

斩波还是自稳零：是个问题

作者: Reza Moghimi, ADI公司

内容提要

斩波型放大器适合低功耗、低频应用($<100\text{ Hz}$)，自稳零型放大器则更适合宽带应用。自稳零和斩波两种技术相结合是要求低噪声、无开关毛刺、宽带宽应用的理想之选。

零漂移放大器

零漂移放大器可动态校正其失调电压并重整其噪声密度。自稳零型和斩波型是两种常用类型，可实现nV级失调电压和极低的失调电压时间/温度漂移。放大器的1/f噪声也视为直流误差，因此，可一并消除。零漂移放大器为设计师提供了很多好处，因为温漂和1/f噪声在系统中始终起着干扰作用，很难以其它方式消除，此外，相对于标准的放大器，零漂移放大器具有较高的开环增益、电源抑制比和共模抑制比，另外，在相同的配置下，其总输出误差低于采用标准精密放大器的输出误差。

零漂移放大器的应用

零漂移放大器适用于预期设计寿命10年以上的系统，以及使用高闭环增益(>100)和低频($<100\text{ Hz}$)、低幅度信号的信号

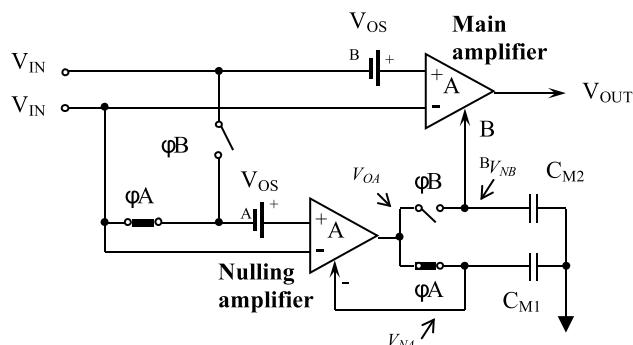


图1. 自稳零型放大器的阶段A: 零点校准阶段

链。应用示例包括精密电子秤、医疗仪器、精密计量设备和红外/电桥/热电堆传感器接口。

自稳零技术

自稳零型放大器通常分两个时钟阶段校正输入失调。在时钟阶段A中，开关 φA 闭合，开关 φB 断开，如图1中的AD8571所示。清零放大器的失调电压经过测量后，储存在电容 C_{M1} 上。

在时钟阶段B中，开关 φB 闭合，开关 φA 断开，如图2中的AD8571示意图所示。主放大器的失调电压经过测量后，储存在电容 C_{M2} 上，同时，储存在电容 C_{M1} 中的电压则调节清零放大器的失调。进而，在处理输入信号时将总失调电压施加到主放大器上。

采样保持功能会将自稳零型放大器变为采样数据系统，使其容易发生混叠和折回效应。低频时，噪声变化缓慢，因此两个连续噪声采样相减可实现真正的抵消。高频时，这种相关性减弱，相减误差导致宽带成分折回基带。因此，自稳零型放大器的带内噪声高于标准运算放大器。为了减少低频噪声，必须提高采样频率，但这会引入额外的电荷注入。信号路径仅包括主放大器，因而可以获得相对较大的单位增益带宽。

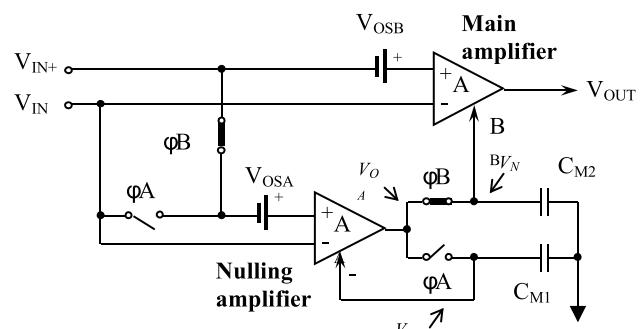


图2. 自稳零型放大器的阶段B: 自稳零阶段

斩波技术

图3所示为斩波放大器ADA4051的功能框图，它采用本地自动校正反馈(ACFB)环路。主信号路径包括输入斩波网络(CHOP1)、跨导放大器(Gm1)、输出斩波网络(CHOP2)和跨导放大器(Gm2)。CHOP1和CHOP2将来自Gm1的初始失调和1/f噪声调制到斩波频率。跨导放大器Gm3检测CHOP2输出端的调制纹波，斩波网络CHOP3将该纹波解调回

DC。所有三个斩波网络的开关频率均为40 kHz。最后，跨导放大器Gm4消除Gm1输出端的直流成分，否则，它会作为纹波出现在总输出中。开关电容陷波滤波器(SCNF)有选择地抑制不需要的失调相关纹波，但不会干扰总输出中的有用输入信号，它与斩波时钟同步，以便完全地滤除调制分量。

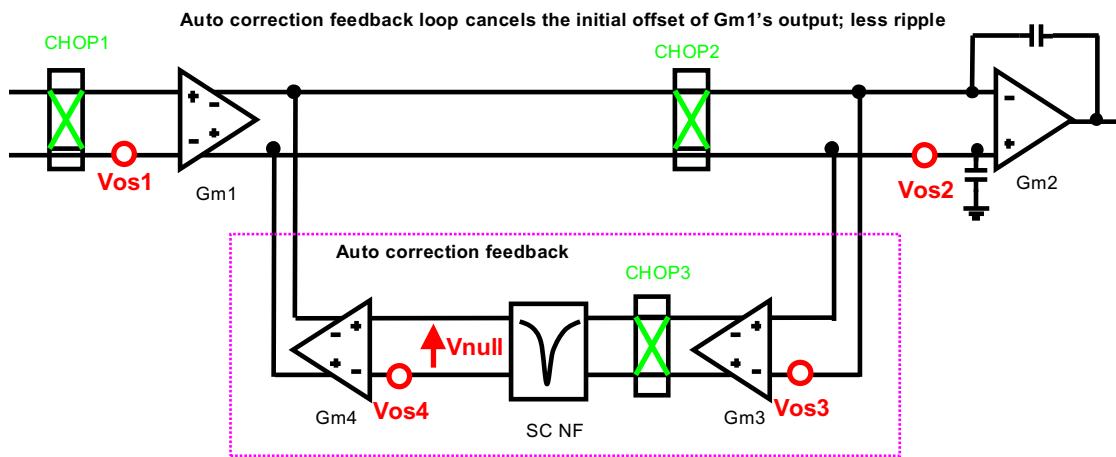


图3. 斩波方案

结合运用两种技术

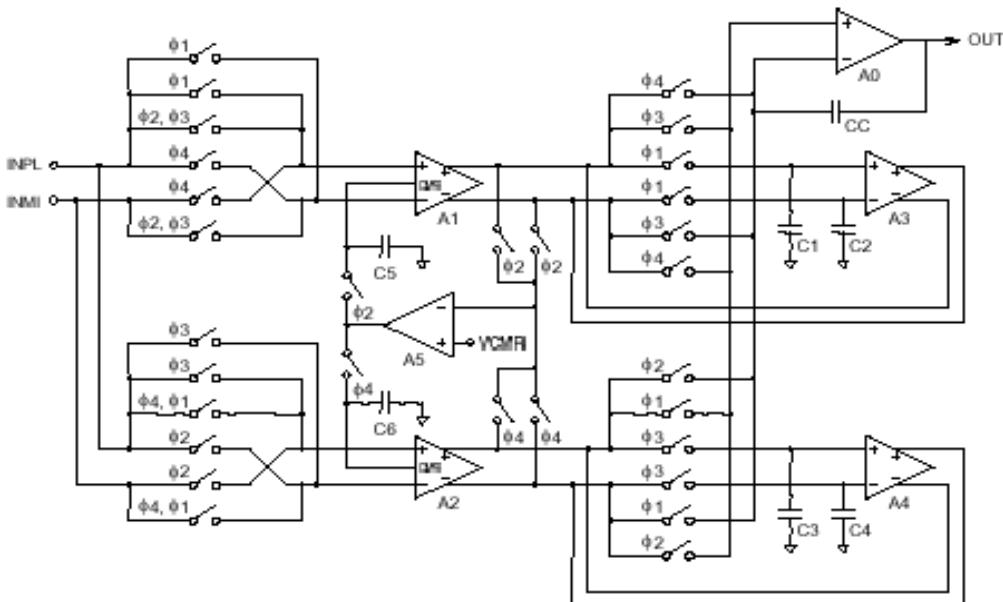


图4. 综合运用自稳零和斩波技术，实现更宽的带宽

图4所示的零漂移放大器AD8628同时使用自稳零和斩波技术来降低斩波频率时的能量，同时将低频噪声保持在非常低的水平。相对于传统零漂移放大器，这种技术组合可以实现更宽的带宽。

自稳零型与斩波型的区别

自稳零型通过采样校正失调，斩波型则采用调制和解调。

采样会导致噪声折回基带，因此自稳零型放大器的带内噪声较大。为了抑制噪声，需要使用更大电流，因此其功耗一般较高。斩波型放大器具有与其宽带噪声一致的低频噪声，但在斩波频率时会产生大量能量和谐波。可能需要进行输出滤波，因此这些放大器最适合低频应用。自稳零和斩波技术的典型噪声特性如图5所示。

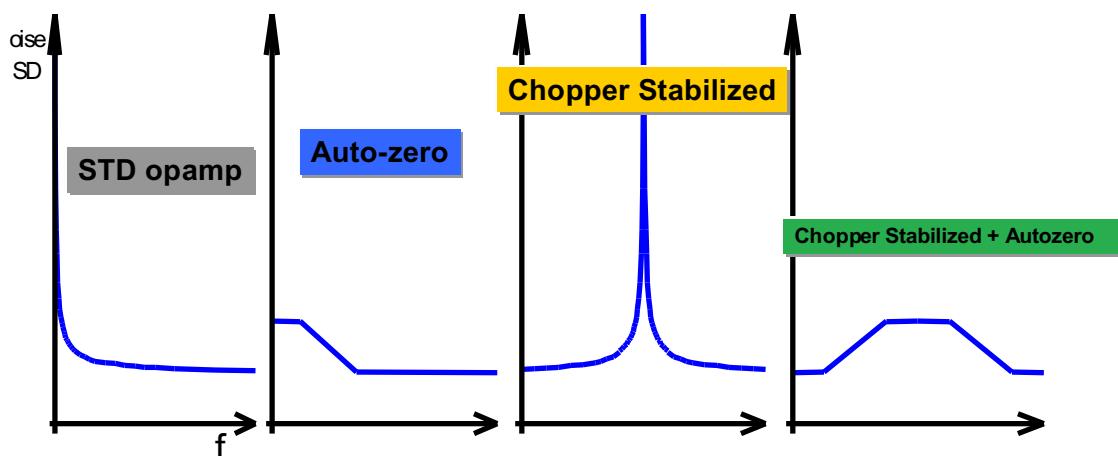


图5. 各种放大器结构的典型噪声与频率的关系

应用建议

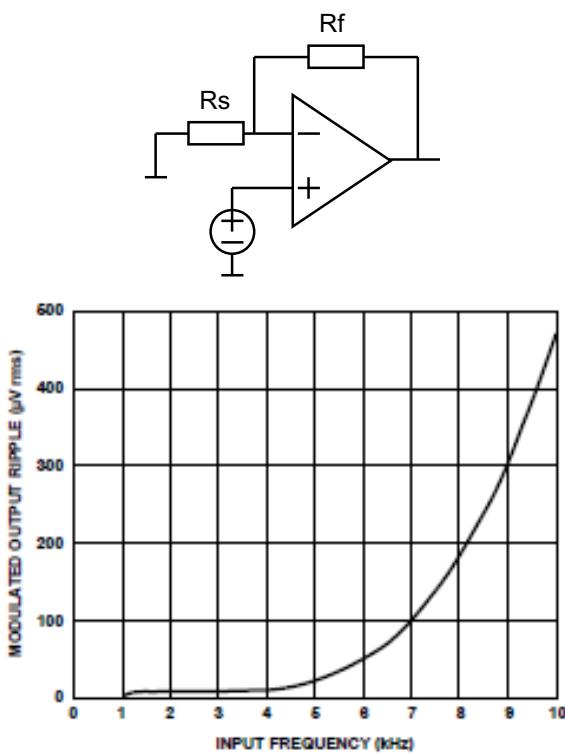


图6. 电荷注入导致的输出纹波与输入频率的函数关系

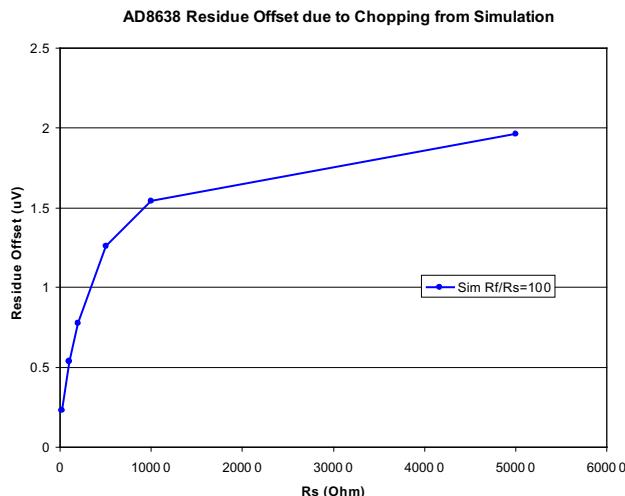


图7. AD8638自稳零型放大器的失调电压与源电阻的关系

零漂移放大器是利用数字电路动态校正模拟失调误差的复合放大器。本文前面讨论的设计技术可大幅改善运算放大器的多个参数，包括失调电压、时间和温度失调漂移以及噪声曲线的形状—但其代价是会牺牲其他几个参数。这种折衷考量在放大器设计中非常常见，也是不存在理想放大器的一个原因。在使用零漂移放大器时，必须考虑的应用问题包括电荷注入、时钟馈通、交调失真和过载恢复时间。受斩波器和自稳零放大器开关行为的影响，电荷注入出现于放大器输入端。例如，如果把一个零漂移放大器配置为同相配置，如图6所示，受输入开关行为的影响，输出端会出现小的纹波。

电荷注入的幅度与温度无关，但会随着电路增益、源电阻或增益设置电阻的增加而增加。图7所示为电荷注入导致的误差电压与源电阻的关系。

从应用级来考虑解决方案可以轻松降低这种误差的影响。

降低电荷注入效应的部分建议方式包括

1. 在反馈中添加一个电容，以限制信号带宽。
2. 使用低源电阻和反馈电阻。
3. 在放大器级之后构建一个有源或无源滤波器。

4. 为同相输入端添加一个等于Rf和Rs并联组合的电阻，帮助消除I_B效应。

5. 使用ACFB结构的器件，比如ADA4051。

如果放大器设计不当，或者采用纯斩波技术，结果可能会发生时钟馈通。图8所示为内部时钟在频谱范围内的伪像。

频率高于自稳零频率的信号会被放大。自稳零型放大器的速度取决于增益带宽积，后者取决于主放大器，而不是零点校准放大器；自稳零频率指示何时开始出现开关伪像。随着输入接近斩波或自稳零频率，结果会产生交调失真(IMD)，如图9所示，输入频率离时钟频率越近，误差越大。高频输入信号与斩波频率之间的IMD在频率f_{CHOP} - f_{IN}和f_{CHOP} + f_{IN}下会产生差频及和频信号。与AD8551系列相比，通过巧妙运用设计技术，再结合斩波和自稳零方案，AD8628的交调失真可以减少12 dB。

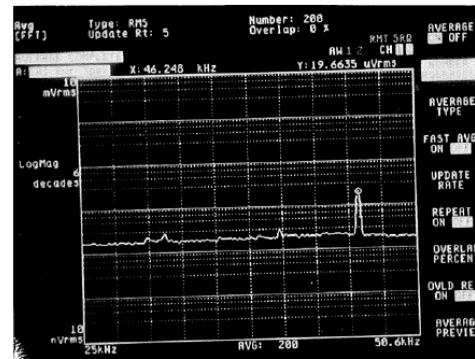


图8. 时钟伪像与频率的关系

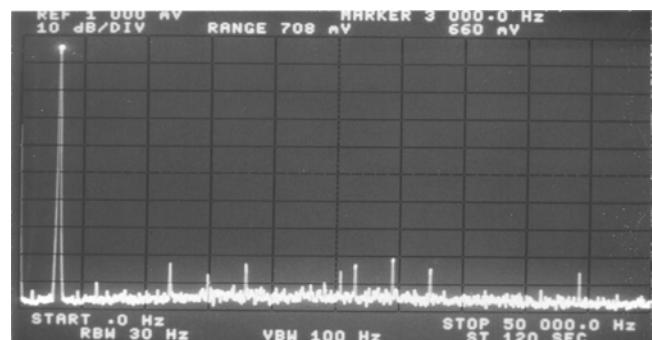


图9. 交调失真

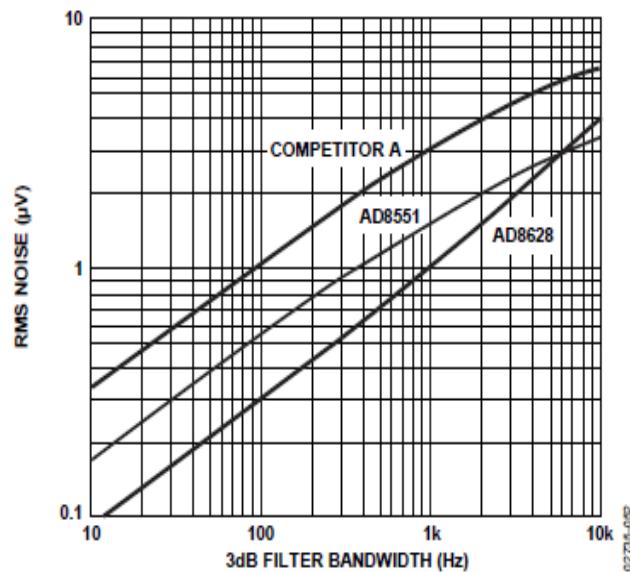
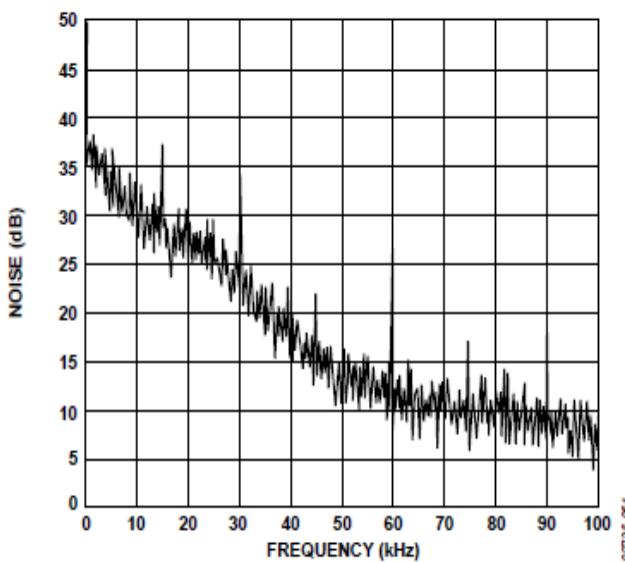


图10. 添加滤波器对噪声和频率的改善情况

改善IMD的一种方式是使用伪随机自稳零频率。例如，AD8571系列所用时钟在2 kHz至4 kHz的范围内变化。另一种可能是在放大器周围添加滤波器，如图10所示；从图中可以看出，滤波前后都存在时钟噪声。选择正确的截止频率可以改善电路的响应。零漂移放大器的过载恢复时间一般比标准CMOS放大器要长。

如果自稳零放大器的输入因任何原因而存在较大差异，则输出会饱和。零点校准放大器将其视作失调，并会尝试消除误差。结果使主放大器进一步饱和，延长恢复时间。AD8628等放大器集成的智能功能可以识别过载条件，因而可以在短至30 μs的时间内恢复。未采用该技术的器件从过载条件恢复可能需要长达40 ms的时间。

选择零漂移放大器

所有零漂移放大器都具有

1. 整个 V_{CM} 内的低失调电压(最大值<10 μV)
2. 超低的时间和温度失调电压漂移(<40 nV/°C)
3. 整形噪声可消除1/f噪声
4. 超高开环增益、CMRR和PSRR
5. 高输入阻抗
6. 极端工作温度(最高200°C)
7. 无需外部调整

斩波型放大器适合低功耗、低频应用(<100 Hz)，自稳零型放大器则更适合宽带应用。例如，AD8628集自稳零和斩波两种技术于一体，堪称要求低噪声、无开关毛刺、宽带宽应用的理想之选。表1列出了一些设计的利弊因素。

表1.

自稳零型	斩波稳定型	斩波稳定型和自稳零型
超低失调, TC_{VOS}	超低失调, TC_{VOS}	超低失调, TC_{VOS}
采样/保持	调制/解调	采样/保持加调制/解调
混叠导致低频噪声较高	类似于宽带噪声(无混叠)	随频率分布的组合噪声
功耗较高	功耗较低	功耗较高
宽带宽	窄带宽	带宽最宽
纹波最小	纹波最大	纹波水平低于斩波型
在自稳零频率上的能量很小	在斩波频率上能量很大	在自稳零频率上的能量很小

结论

在新产品中通过巧妙运用多种技术, 攻克许多关于斩波器的难题, 目前, 零漂移放大器使运算放大器离理想放大器又近了一步。系统工程师可以利用这些产品的优势, 构建出更加优秀的精密系统。

参考文献

“通过自稳零型仪表放大器改进电桥型传感器测量”, 《模拟对话》, 38-02, 2004。

MT-055指南, 斩波器稳定(自稳零)型精密运算放大器, ADI公司。

“自稳零型放大器解密(一)”, 《模拟对话》, 34-01, 2000年。

“自稳零型放大器解密(二)”, 《模拟对话》, 34-01, 2000年。