

# 了解及消除 1/f 噪声

[Robert Kiely](#)

## 简介

本文阐释 1/f 噪声是什么，以及在精密测量应用中如何降低或消除该噪声。1/f 噪声无法被滤除，在精密测量应用中它可能是妨碍实现最佳性能的一个限制因素。

## 什么是 1/f 噪声？

1/f 噪声是一种低频噪声，其噪声功率与频率成反比。人们不仅在电子装置中观测到 1/f 噪声，在音乐、生物学乃至经济学中也观察到这种噪声<sup>1</sup>。关于 1/f 噪声的来源仍存在很大争议，人们就此仍在开展研究<sup>2</sup>。

在图 1 所示 [ADA4622-2](#) 运算放大器的电压噪声频谱密度中，我们可以看到有两个不同的区域。图 1 左边是 1/f 噪声区，右边是宽带噪声区。1/f 噪声和宽带噪声之间的交越点称为 1/f 转折频率。

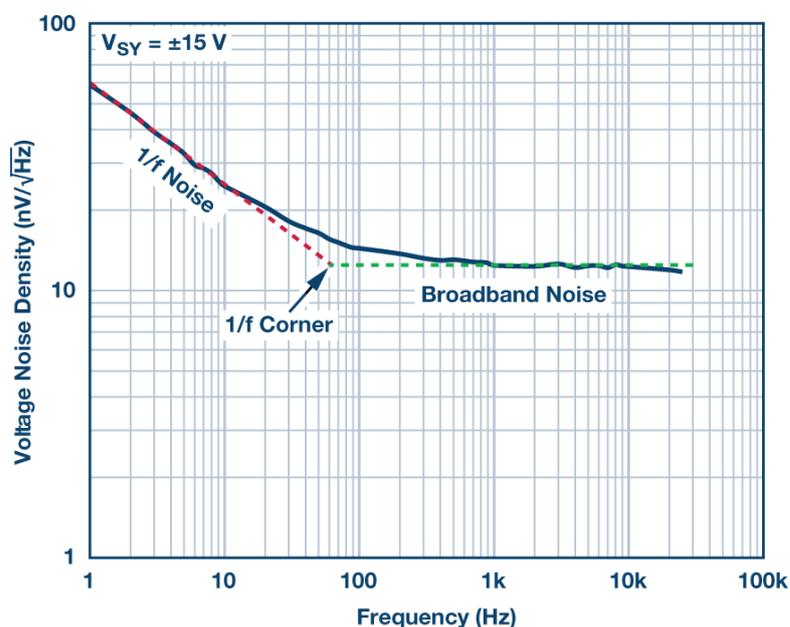


图 1. ADA4622-2 电压噪声频谱密度

## 如何测量及规定 1/f 噪声？

比较若干运算放大器的噪声密度曲线之后，可以得知每种产品的 1/f 转折频率是不同的。为了便于比较器件，当测量各器件的噪声时，我们需要使用相同带宽。

针对低频电压噪声，标准规格是 0.1 Hz 至 10 Hz 峰峰值噪声。对于运算放大器，0.1 Hz 至 10 Hz 噪声可利用图 2 所示电路来测量。

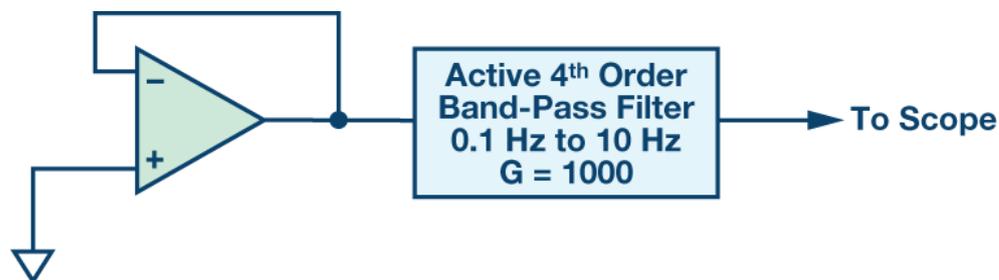


图 2. 低频噪声测量

运算放大器放在为单位增益配置，同相输入端接地。运算放大器由双电源供电，这样输入端和输出端可以与地电位相同。

有源滤波器模块限制所测量的噪声带宽，同时为来自运算放大器的噪声提供 1000 倍增益，从而确保来自待测器件的噪声是主要噪声源。运算放大器的失调不重要，因为滤波器输入为交流耦合。

滤波器输出连接到示波器，并测量 10 秒的峰峰值电压，以确保捕捉到完整的 0.1 Hz 至 10 Hz 带宽（1/10 秒 = 0.1 Hz）。示波器上显示的结果随后除以 1000 倍增益，以计算 0.1 Hz 至 10 Hz 噪声。图 3 显示了 ADA4622-2 的 0.1 Hz 至 10 Hz 噪声。ADA4622-2 的 0.1 Hz 至 10 Hz 噪声非常低，典型值仅为  $0.75 \mu\text{V p-p}$ 。

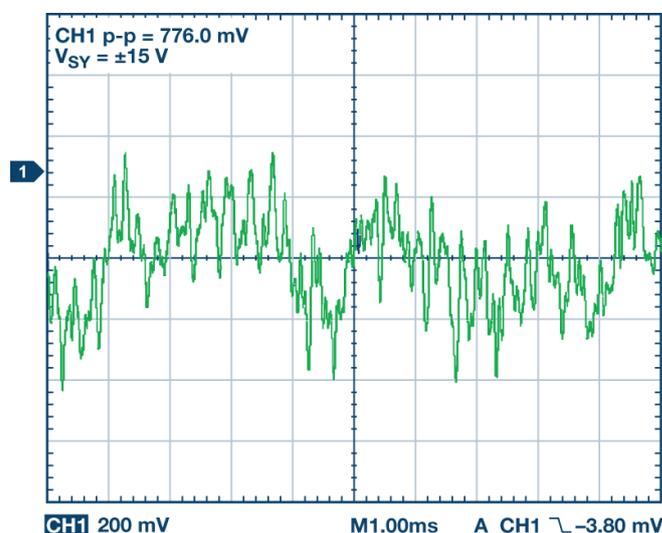


图 3. 0.1 Hz 至 10 Hz 噪声， $V_{SY} = \pm 15 \text{ V}$ ， $G = 1000$

### 1/f 噪声对电路有何影响？

系统的总噪声是系统中各器件的 1/f 噪声和宽带噪声之和。无源器件有 1/f 噪声，电流噪声也有 1/f 噪声成分。但对于低电阻，1/f 噪声和电流噪声通常非常小，故不予以考虑。本文仅聚焦于电压噪声。

为了计算系统总噪声，我们先计算 1/f 噪声和宽带噪声，再将其合并。如果使用 0.1 Hz 至 10 Hz 噪声规格来计算 1/f 噪声，那么我们假定 1/f 转折频率低于 10 Hz。如果 1/f 转折频率高于 10 Hz，那么我们利用下式<sup>3</sup>估算 1/f 噪声：

$$\frac{1}{f} \text{Noise}_{rms} = e_{n_{1\text{Hz}}} \left( \sqrt{\ln\left(\frac{f_h}{f_l}\right)} \right)$$

其中：

$e_{n_{1\text{Hz}}}$  为 1 Hz 时的噪声密度，

$f_h$  为 1/f 噪声转折频率，

$f_l$  为 1/孔径时间。

例如，若要估算 ADA4622-2 的 1/f 噪声，则  $f_h$  约为 60 Hz。我们设置  $f_l$  等于 1/孔径时间。孔径时间为总测量时间。如果设置孔径时间或测量时间为 10 秒，则  $f_l$  为 0.1 Hz。1 Hz 时的噪声密度  $e_{n_{1\text{Hz}}}$  约为 55 nV/√Hz。因此，0.1 Hz 到 60 Hz 的噪声结果为 139 nV<sub>rms</sub>。为将此值转换为峰峰值，应乘以 6.6，故峰峰值噪声约为 0.92 μV p-p<sup>4</sup>。这比 0.1 Hz 至 10 Hz 规格高出约 23%。

宽带噪声可用下式计算：

$$\text{Noise}_{rms} = e_n \left( \sqrt{\text{NEBW}} \right)$$

其中：

$e_n$  为 1 kHz 时的噪声密度，

$\text{NEBW}$  为噪声等效带宽

噪声等效带宽要考虑滤波器逐步滚降引起的超出滤波器截止频率的额外噪声。噪声等效带宽取决于滤波器极点数和滤波器类型。对于简单的单极点低通巴特沃兹滤波器，NEBW 为 1.57 x 滤波器截止频率。

ADA4622-2 在 1 kHz 时的宽带均方根噪声仅为 12 nV/√Hz。输出端使用一个截止频率为 1 kHz 的简单 RC 滤波器，宽带均方根噪声约为 475.5 nV<sub>rms</sub>，可计算如下：

$$\text{WB Noise}_{rms} = 12 \text{ nV} \left( \sqrt{1 \text{ kHz} \times 1.57} \right)$$

注意，简单低通 RC 滤波器具有与单极点低通巴特沃兹滤波器相同的传递函数。

为了获得总噪声，我们必须将  $1/f$  噪声和宽带噪声相加。为此我们可以使用和方根方法，因为这些噪声源是不相关的。

$$Total\ Noise_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{f} Noise_{rms}\right)^2 + \left(WB\ Noise_{rms}\right)^2}$$

利用此等式，我们可以计算 ADA4622-2 输出端采用一个简单 1 kHz 低通 RC 滤波器时的总均方根噪声为 495.4 nVrms。此噪声仅比宽带噪声高出 4%。从这个例子可以清楚地知道， $1/f$  噪声仅影响测量频率从 DC 到极低带宽的系统。一旦比  $1/f$  转折频率高出大约 10 倍或更多， $1/f$  噪声对总噪声的贡献就会变得微不足道。

噪声以和方根相加，如果较小噪声源比较大噪声源的大约  $1/5$  还低，那么我们可以决定忽略较小噪声源，因为低于  $1/5$  的噪声源对总噪声的贡献只有大约 1%<sup>5</sup>。

### 如何消除或降低 $1/f$ 噪声？

斩波稳定或斩波是一种降低放大器失调电压的技术。由于  $1/f$  噪声是接近 DC 的低频噪声，所以这种技术也能有效降低  $1/f$  噪声。斩波稳定的工作原理如下：对输入级的输入信号进行交替或斩波，然后再对输出级的信号进行斩波。这相当于利用正弦波进行调制。

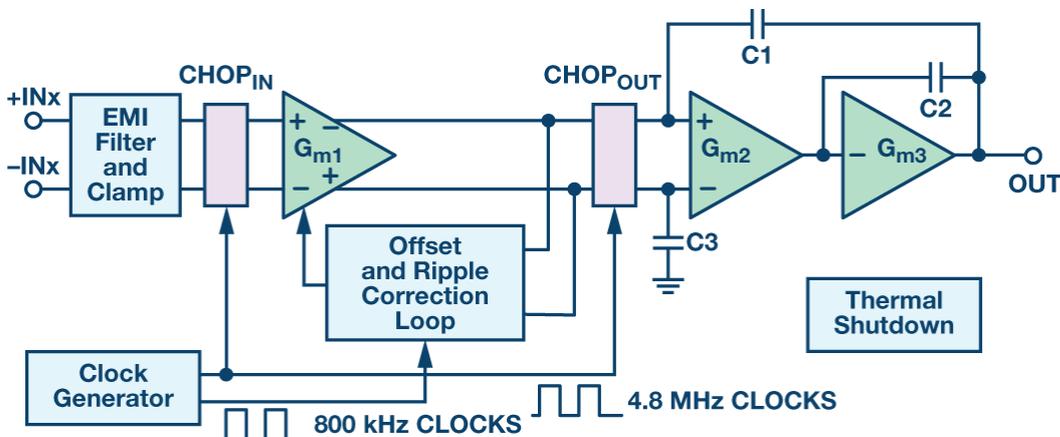


图 4. ADA4522 架构框图

参考图 4 所示的 ADA4522 架构框图，输入信号在 CHOPIN 级调制到斩波频率。在 CHOPOUT 级，输入信号同步解调回到原始频率，同时放大器输入级的失调和  $1/f$  噪声被调制到斩波频率。除了降低初始失调电压之外，失调相对于共模电压的变化也会缩小，从而获得非常好的直线性度和高共模抑制比 (CMRR)。斩波还会降低失调电压温漂。因此，采用斩波技术的放大器常被称为零漂移放大器。需要注意的一点是，零漂移放大器仅消除了放大器的  $1/f$  噪声。任何其他来源（如传感器）的  $1/f$  噪声会不受影响地通过。

使用斩波的缺点是它会将开关伪像引入输出并提高输入偏置电流。在示波器上查看时，可以看到放大器输出上的毛刺和纹波；利用频谱分析仪查看时，可以在噪声频谱密度中看到噪声尖峰。ADI 公司最新零漂移放大器（如 ADA4522 55 V 零漂移放大器系列）采用已获专利的失调和纹波校正环路，以最大程度减少开关伪像<sup>6</sup>。

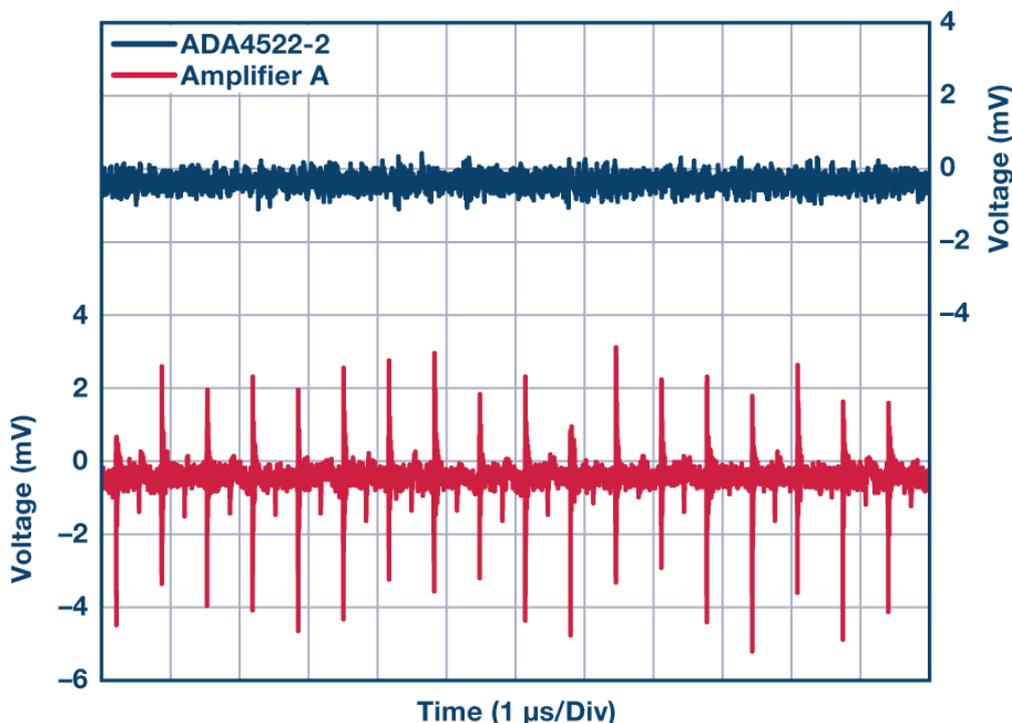


图 5. 时域中的输出电压噪声<sup>6</sup>

斩波技术也可应用于仪表放大器和 ADC。真正的轨到轨、零漂移仪表放大器 AD8237，新型低噪声、低功耗、24 位  $\Sigma-\Delta$  型 ADC AD7124-4，以及最近发布的超低噪声、32 位  $\Sigma-\Delta$  型 ADC AD7177-2 等产品，即利用斩波来消除  $1/f$  噪声并使温漂最小。

使用方波调制有一个缺点，那就是方波包含许多谐波。各谐波的噪声会被解调回到 DC。如果使用正弦波调制，那么这种方法受噪声影响要小得多，可以在有大噪声或干扰的情况下还原非常小的信号。这是锁定放大器采用的方法<sup>7</sup>。

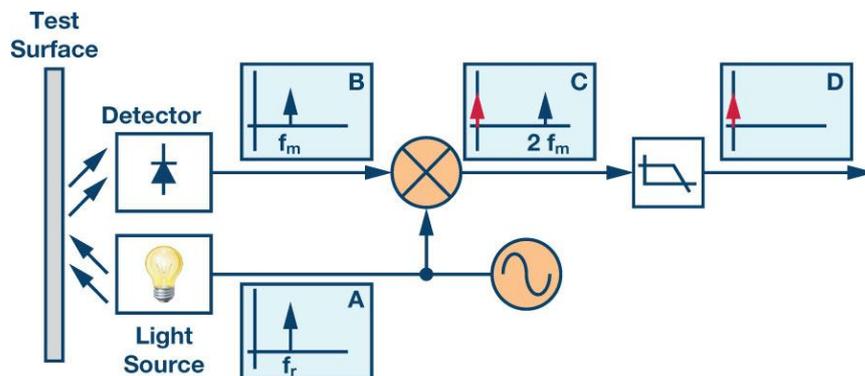


图 6. 使用锁定放大器测量表面污染程度<sup>7</sup>

在图 6 所示例子中，传感器输出由正弦波调制以控制光源。利用光电检测器电路检测信号。一旦信号通过信号调理级，便可进行解调。利用相同正弦波调制和解调信号。解调使传感器输出回到 DC，但也将信号调理级的 1/f 噪声移至调制频率。解调既可在模拟域中完成，也可在 ADC 转换之后的数字域中完成。利用非常窄的低通滤波器（例如 0.01 Hz）抑制 DC 以上的噪声，这样只剩下原始传感器输出和极低噪声。这要求传感器输出恰好在 DC，因此正弦波的精度和保真度很重要。此方法可消除信号调理电路的 1/f 噪声，但不能消除传感器的 1/f 噪声。

如果传感器需要一个激励信号，那么可以利用交流激励消除传感器的 1/f 噪声。交流激励工作原理如下：交替改变传感器激励源以从传感器产生一个方波输出，然后从激励的各相中减去输出。利用这种方法，我们不仅能消除传感器的 1/f 噪声，还能消除传感器的失调漂移以及不良寄生热电偶效应<sup>8</sup>。

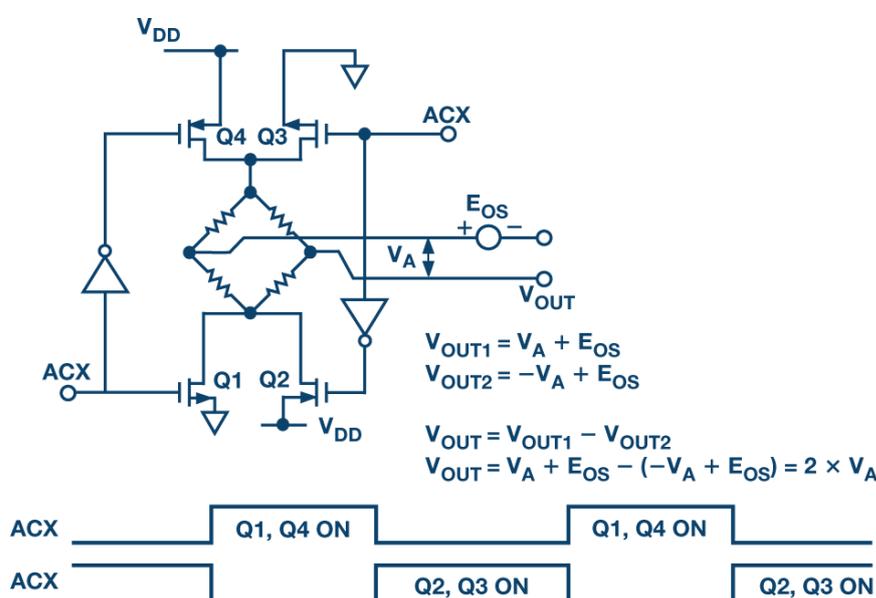


图 7. 桥式传感器的交流激励<sup>8</sup>。

交流激励可利用分立开关完成，并通过微控制器控制开关。内置 PGA 的低噪声、低漂移、24 位  $\Sigma - \Delta$  型 ADC AD7195 含有驱动器来实现对传感器的交流激励。ADC 透明地管理交流激励，传感器激励与 ADC 转换同步，使交流激励更容易使用。

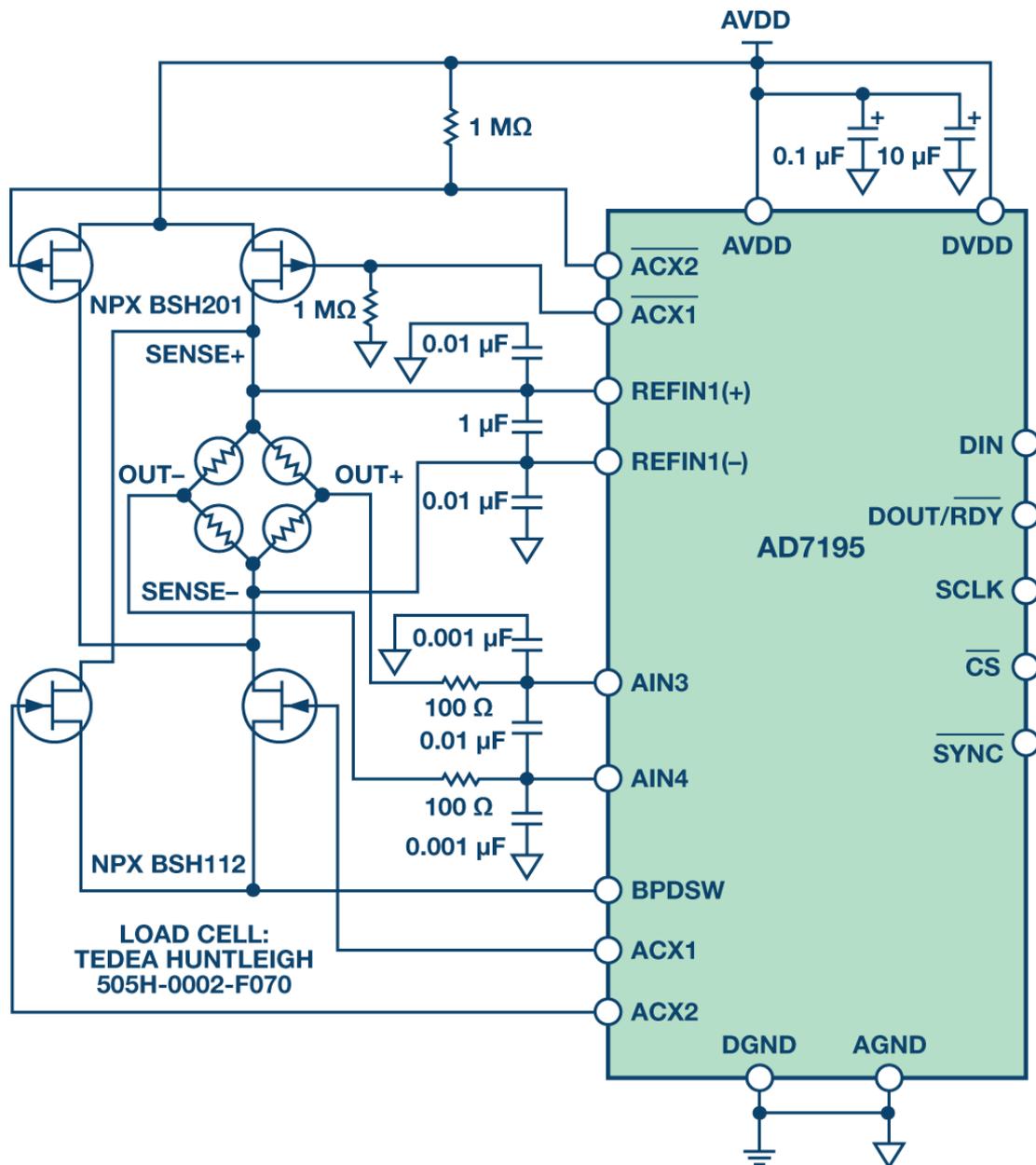


图 8. CN-0155—利用内置 PGA 和交流激励的 24 位  $\Sigma-\Delta$  型 ADC 实现精密电子秤设计

## 实现

使用零漂移放大器和零漂移 ADC 时，必须知道各器件的斩波频率，并清楚可能发生交调失真(IMD)。当两个信号结合时，所得波形不仅含有原先的两个信号，还有这两个信号频率的和与差。

例如，考虑一个采用 [ADA4522-2](#) 零漂移放大器和 [AD7177-2](#)  $\Sigma-\Delta$  ADC 的简单电路，各器件的斩波频率会混频，产生和与差信号。ADA4522-2 的开关频率为 800 kHz，而 AD7177-2 的开关频率为 250 kHz。这两个开关频率的混频会在 550 kHz 和 1050 kHz 产生额外的开关伪像。这种情况下，AD7177-2 数字滤波器的最大转折频率为 2.6 kHz，远低于最低伪像，故将会滤除所有这些 IMD 伪像。然而，如

果串联使用两个完全相同的零漂移放大器，那么产生的 IMD 将是器件内部时钟频率之差。此差值可能很小，所以 IMD 会出现在离 DC 近得多的地方，落在目标带宽之内的可能性更大。

任何情况下，当设计一个采用零漂移或斩波器件的系统时，必须考虑 IMD。应当注意，大多数零漂移放大器的开关频率远低于 ADA4522-2。事实上，设计精密信号链时，高开关频率是 ADA4522 系列的一项关键优势。

## 结语

1/f 噪声会限制精密直流信号链的性能。然而，可以利用斩波和交流激励等技术来消除 1/f 噪声。采用这些技术需权衡利弊，但现代放大器和  $\Sigma-\Delta$  型转换器已解决这些问题，使得零漂移产品更容易使用且终端应用范围更广。

## 参考电路

- <sup>1</sup> W. H. Press. “[天文学和其他领域中的闪烁噪声](#)。” *天体物理学评论*, 1978 年。
- <sup>2</sup> F. N. Hooge. “[1/f 噪声源](#)”。 *IEEE 电源电子会刊*, 第 41 卷第 11 期, 1994 年。
- <sup>3</sup> MT-048. “[运算放大器噪声关系：1/f 噪声、RMS 噪声和等效噪声带宽](#)”。 ADI 公司, 2009 年。
- <sup>4</sup> Walt Jung. “[运算放大器应用手册](#)”。 Newnes, 2005 年。
- <sup>5</sup> MT-047. “[运算放大器噪声](#)”。 ADI 公司, 2009 年。
- <sup>6</sup> Kusuda Wong. “[零漂移放大器：现可轻松用于高精度电路中](#)”。 *模拟对话*, 第 49 卷, 2015 年。
- <sup>7</sup> Luis Orozco. “[同步检波器助力精密低电平测量](#)”。 *模拟对话*, 第 48 卷, 2014 年。
- <sup>8</sup> Albert O’Grady. “[传感器激励与测量技术](#)”。 *模拟对话*, 第 34 卷, 2000 年。

## 致谢

作者感谢 Scott Hunt 和 Gustavo Castro 先前就放大器噪声源所做的工作。

## 作者



Robert Kiely

Robert Kiely 是线性与精密技术部的资深应用工程师，工作地点在美国加利福尼亚州圣何塞市。他于 2010 年加入 ADI 公司。工作重点是精密信号链及产品，包括  $\Sigma-\Delta$  型 ADC、精密放大器和基准电压源。Rob 拥有爱尔兰利默里克大学的电气工程学士学位和 VLSI 系统工程硕士学位。