

(Part 2)

## 传感器电路的低噪声信号调理

作者: Reza Moghimi  
 reza.moghimi@analog.com  
 ADI 公司

随着模数转换器和数模转换器分辨率的提高以及电源电压的降低，最低有效位 (LSB) 变得更小，这使得信号调理任务变得更加困难。由于信号大小更接近于本底噪声，因此，必须对外部和内部噪声源 (包括 Johnson、散粒、宽带、闪烁和 EMI) 进行处理。

不相关的噪声源采用和的平方根 (RSS) 的形式进行叠加:

$$E_{N\_total} = \sqrt{E^2_{N1} + E^2_{N2}}$$

另一方面，其它相关噪声源，如输入偏置电流消除等，必须采用带有相关因子的 RSS 形式进行叠加。

$$E_{N\_total} = \sqrt{E^2_{N1} + E^2_{N2} + 2CE_{N1}E_{N2}}$$

图 1 所示的是典型信号调理电路中的噪声源，以及可用于反相、同相、差分及其它通用配置的通用公式。

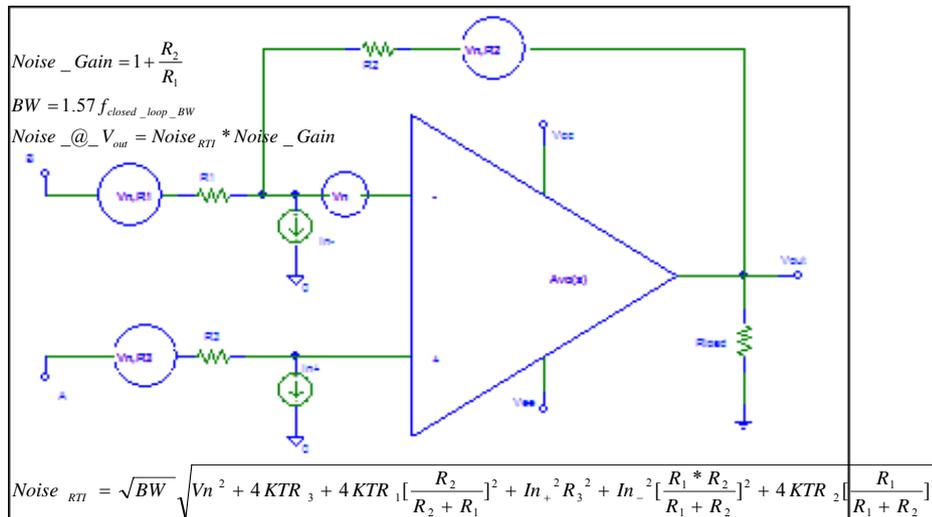


图 1: 噪声源包含运算放大器的输入电压噪声和输入电流噪声，以及外部电阻的 Johnson 噪声。

## 正确的设计方法

从传感器及其特征噪声、阻抗、响应和信号幅度入手，实现最低的折合到输入端（RTI）噪声将能够优化信噪比（SNR）。

与先解决增益和功耗需求、然后再努力应对噪声问题的方法相比，围绕着低噪声来解决问题将更加有效。这是一个重复的过程，首先考虑放大器的工作区：宽带或  $1/f$ 。接着，挑选合适的有源器件，设计最佳的噪声特性。在放大器周围放置无源器件，并限制带宽。然后分析非噪声需求，如输入阻抗、电源电流和开环增益。如果没有达到噪声指标，则重复这一过程，直到获得可以接受的解决方案为止。

## 运算放大器的选择

在一些情况下，宽带噪声为  $22 \text{ nV}/\sqrt{\text{rt-Hz}}$  的运算放大器可能优于宽带噪声为  $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{rt-Hz}}$  的器件。如果传感器工作在极低的频率下，那么，具有低  $1/f$  噪声的放大器可能是最好的。ADI 公司的 OP177 等标准放大器的噪声频谱密度类似于图 2 左侧的曲线。而自稳零放大器能连续校准输入端随时间和温度的变化而出现的任意误差。由于  $1/f$  噪声渐进的逼近直流，放大器也能校准这一误差。图 2 中间的图示出，第一代自稳零放大器不表现出  $1/f$  噪声，因而适用于低频传感器信号调理。图 2 右侧的图示出，第二代自稳零放大器具有较低的宽带噪声（ $22 \text{ nV}/\sqrt{\text{rt-Hz}}$ ），通过 PSpice 宏模型能精确的仿真放大器电压噪声，显示出  $1/f$  噪声已被消除。

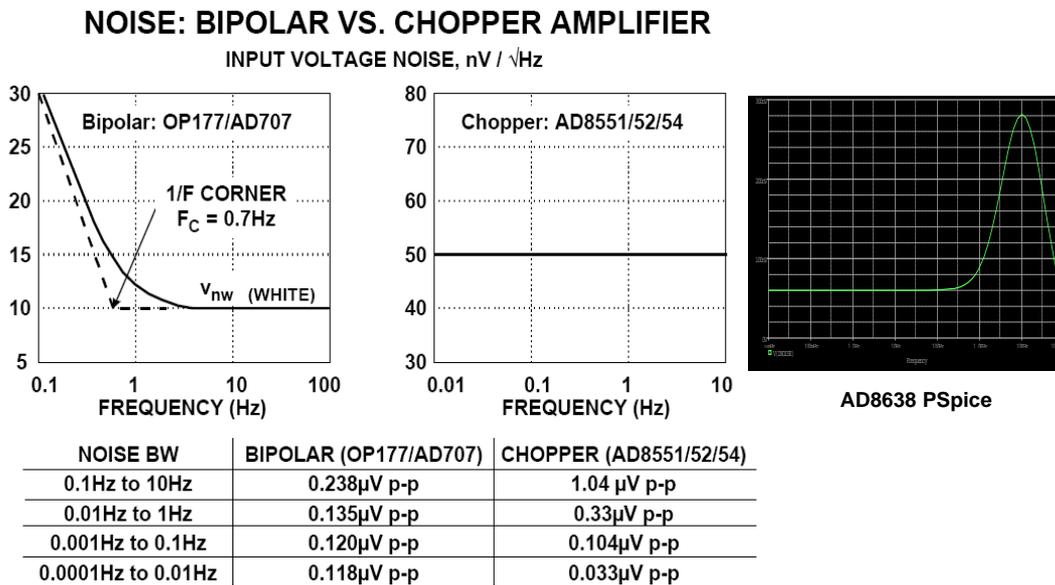


Figure 3.48

图2：ADI 公司的 OP177 和 AD707 等标准放大器在低频表现出 1/f 噪声 (a)。ADI 公司的 AD8551/52/54 等自稳零 (斩波) 放大器没有 1/f 噪声 (b)。Pspice 能对 AD8638 自动调零放大器的行为进行精确建模 (c)。

图中：NOISE: BIPOLAR VS. CHOPPER AMPLIFIER-噪声：双极性与斩波放大器的比较；INPUT VOLTAGE NOISE-输入电压噪声；BIPOLAR-双极性；CORNER-拐点；FREQUENCY-频率；Chopper-斩波；NOISE BW：噪声带宽

### 轨到轨输入

对于低压设计来说，轨到轨 (RR) 输出和输入可能是适合的。当共模输入从一条轨转到另一条轨时，一个差分输入对停止工作，另一个差分输入对则接着工作。失调电压和输入偏置电流可能突然变化，引起如图 3 所示的失真。对于低噪声设计来说，请检查对轨到轨输入特性的需求。

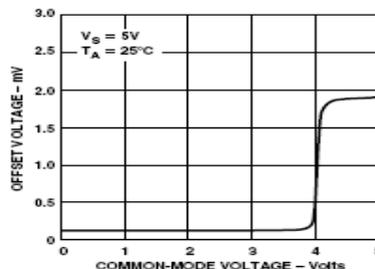


图3：当共模输入电压改变时，轨到轨放大器的输入失调电压会急剧变化。

图中：COMMON-MODE VOLTAGE-共模电压；OFFSET VOLTAGE-失调电压

为了解决这个问题，ADI 公司的 AD8506 等运算放大器使用内部电荷泵来消除输入电压交越失真。如果设计不正确，而使电荷泵产生的噪声落入有用频带时，这些噪声将会出现在输出端，引起问题。请在输出引脚使用频谱分析仪来确保时钟幅度远低于信号幅度。

### 偏置电流消除

最新的双极性运算放大器使用一种技术来消除输入偏置电流造成的部分影响，这个技术会增加不相关或相关的电流噪声。对于一些放大器来说，相关噪声可能大于不相关噪声。例如，为 ADI 公司的 OP07 增加阻抗平衡电阻，就能改进整体噪声。表 1 比较了 ADI 公司两款广泛应用的运算放大器，一款是用较高电压噪声换取较低电流噪声的 OP07，另一款是 OP27。

| 参数       | 条件             | OP07E | OP27E | 单位     |
|----------|----------------|-------|-------|--------|
| 输入失调电流   |                | 0.5   | 7.0   | nA     |
| 输入偏置电流   |                | ±1.2  | ±10   | nA     |
| 输入噪声电压   | 0.1 Hz 至 10 Hz | 0.35  | 0.08  | μV p-p |
| 输入噪声电压密度 | f = 1 kHz      | 9.6   | 3.0   | nV/√Hz |
| 输入噪声电流密度 | f = 1 kHz      | 0.12  | 0.4   | pA/√Hz |

表 1

从可获得的低噪声器件中选择三到四个器件。考虑工艺技术，寻找自稳零、斩波和偏置电流消除等专业设计技术。从晶圆照片查看输入晶体管区域，请记住，大输入晶体管的噪声较低，但具有大输入电容，而 CMOS 和 JFET 放大器的电流噪声远小于双极性器件。低噪声设计要使用小电阻，所以放大器输出驱动必须足够大，以驱动大负载。

### 无源元件的选择

选择放大器之后，在放大器周围放置合适的电阻和电容，而这些元件也有噪声。图 4 所示的是使用错误的电阻值所造成的影响。输出噪声随着用于设置增益的电阻的增大而增大。图 4 中三种情形的增益都是 1000。

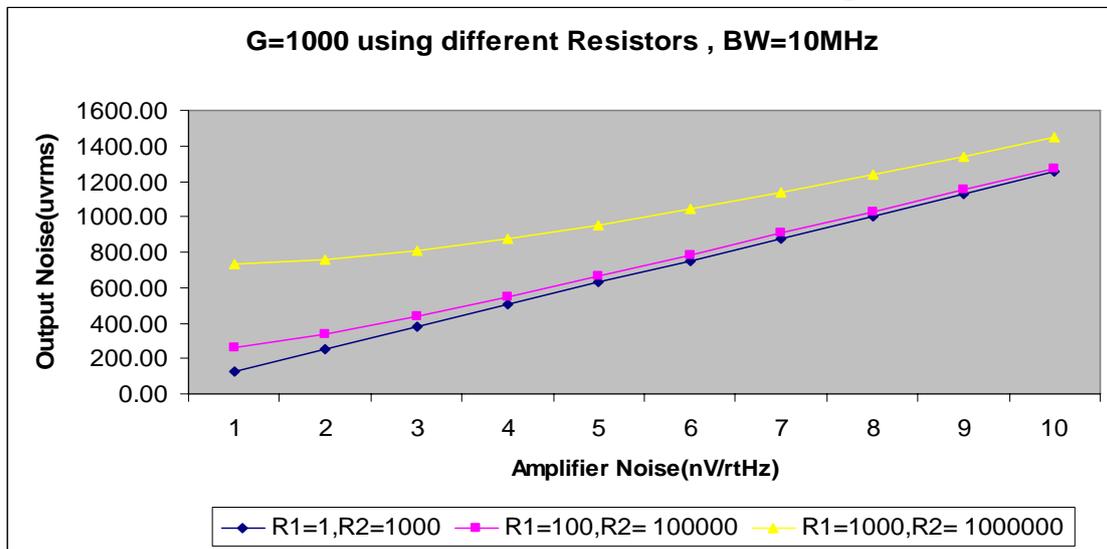


图4：使用低电阻保持低输出噪声。

图中：Amplifier Noise—放大器噪声；Output Noise—输出噪声；G=1000 using different Resistors-G=1000，使用不同电阻。

了解传感器的特性是非常重要的。忽略 R1 和 R2 的噪声，集中考虑源阻抗 R 的噪声，图 6 显示出当 R 值较小时，电压噪声占主导地位；当 R 值为中等大小时，Johnson 噪声占主导；当 R 值较大时，电流噪声的贡献较大。因此，低输出阻抗的传感器应该使用小电阻和具有低电压噪声的运算放大器。

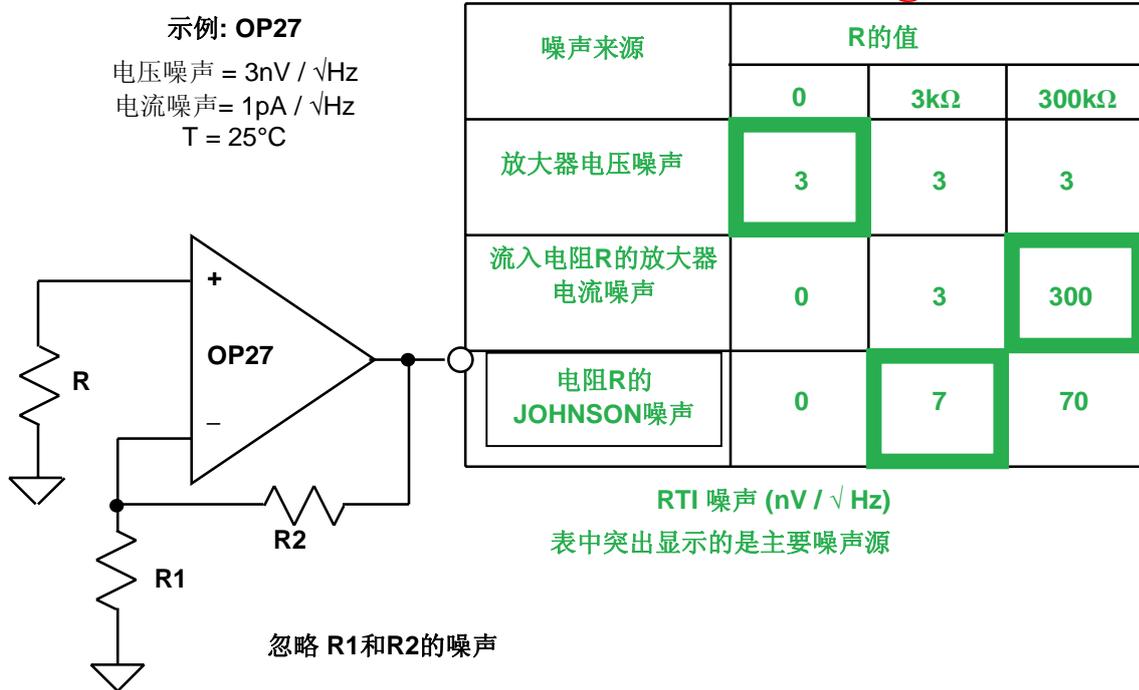


图5: 小电阻时, 电压噪声占主导地位; 中等电阻时, John 噪声占主导; 大电阻时, 电流噪声的贡献较多。

除电阻之外, 电容也能用于补偿和减小噪声。电抗元件不增加任何噪声, 但流经它们的噪声电流将产生噪声电压, 影响计算。总之, 重要的是在放大器周围使用低阻抗来降低电流噪声、热噪声和 EMI 杂散干扰拾取的影响。

## 带宽选择

选择好放大器以及相关的电阻和电容之后, 下一步是设计最佳带宽 (BW)。请注意, 不要设计过宽的带宽, 带宽应该足够通过基频和重要的谐波, 但不要过宽。选择具有足够带宽的放大器, 在其后放置 RC 滤波器, 放大器本身也是单极点滤波器。放大器和电阻在带宽范围内都有噪声, 因此, 带宽越大, 输出噪声越大, SNR 越低。

图 6 所示的是在与前面具有相同配置的电路中使用具有不同带宽的放大器时, 放大器带宽与噪声之间的关系。为限制附加的噪声, 带宽应该尽可能的窄。

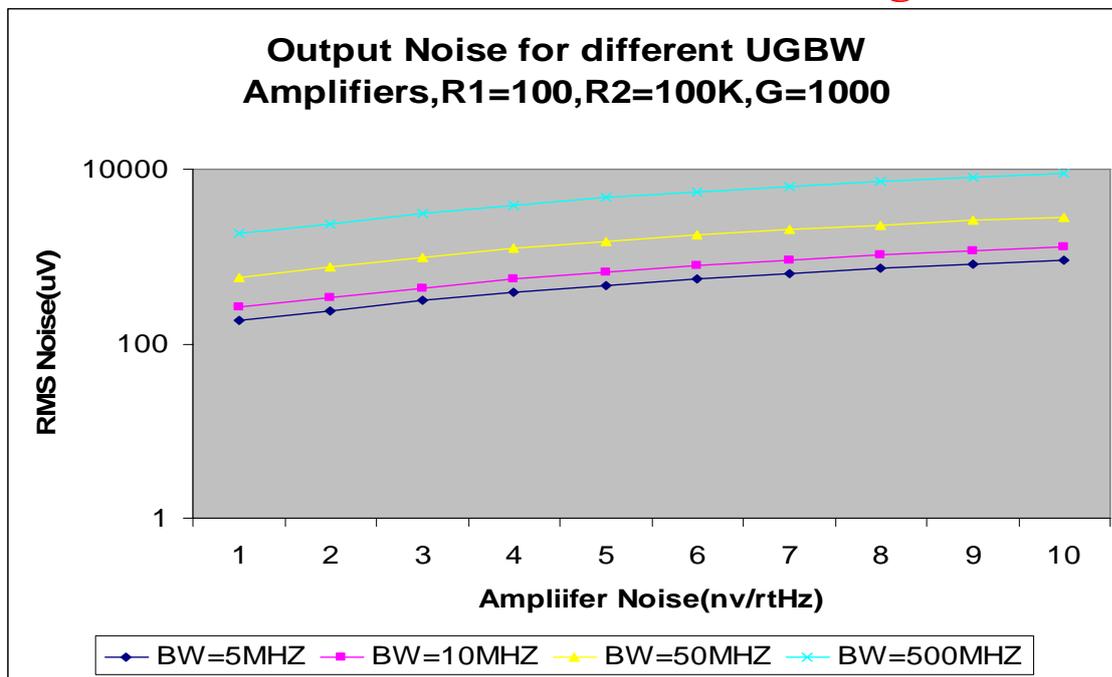


图6: 输出电压噪声随着放大器带宽的增加而增大

图中: Output Noise for different UGBW Amplifiers-不同 UGBW 放大器的输出噪声

为限制带宽, 请在传感器之后使用 RC 滤波器, 产生的负载问题可使用缓冲器来解决, 如图 7 所示。

具有所示规格和配置的放大器 (放大器带宽为 350MHz) 和 ADC 将具有 166  $\mu\text{V}$  rms 的噪声。在运算放大器之后增加 RC 滤波器后, 将产生 50MHz 的有效带宽, 能把噪声降低到 56  $\mu\text{V}$  rms。

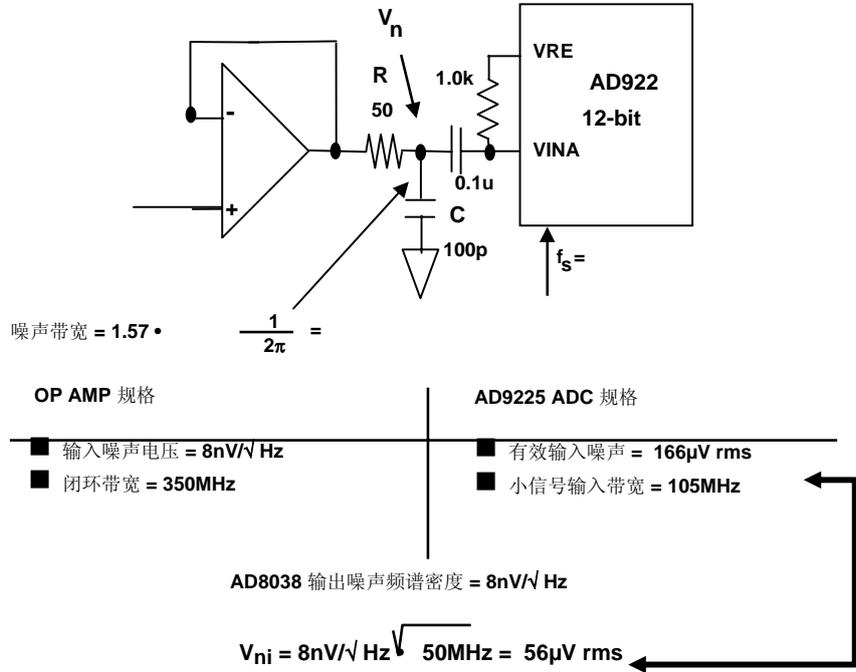
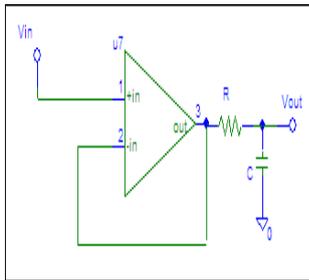
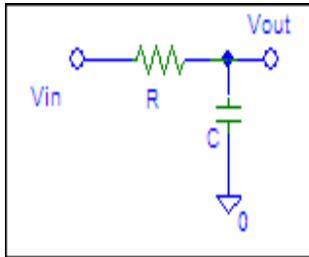
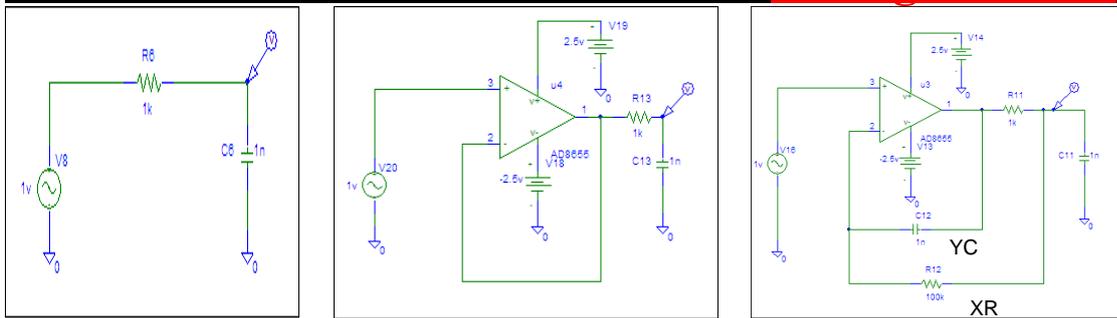


图7：在传感器和滤波器之间加入缓冲器来避免负载问题。

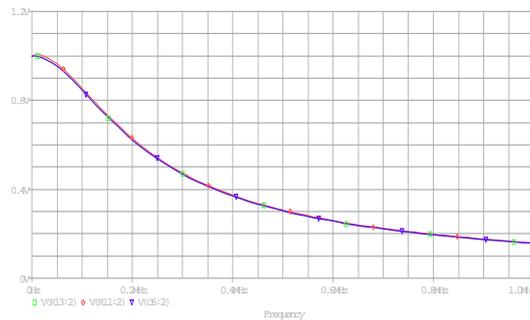
如图 7 所示，使用正确的 RC 减小带宽能极大的提高 SNR，但是电阻本身会增加噪声。降低带宽的另一个更好的办法是使用如图 8c 所示的电路，它把电阻放入运算放大器的反馈环路中，将其影响降低  $(1+\text{环路增益})$  倍，不要忘了在电源引脚使用足够的去耦电容来降低信号路径的电源噪声。



$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{XY}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{XY}}{(X+1)Y}$$

X & Y are constants



Response of all above ckts is the same

图 8: 简单的 RC 滤波器 (a)。缓冲器可减小负载 (b)。将电阻放入反馈环路, 可减小噪声 (c)。

图中: Response of all above ckts is the same—上面所有电路的响应均相同; X & Y are constants—X 和 Y 是常数

在进行完这些步骤之后, 再检查其它的系统需求, 比如:

所选的器件是否满足其它目标规格?

放大器是否需要采用双电源供电?

是否有正电源?

放大器的功耗是否太大?

器件是否太过昂贵?

如果有需求不能满足, 请返回第 1 步, 重复这个设计过程。

## 结论

每个传感器都有其噪声、阻抗和响应特性, 因此, 将这些特性匹配到模拟前端是非常重要的。正确定义的低噪声设计步骤能用于解决当今应用中的许多挑战, 以获得最佳 SNR。这个重复的过程将产生最适合目前挑战性应用的信号调理方案。

## ◆ 参考文献

欲了解关于这个话题的低功耗在线讨论会，请访问：

<http://www.analog.com/en/content/0,2886,759%255F786%255F109826%255F0,00.html#seminars>

- ◆ Brokaw, Paul, “AN-202 An IC Amplifier User’s Guide to Decoupling, Grounding, and Making Things Go Right for a Change” [www.analog.com](http://www.analog.com)
- ◆ Sheingold, D.H. and Smith, Lewis, “AN-358 Noise and Operational Amplifier Circuits” [www.analog.com](http://www.analog.com)
- ◆ Lee, Paul, “AN-940 Low Noise Amplifier Selection Guide for Optimal Noise Performance” [www.analog.com](http://www.analog.com)
- ◆ Bryant, James Bryant and Lew Counts. 1990. “Op Amp Issues – Noise,” Analog Dialogue. Analog Devices Inc. (24-2).
- ◆ Motchenbacher, C. D., and J. A. Connelly. 1993. *Low-Noise Electronic System Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Reza Moghimi 现任 ADI 公司精密模拟产品部应用工程经理。他拥有圣何塞州立大学 (SJSU) BSEE 和 MBA 学位。加入 ADI 公司之前，Reza 曾在 Raytheon Corp、Siliconix Inc. 以及 Precision Monolithic Inc (PMI) 工作过。