

无烦恼，高增益：构建具有纳伏级灵敏度的低噪声仪表放大器

作者：Moshe Gerstenhaber、Rayal Johnson 和 Scott Hunt

简介

构建具有纳伏级灵敏度的电压测量系统会遇到很多设计挑战。目前最好的运算放大器（比如超低噪声 [AD797](#)）可以实现低于 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的噪声性能(1 kHz)，但低频率噪声限制了可以实现的噪声性能为大约 50 nV p-p (0.1 Hz 至 10 Hz 频段内)。过采样和平均可以降低宽带噪声的 rms 贡献，但代价是牺牲了更高的数据速率，且功耗较高，但过采样不会降低噪声频谱密度，同时它对 1/f 区内的噪声无影响。此外，为避免来自后级的噪声贡献，就需要采用较大的前端增益，从而降低了系统带宽。如果没有隔离，那么所有的接地反弹或干扰都会出现在输出端，并有可能破坏放大器及其输入信号的低内部噪声的局面。表现良好的低噪声仪表放大器可以简化设计，并降低共模电压、电源波动和温度漂移引起的残留误差。

低噪声仪表放大器 [AD8428](#) 提供 2000 精确增益，具备解决这些问题所必须的一切特性。AD8428 具有 5 ppm/°C 最大增益漂移、0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 最大失调电压漂移、140 dB 最小 CMRR 至 60 Hz (120 dB 最小值至 50 kHz)、130 dB 最小 PSRR 和 3.5 MHz 带宽，适合低电平测量系统。

最引人注目的是该器件的 $1.3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 电压噪声(1 kHz)和 40 nV p-p

噪声 (0.1 Hz 至 10 Hz) 性能，在极小信号下具有高信噪比。两个额外的引脚可让设计人员改变增益或增加滤波器来降低噪声带宽。这些滤波器引脚还提供了降低噪声的独特方法。

使用多个 AD8428 仪表放大器降低系统噪声

图 1 显示的电路配置可进一步降低系统噪声。四个 AD8428 的输入和滤波引脚互相短接，降低噪声至原来的二分之一。

可以使用任意一个仪表放大器的输出来保持低输出阻抗。此电路可以扩展从而降低噪声，降低的倍数为所用放大器数的平方根。

电路如何降低噪声

每一个 AD8428 产生 $1.3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 折合到输入(RTI)的典型频谱噪声，该噪声与其他放大器产生的噪声不相关。不相关的噪声源以方和根(RSS)的方式叠加到滤波器引脚。另一方面，输入信号为正相关。每一个 AD8428 都响应信号在滤波器引脚上生成相同的电压，因此连接多个 AD8428 不会改变电压，增益保持为 2000。

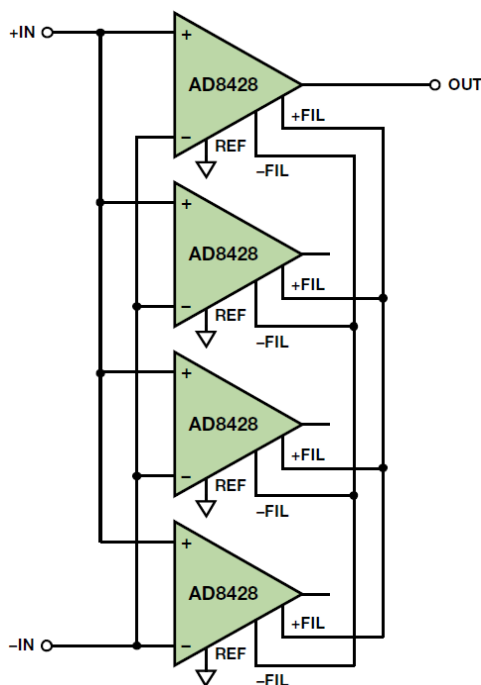


图 1. 使用四个 AD8428 仪表放大器的降噪电路

噪声分析

针对图 2 电路简化版本的分析表明，将两个 AD8428 以此方式连接可以降低噪声，降低的倍数为 $\sqrt{2}$ 。每一个 AD8428 的噪声都可以在 +IN 引脚上建模。为了确定总噪声，可以将输入接地，并使用叠加来组合噪声源。

噪声源 e_{n1} 经 200 差分增益放大，并到达前置放大器 A1 的输出端。就这部分的分析而言，输入接地时，前置放大器 A2 的输出端无噪声。前置放大器 A1 每个输出端与相应前置放大器 A2 输出端之间的 $6\text{ k}\Omega/6\text{ k}\Omega$ 电阻分频器可以采用戴维宁等效电路替代：前置放大器 A1 输出端噪声电压的一半以及一个 $3\text{ k}\Omega$ 串联电阻。这部分就是降低噪声的机制。完整的节点分析表明，响应 e_{n1} 的输出电压为 $1000 \times e_{n1}$ 。由于对称，因此响应噪声电压 e_{n2} 的输出电压为 $1000 \times e_{n2}$ 。 e_{n1} 和 e_{n2} 幅度都等于 e_n ，并且将作为 RSS 叠加，导致总输出噪声为 $1414 \times e_n$ 。

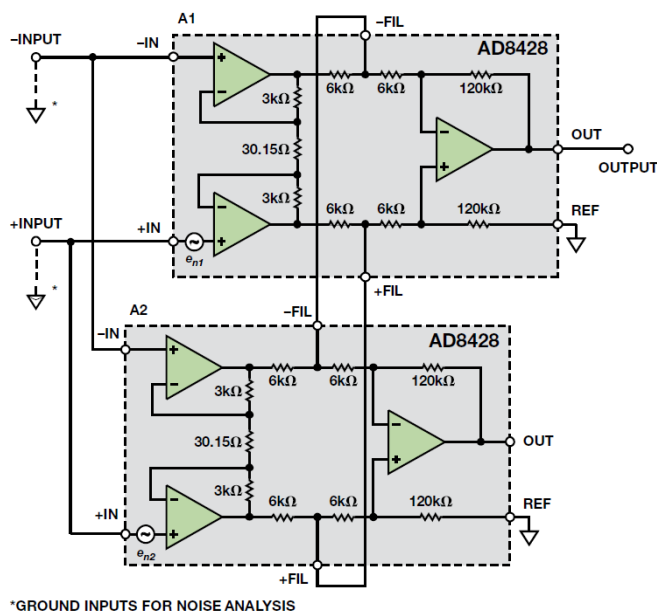


图 2. 噪声分析简化电路模型

为了将其折合回输入端，就必须验证增益。假设在 +INPUT 和 -INPUT 之间施加差分信号 V_{IN} 。A1 第一级输出端的差分电压等于 $V_{IN} \times 200$ 。同样的电压出现在前置放大器 A2 的输出端，因此没有分频信号进入 $6\text{ k}\Omega/6\text{ k}\Omega$ 分频器，并且节点分析表明输出为 $V_{IN} \times 2000$ 。因此，总电压噪声 RTI 为 $e_n \times 1414/2000$ ，等效于 $e_n/\sqrt{2}$ 。使用 AD8428 的 $1.3\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 典型噪声密度，则两个放大器配置所产生的噪声密度约为 $0.92\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

使用额外的放大器之后，滤波器引脚处的阻抗发生改变，进一步降低噪声。例如，如图 1 所示使用四个 AD8428，则前置放大器输出端到滤波器引脚之间的 $6\text{ k}\Omega$ 电阻后接三个 $6\text{ k}\Omega$ 电阻，分别连接每一个无噪声前置放大器的输出端。这样便有效地创建了 $6\text{ k}\Omega/2\text{ k}\Omega$ 电阻分频器，将噪声进行四分频处理。因此，正如预测的那样，四个放大器的总噪声便等于 $e_n/2$ 。

进行噪声与功耗的权衡取舍

主要的权衡取舍来自功耗与噪声。AD8428 具有极高的噪声-功耗效率，输入噪声密度为 $1.3\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (6.8 mA 最大电源电流)。为了进行对比，考虑低噪声 AD797 运算放大器——该器件需要 10.5 mA 最大电源电流来达到 $0.9\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。一个分立式 $G = 2000$ 低噪声仪表放大器采用两个 AD797 运算放大器和一个低功耗差动放大器构建，需要使用 21 mA 以上电流，实现两个运算放大器和一个 $30.15\text{ }\Omega$ 电阻贡献的 $1.45\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 噪声 RTI 性能。

除了很多放大器并联连接使用的电源考虑因素外，设计人员还必须考虑热环境。采用 $\pm 5\text{ V}$ 电源的单个 AD8428 因内部功耗会使温度上升约 8°C 。如果很多器件靠近放置，或者放置在封闭空间，则它们之间会互相传导热量，需考虑使用热管理技术。

SPICE 仿真

SPICE 电路仿真虽然不能代替原型制作，但作为验证此类电路构想的第一步很有用。若要验证此电路，可以使用 ADIsimPE 仿真器和 AD8428 SPICE 宏模型仿真两个器件并联时的电路性能。图 3 中的仿真结果表明该电路的表现与预期一致：增益为 2000，噪声降低 30%。

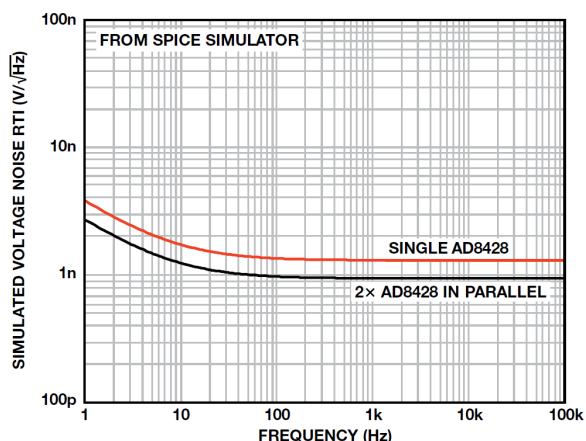


图 3. SPICE 仿真结果

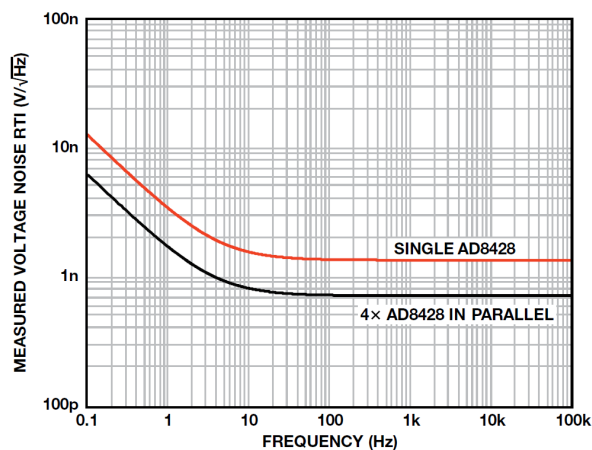


图4. 图1 中电路的电压噪声频谱测量值

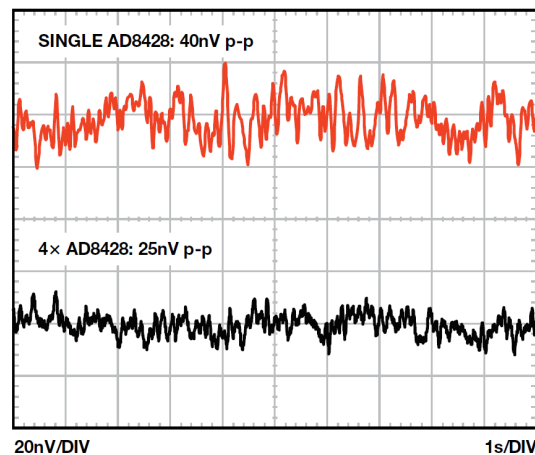


图5. 图1 中电路测得的0.1 Hz 至10 Hz RTI 噪声

测量结果

在工作台上测量四个 AD8428 组成的完整电路。测得的 RTI 噪声频谱密度为 $0.7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1 kHz), 0.1 Hz 至 10 Hz 范围内具有 25 nV p-p。这比很多纳伏电压表的噪声都要更低。测得的噪声频谱和峰峰值噪声分别如图 4 和图 5 所示。

结论

纳伏级灵敏度目标非常难以达成，会遇到很多设计挑战。对于需要低噪声和高增益的系统，AD8428 仪表放大器具有实现高性能设计所需的特性。此外，该器件独特的配置允许将这个不寻常的电路加入其纳伏级工具箱内。

参考文献

MT-047 指南：运算放大器噪声。

MT-048 指南：运算放大器噪声关系：1/f 噪声、均方根(RMS)噪声与等效噪声带宽。

MT-049 指南：单极点系统的运算放大器总输出噪声计算。

MT-050 指南：二阶系统的运算放大器总输出噪声计算。

MT-065 指南：仪表放大器噪声。



Moshe Gerstenhaber [moshe.gerstenhaber@analog.com]是 ADI 公司研究员。他于 1978 年加入 ADI，数年间先后担任过制造、产品工程及设计方面的多种高级职务。Moshe 目前是集成放大器产品部门的设计经理。他在放大器设计领域做出了重大贡献，特别是极高精度专用放大器，如仪表放大器和差分放大器。



Moshe Gerstenhaber

该作者的其它文章：

[多功能低功耗精密单端转差分转换器](#)

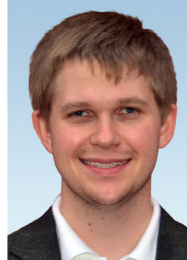
第 46 卷，第 4 期

Royal Johnson [royal.johnson@analog.com]是马萨诸塞州威明顿市线性产品部门的设计工程师。Royal 获得麻省理工学院学士和硕士学位后，于 2006 年加入 ADI 公司。Royal 专注于集成精密放大器技术工作，包括仪表放大器、热电偶放大器和高/低电压差动放大器。



Royal Johnson

Scott Hunt [scott.hunt@analog.com]是马萨诸塞州威明顿市线性产品部门的产品应用工程师。他获得伦斯勒理工学院电气工程学士学位后，于 2011 年加入 ADI。Scott 专注于集成精密放大器技术工作，包括仪表放大器、差分放大器和热电偶放大器。



Scott Hunt

该作者的其它文章：

[如何在对电桥传感器进行电路设计时避免陷入困境](#)

第 48 卷，第 1 期