)之比设置增益，其中R1 = R2 = R3 = R4 = 1 kΩ。

对于平衡差分输入信号，等效输入阻抗为2×增益电阻(R1或R3) = 2 kΩ，对于非平衡(单端)输入信号，等效阻抗根据下式计算，约为1.33 kΩ

$$Z = 1 - \frac{R3}{2 \times (R3 + R4)}$$

如果需要可以在输入端并联一个终端电阻。

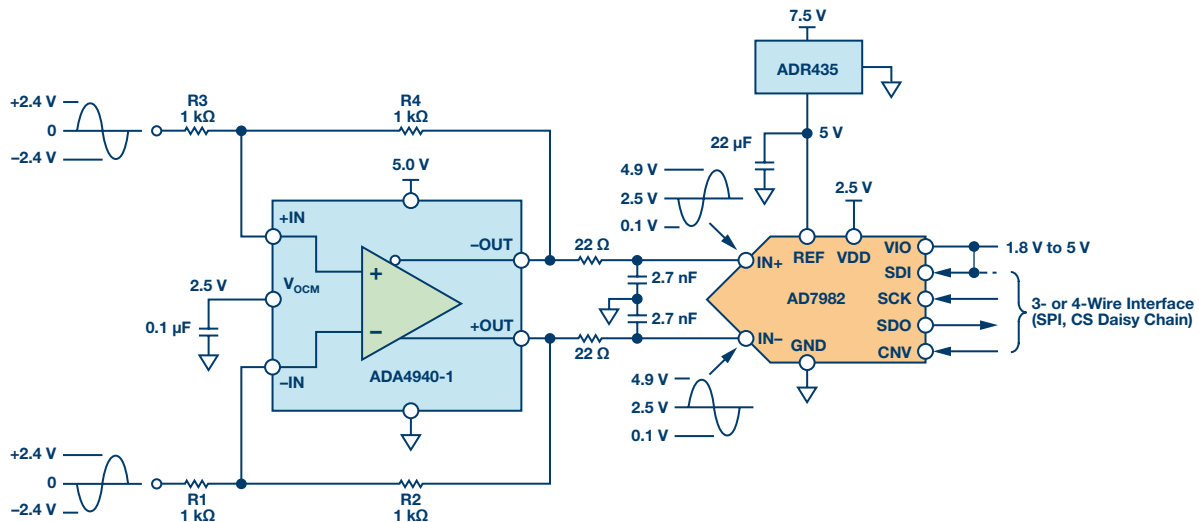


图1 低功耗全差分18位1 MSPS数据采集信号链（简化示意图：未显示所有连接和去耦）。

ADA4940-1内部共模反馈环路强制共模输出电压等于施加到 $V_{OCM}$ 输入的电压,同时提供出色的输出平衡。当两个反馈系数( $\beta_1$ 和 $\beta_2$ )不相等时,差分输出电压取决于 $V_{OCM}$ ;此时,输出幅度或相位的任何不平衡都会在输出端产生不良共模成分,导致差分输出中有冗余噪声和失调。因此,在这种情况下(即, $\beta_1 = \beta_2$ ),输入源阻抗和 $R_1$ ( $R_3$ )的组合应等于 $1\text{ k}\Omega$ ,以避免各输出信号的共模电压失配,并防止ADA4940-1的共模噪声增加。

信号在印刷电路板(PCB)的走线以及长电缆中传输时,系统噪声会叠加到信号中,差分输入ADC会抑制信号噪声,并表现为一个共模电压。

这款18位1 MSPS数据采集系统的预期信噪比(SNR)理论值可通过每个噪声源(ADA4940-1、ADR435和AD7982)的和方根(RSS)计算得到。

ADA4940-1在100 kHz时的低噪声性能典型值为 $3.9\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,如图2所示。

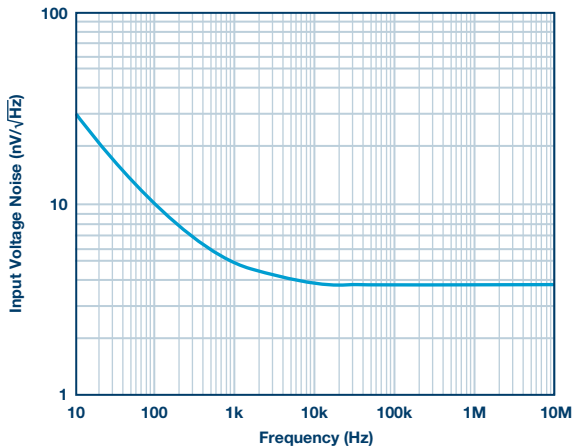


图2. ADA4940输入电压噪声频谱密度和频率的关系。

必须计算差分放大器的噪声增益,以便找到等效输出噪声贡献。

差分放大器的噪声增益为:

$$NG = \frac{2}{(\beta_1 + \beta_2)} = 2\text{ V/V}$$

其中

$$\beta_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.5$$

以及

$$\beta_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 0.5$$

是两个反馈系数。

应当考虑下列差分放大器噪声源:

由于ADA4940-1输入电压噪声为 $3.9\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,其差分输出噪声应当为 $7.8\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。ADA4940-1数据手册中的共模输入电压噪声( $e_{OCM}$ )为 $83\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,因此其输出噪声为

$$-e_{OCM} \times (\beta_1 - \beta_2) \times NG = 0$$

给定带宽条件下, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 和 $R_4$ 电阻噪声可根据约翰逊-奈奎斯特噪声方程计算:

$$e_{Rn} = \sqrt{(4k_B TR)}$$

其中 $k_B$ 是玻尔兹曼常数( $1.38065 \times 10^{-23}\text{ J/K}$ ), $T$ 为电阻绝对温度(开尔文),而 $R$ 为电阻值( $\Omega$ )。

来自反馈电阻的噪声为:

$$e_{R2} = e_{R4} = 4.07\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

来自 $R_1$ 的噪声为:

$$e_{R1} \times (1 - \beta_1) \times NG = 4.07\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

来自 $R_3$ 的噪声为:

$$e_{R3} \times (1 - \beta_2) \times NG = 4.07\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

ADA4940-1数据手册中的电流噪声为 $0.81\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

反相输入电压噪声:

$$iIN- \times R_1 \parallel R_2 \times NG = 0.81\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

同相输入电压噪声:

$$iIN- \times R_3 \parallel R_4 \times NG = 0.81\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

因此,来自ADA4940的等效输出噪声贡献为:

$$= \sqrt{(7.9e - 9)^2 + (0)2 + 4 \times (4.07e - 9)^2 + 2 \times (0.81e - 9)^2} = 11.33\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

(RC滤波器之后)的ADC输入端总积分噪声为:

$$11.33\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{(2.7e6 \times \pi/2)} = 23.26\text{ }\mu\text{V rms}$$

AD7982的均方根噪声可根据5 V基准电压源情况下的典型信噪比(SNR, 98 dB)计算得到。

$$e_{AD7982} = 10^{\left(\frac{-SNR}{20}\right)} \times V_{signal-rms} = 10^{\left(\frac{-98}{20}\right)} \times 3.353\text{ V} = 44.50\text{ }\mu\text{V rms}$$

根据这些数据,ADC驱动器和ADC的总噪声贡献为

$$V_{noise-rms} = \sqrt{(23.26e - 6)^2 + (44.50e - 6)^2} = 50.22\text{ }\mu\text{V rms}$$

注意,本例中忽略来自ADR435基准电压源的噪声贡献,因为它非常小。

因此，数据采集系统的理论SNR可根据下式近似计算。

$$SNR = 20 \times \log\left(\frac{V_{\text{signal-rms}}}{V_{\text{noise-rms}}}\right) = 20 \times \log\left(\frac{3.353 \text{ V}}{50.22 \mu\text{V rms}}\right) = 96.95 \text{ dB}$$

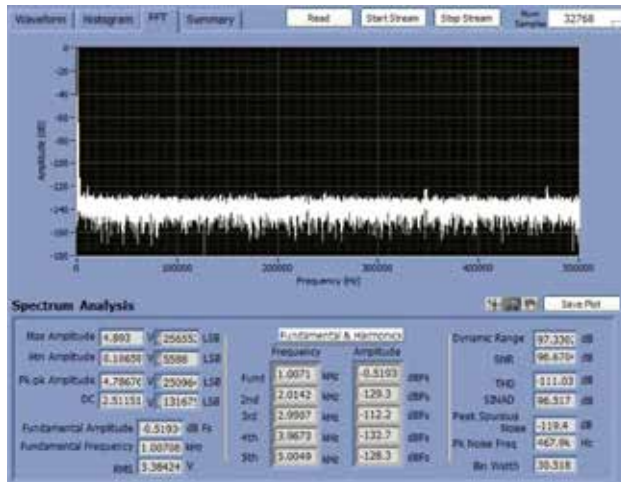


图3. FFT曲线图， $f_{IN} = 1 \text{ kHz}$ ， $FS = 1 \text{ MSPS}$  (将ADA4940-1配置成全差分驱动器)。

AD7982在1 kHz输入信号时，SNR典型值为96.67 dB，THD典型值为-111.03 dB，如图3中的FFT性能所示。这种情况下测得的SNR为96.67 dB，非常接近上文中的96.95 dB SNR理论估算值。数据手册中98 dB的目标SNR的实际损耗由来自ADA4940-1差分放大器电路的等效输出噪声贡献所导致。

针对给定应用选择ADC驱动器以驱动SAR ADC时，噪声是一个重要规格，详细查阅带宽、建立时间、输入和输出上裕量/下裕量以及功耗要求也很重要。有关驱动高分辨率精密PulsAR ADC的推荐放大器的更多信息，请参阅[ADI公司ADC驱动器选型指南](#)。若要设计差分放大器电路，请下载免费且直观易用的[ADI公司DiffAmpCalc™工具](#)。

## 作者简介

Maithil Pachchigar是ADI公司马萨诸塞州威明顿ADI仪器仪表、航空航天与防务业务部的应用工程师。2010年加入ADI公司以来，他致力于仪器仪表、工业、医疗健康和能源行业的精密ADC产品系列工作和客户支持。自2005年以来，Maithil一直在半导体行业工作，并已发表多篇技术文章。Maithil于2003年获印度S.V.国家技术学院电子工程学士学位，2006年获圣何塞州立大学的电气工程硕士学位，2010年获硅谷大学MBA学位。联系方式：[maithil.pachchigar@analog.com](mailto:maithil.pachchigar@analog.com)。

## 在线支持社区

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。



请访问 [ezchina.analog.com](http://ezchina.analog.com)

**全球总部**

One Technology Way  
P.O. Box 9106, Norwood, MA  
02062-9106 U.S.A.  
Tel: (1 781) 329 4700  
Fax: (1 781) 461 3113

**大中华区总部**

上海市浦东新区张江高科技园区  
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼  
邮编: 201203  
电话: (86 21) 2320 8000  
传真: (86 21) 2320 8222

**深圳分公司**

深圳市福田中心区  
益田路与福华三路交汇处  
深圳国际商会中心  
4205-4210 室  
邮编: 518048  
电话: (86 755) 8202 3200  
传真: (86 755) 8202 3222

**北京分公司**

北京市海淀区西小口路 66 号  
中关村东升科技园  
B-6 号楼 A 座一层  
邮编: 100191  
电话: (86 10) 5987 1000  
传真: (86 10) 6298 3574

**武汉分公司**

湖北省武汉市东湖高新区  
珞瑜路 889 号光谷国际广场  
写字楼 B 座 2403-2405 室  
邮编: 430073  
电话: (86 27) 8715 9968  
传真: (86 27) 8715 9931

©2017 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices.  
TA16305sc-0-9/17

[analog.com/cn](http://analog.com/cn)

