

零漂移放大器：现可轻松用于高精度电路中

作者：Vicky Wong和Yoshinori Kusuda

顾名思义，零漂移放大器是指失调电压漂移非常接近于0的放大器。它使用自稳零或斩波技术（或兼而有之），并随时间和温度连续自校正直流误差。这使得放大器能够实现 μV 级失调和极低的失调漂移。因此，它尤为适用于高增益和高精密性能的信号调理电路中。例如，传感器（比如温度、压力或称重传感器）一般产生低电平输出电压，因此需要一个放大器来放大信号，同时不应引入更多误差。零漂移放大器针对超低失调电压和漂移、高共模抑制、高电源抑制以及更低的 $1/f$ 噪声而设计，是在高要求系统应用中（比如检测应用）实现高分辨率的理想选择，具有较长的产品生命周期。

零漂移放大器的基本架构

图1显示了基本斩波放大器（单位增益配置）的电路图。直流增益路径包括输入斩波开关网络(CHOP_{IN})、第一跨导放大器(G_{m1})、输出斩波开关网络(CHOP_{OUT})、第二跨导放大器(G_{m2})和频率补偿电容(C1和C2)。CHOP和CHOP'通过时钟发生器和函数控制，可校正不希望出现的放大器直流失调电压(V_{OS})。

图2显示了相关时序图以及预期输出电压(V_{OUT})。当CHOP时钟信号为高电平（A阶段），放大器G_{m1}的差分输入和输出连接至信号路径，并且无反转。由于存在 V_{OS} ，因此产生正输出电压 V_{OUT} 。当CHOP'时钟信号为高电平（B阶段），G_{m1}的输入和输出连接信号路径且反转，并由于 V_{OS} 而产生负输出电压。来自G_{m1}的正负输出电压使输出电压等于 $\pm V_{OS}$ 。时域中的这种斩波概念类似于频域中的调制。换言之，G_{m1}失调电压由CHOP_{OUT}向上调制到斩波频率。另一方面，输入信号经由CHOP_{IN}和CHOP_{OUT}斩波两次。这与向上调制然后向下调制到原始频率的输入信号相等。因此，进入输出端的输入信号不发生反转。

正负输出电压（来自G_{m1}的 $\pm V_{OS}$ ）以电压纹波的形式出现在 V_{OUT} （图2）。此外，CHOP和CHOP'时钟通过开关相关的寄生电容耦合至差分输入引脚。时钟改变状态后，电荷注入差分输入引脚。这些注入的电荷经由有限输入源阻抗转换为输出电压毛刺。毛刺的幅度和形状取决于输入源阻抗以及差分输入引脚上注入电荷的数量和匹配程度。这些输出纹波和毛

刺会产生开关伪像，并在噪声频谱中的斩波频率和其整数倍数频率处出现增长。此外，每个零漂移放大器的开关伪像幅度和频率各有不同，并且各元件之间也有所不同。本文中，术语“斩波”和“开关频率”可以互换使用。

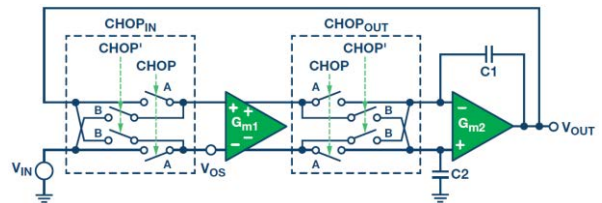


图1. 斩波架构

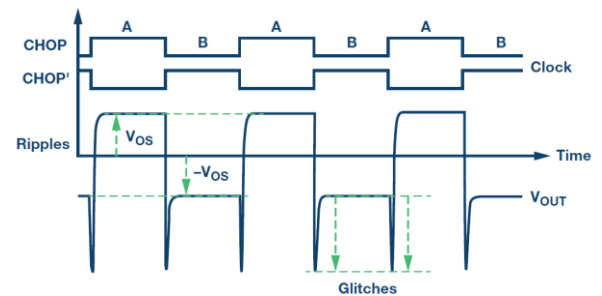


图2. 斩波时序图

数据手册中的开关伪像

一般而言，零漂移放大器具有较大的宽带噪声和较低的开关频率，范围从几千赫兹到几十千赫兹。这限制了它们只能用于直流和低于100 Hz的应用，以使开关频率保持在目标信号带宽外。对于要求在更高带宽下具有高精度和低漂移的应用，使用开关频率较高的零漂移放大器很重要。事实上，开关频率有时候可以看成零漂移放大器的品质因数。较新的零漂移放大器采用高级设计架构，针对在高很多的频率下具有较小开关伪像而设计。例如，除了在4.8 MHz处对失调电压进行斩波，高电压、双通道、零漂移放大器ADA4522-2还采用专利的失调和纹波校正环路，最大程度减少开关伪像。校正环路工作频率为800 kHz，用于消除失调电压 $\pm V_{OS}$ （如图2所示）。将 $\pm V_{OS}$ 下降至其初始值的1%能改善40 dB开关伪像。这样可以减少系统设计人员实现系统级精度目标的工作量。

检测开关伪像最简单的方法是观察放大器的电压噪声密度频谱。图3显示了ADA4522-2折合到输入端的电压噪声密度图。注意，通道B在其800 kHz开关频率处表现出了噪声频谱的增加。正如前文所述，这种噪声频谱的增加是电荷注入失配产生的副作用。由于失配取决于器件对器件以及通道对通道，因此噪声尖峰的幅度也有所不同，且并非所有器件都会表现出噪声尖峰。例如，同一个器件的通道A在800 kHz开关频率处并未表现出任何噪声尖峰。各器件之间的开关频率还可能有10%到20%的差异，具体取决于片上时钟振荡器频率的变化。

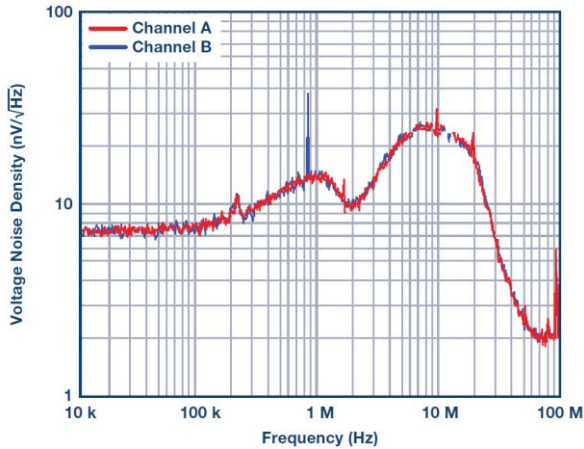


图3. ADA4522-2电压噪声密度

不同零漂移放大器之间的噪声对比

图4显示了三个不同高电压、零漂移放大器折合到输入的电压噪声密度。注意，测试的全部三个零漂移放大器都表现出了一定程度的开关伪像。某些开关伪像还在其整数倍频率处重复。这些开关伪像可能非常大，并有可能在电路设计中引入误差。因此，了解它们对电路的影响，然后找到减轻影响的方法很重要。如果放大器具有高于开关频率的闭环频率，那么这种噪声频谱的增加将会积分至整个带宽中，并反映在输出端。不仅如此，折合到输入的电压噪声还会被放大器噪声增益放大。例如，假定放大器配置为增益100，那么折合到输出的有效噪声电压密度同样会增加100倍。

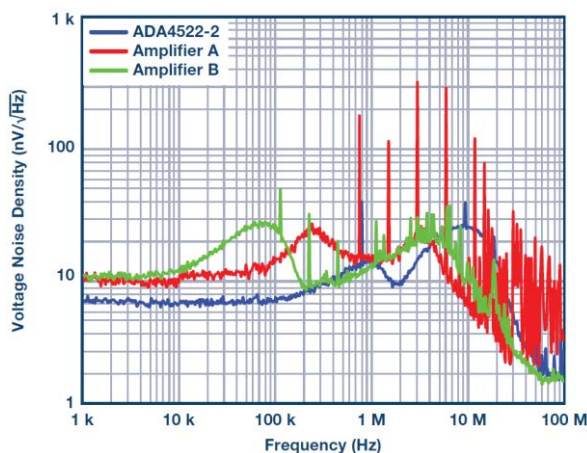


图4. 不同零漂移放大器的电压噪声密度

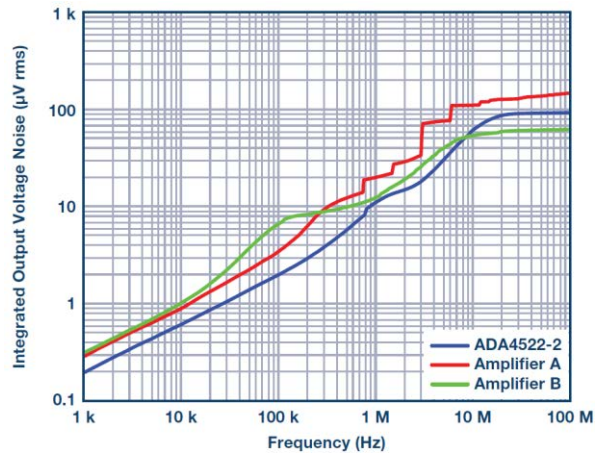


图5. 积分输出电压噪声

积分至放大器输出端的总RMS噪声取决于放大器带宽。输出电压噪声随可用带宽而滚降；因此，增益越高或带宽越宽，则输出放大器噪声的幅度也就越大。图5显示了积分输出电压噪声与频率的关系。这张图对于理解相对频率的总积分噪声很有用。例如，如果放大器的带宽通过滤波而限制在100 kHz，那么放大器的固有电压噪声引起的总输出噪声可由该图得知，如下所示：

表1. 输出积分噪声

放大器	输出噪声 (μV rms)	峰峰值输出噪声 (μV p-p)
ADA4522-2	1.91	12.61
放大器A	3.33	21.98
放大器B	6.40	42.24

使用通用乘法系数（称为波峰因数）将RMS电压转换为峰峰值电压，则峰峰值噪声预计值如表1第三列所示。在一个5 V系统中，ADA4522-2提供18.6位峰峰值分辨率，而放大器B提供16.8位峰峰值分辨率。较低的总积分输出噪声总是有必要的，因为它增加了信噪比，并为整个系统带来了更高的分辨率。

图5中需注意的另一个有意思的地方是积分噪声在噪声尖峰频率处以阶跃类函数的方式递增。噪声尖峰（噪声能量增加）虽然很窄，但却会大幅增加总输出积分噪声。

时域中的开关伪像

很多时候，在频域的电压噪声密度频谱中可以清楚地看到开关伪像。为了理解基于时间的开关伪像特性，可以将放大器配置为缓冲器，将其同相引脚接地，并通过示波器直接观察输出。图6显示了两个零漂移放大器的典型输出。注意，放大器A在多个幅度中表现出了输出电压尖峰。尖峰每隔0.66 μs就重复一次。这与图4中1.51 MHz处看到的噪声尖峰匹配。另一方面，ADA4522-2在时域中未表现出任何开关伪像（蓝色图形）。换言之，噪声尖峰低于测量系统的噪底，无法测出。这样，设计人员可以在驱动ADC的应用中使用ADA4522-2，并十分自信地知道噪声尖峰不会有任何问题。

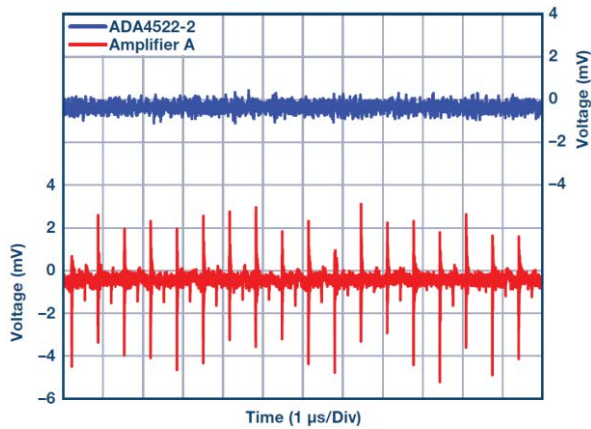


图6. 时域中的输出电压噪声

减少开关伪像的滤波器

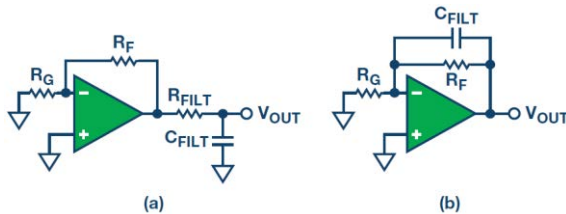


图7. 带滤波器的零漂移放大器

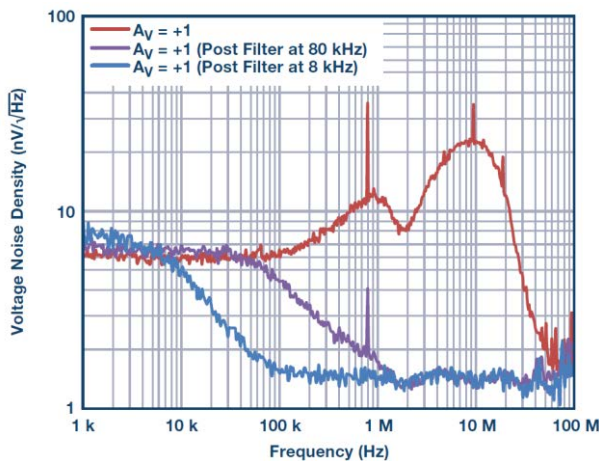


图8. 带后置滤波器的单位增益零漂移放大器电压噪声密度

有多种方法可以减少开关伪像的影响。这些方法最终都有赖于限制放大器带宽，使其低于开关频率。使用滤波器是抑制噪声尖峰的有效方式。最简单的设计是在放大器输出端放置一个电阻-电容网络，形成低通滤波器（图7A）。图8显示了零漂移放大器的电压噪声密度，后置滤波器设计为低于开关频率10%或20%。800 kHz时的噪声尖峰从 $36 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ （无后置滤波器）下降到 $4.1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ （后置滤波器为80 kHz），低于放大器的低频宽带噪声水平。由于后置滤波器位于开关频率以下20%频率处（后置滤波器为8 kHz），噪声尖峰不再可见，而ADA4522-2与其他任何传统放大器都别无二致。

某些应用可能无法在放大器输出端使用RC网络。放大器输出电流流过滤波器电阻，导致电压失调，引起输出误差。这种情况下，可以选择在反馈环路两端放置一个反馈电容来过滤噪声尖峰（图7(b)）。图9显示的是放大器配置为增益10时，无滤波以及在开关频率下方10%处有后置滤波器或反馈滤波器情况下的输出电压噪声密度。后置滤波器配置作为低通滤波器而言，比反馈电容更为有效。

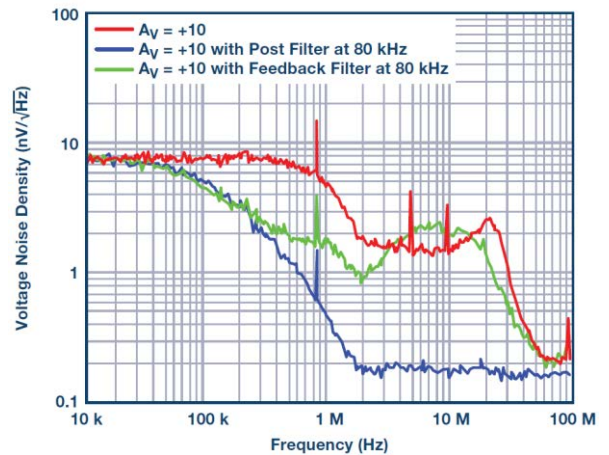


图9. 开关伪像随滤波而减少

在高增益配置下使用零漂移放大器会有所帮助

很多设计人员都会使用零漂移放大器，但并未在系统中观察到任何开关伪像。放大器配置可能是其中一个原因。零漂移放大器具有低漂移和失调特性，常用来在高增益（比如100到1000的增益）配置中对电平幅度传感器信号执行信号调理。在高增益配置下使用放大器的效果与在放大器端放置一个低通滤波器的效果是一样的。随着增益的增加，带宽会下降。图10显示了高增益配置如何降低开关效应。当闭环增益为100时，开关伪像在噪声曲线上几乎不可见。

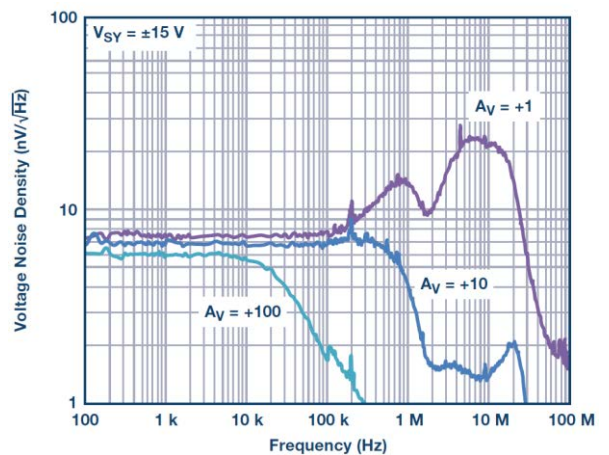


图10. 放大器带宽随增益滚降

ADA4522-2 用作零漂移放大器的优势

ADI最新的零漂移运算放大器ADA4522-2采用专利和创新的电路拓扑,可实现高开关频率,并且相比之前的产品能最大程度减少开关伪像。当单位增益带宽为3 MHz且开关频率为800 kHz和4.8 MHz时,40的增益配置便足够过滤开关伪像,无需外部低通滤波。该器件具有低失调电压漂移(22 nV/°C最大值)、低噪声(5.8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$,增益配置为100)、低输入偏置电流(150 pA最大值)、高共模抑制和电源抑制性能,是电子秤、电流检测、温度传感器前端、称重传感器和桥式传感器等精密应用以及其他大量漂移关键型应用的理想选择。

结论

零漂移放大器具有极低的失调电压和漂移,是要求针对低电平信号进行高精度放大应用的理想选择。下文提供一些使用建议。

所有零漂移放大器都存在一定程度的开关伪像,这通常在电压噪声密度曲线中可以检测到。

不同器件的开关伪像幅度也有所不同。

器件之间开关频率的最大差异可达20%。

开关伪像可在频域和时域中检测到。取决于具体应用,开关伪像可能导致误差。

零漂移放大器通常用于高增益配置中;此时带宽下降,因而很多情况下开关伪像不会导致任何问题。

减少开关伪像,从而降低输出误差量很重要。使用一个低通滤波器(RC后置滤波器或反馈电容)以便在开关频率之前滚降放大器带宽便可抑制伪像。

高开关频率可降低滤波器对于较宽、可用、且无伪像带宽的要求。

致谢

Emman Adrados为本文撰写作出了贡献,在此表示衷心感谢。



Vicky Wong [vicky.wong@analog.com]是ADI公司的应用工程师,于2008年加入ADI,负责精密放大器和基准电压源产品。她拥有伊利诺伊大学香槟分校电气工程学士和硕士学位。



Vicky Wong

Yoshinori Kusuda [yoshinori.kusuda@analog.com]是线性和精密技术部门的IC设计工程师,工作地点在加利福尼亚圣何塞市。他主要负责精密CMOS放大器和开关电容设计,分别于2002年和2004年获得东京工业大学的电气工程学士和硕士学位。



Yoshinori Kusuda