

Application Note

一些电容耦合电流检测放大器中的混叠及其预防



Guang Zhou

摘要

许多电流检测放大器 (CSA) 都基于斩波放大器架构。电容耦合电流检测放大器 (CCCSA) 是该产品系列的新成员。CCCSA 支持必须尽可能降低静态电流和输入偏置电流的低功耗应用。CCCSA 采用斩波加自动归零算法。在此类系统中，若高频差分信号折叠到信号频带，会导致失调电压升高，进而引发混叠现象。低通滤波可缓解混叠问题。

内容

|                       |   |
|-----------------------|---|
| 1 简介.....             | 2 |
| 2 基于斩波技术的电流检测放大器..... | 3 |
| 3 CCCSA 中的混叠.....     | 3 |
| 4 输入滤波.....           | 5 |
| 5 总结.....             | 6 |
| 6 参考资料.....           | 6 |

插图清单

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 图 1-1. 斩波放大器信号路径.....                 | 2 |
| 图 1-2. 输入信号的斩波操作.....                 | 2 |
| 图 1-3. 输入失调电压上的斩波操作.....              | 2 |
| 图 2-1. CCCSA 的输入级.....                | 3 |
| 图 3-1. 具有 800kHz 正弦输入的 INA190 输出..... | 4 |
| 图 3-2. 具有 790kHz 正弦输入的 INA190 输出..... | 4 |
| 图 4-1. 用于抗混叠的低通滤波器.....               | 5 |
| 图 4-2. 单元 2 上的输入滤波.....               | 5 |

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

斩波技术可提高直流和漂移性能。因此，与输入失调电压相关的参数得到了增强。在调制和滤波过程中，低频噪声也会被消除。基于斩波技术， $V_{os}$ 、 $CMRR$ 、 $PSRR$  等参数有望在 CSA 中实现出色性能。

斩波放大器通常由两条并行信号路径组成，包括一条高增益、低带宽路径和一条低增益、高速路径。图 1-1 显示了斩波放大器的简化框图。斩波在顶部低带宽路径中实现，底部高速路径为馈通模式，负责在高频段对放大器的增益滚降特性进行塑形。在低频时，低带宽路径占主导地位，提供所需的直流精度。

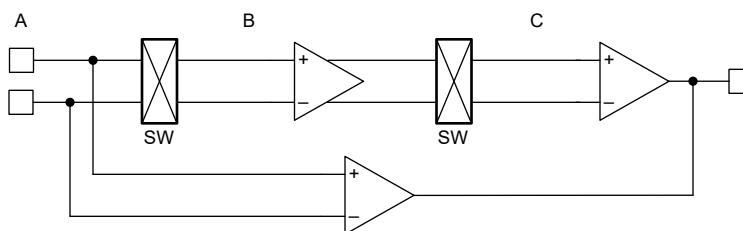


图 1-1. 斩波放大器信号路径

对于多级放大器，输入失调电压由输入级的失调电压决定。斩波放大器通过在信号路径中采用两对同步开关来减少失调电压。

输入信号的工作原理在图 1-2 中以频域的形式展示。当输入信号通过斩波操作时，为位置 A、B 和 C 绘制频谱。第一个开关将输入信号调制到斩波频率及其奇次谐波。输出端的第二个开关重构输入信号并传递到输出级。

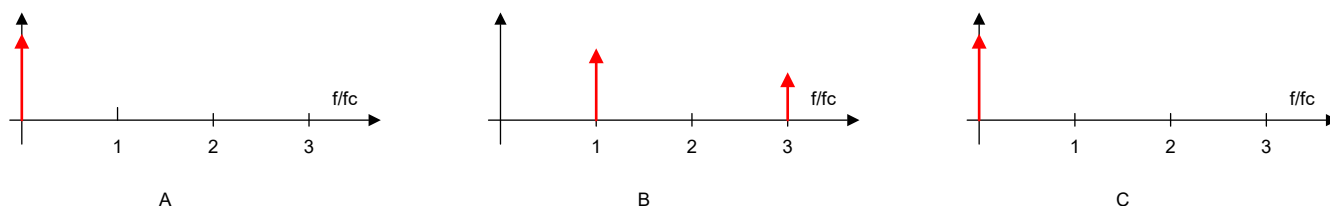


图 1-2. 输入信号的斩波操作

输入放大器的失调电压由重建开关调制为高频，由后续未显示的低通滤波器滤除。为与输入信号的斩波操作形成对比，图 1-3 显示了输入失调电压的斩波操作。由于可以有效消除失调电压和  $1/f$  噪声，因此斩波可能会实现出色的直流精度。

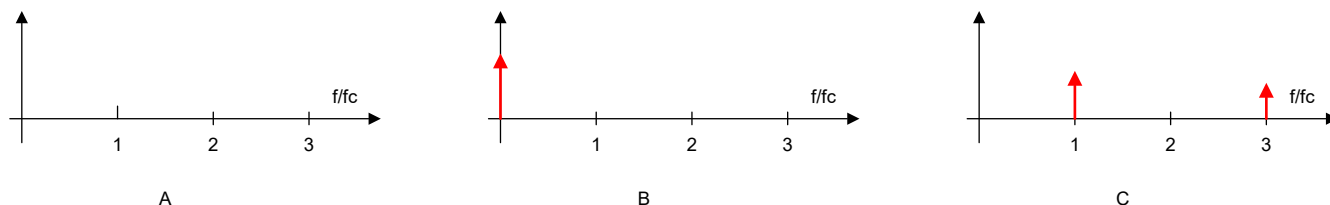


图 1-3. 输入失调电压上的斩波操作

## 2 基于斩波技术的电流检测放大器

基于斩波的 CSA 通过在斩波稳定运算放大器 (OpAmp) 外围配置精密电阻增益网络构建而成。CSA 独特的一项要求是共模范围必须超过电源电压。这是通过对输入共模电压和电源电压进行去耦合来实现的。在高共模下，输入级通过共模电压源或 CSA 监控的总线电压源供电。这会导致必须由总线电压源提供的输入偏置电流增加，即使 CSA 断电也是如此。

其有限的电流消耗通常不会构成问题。不过，对于低功耗应用或只需要间歇性监控的应用，一项要求是尽可能减少电流消耗。

CCCSA 的主要目标是在减小输入偏置电流的同时，保持斩波放大器的优势。图 2-1 显示了 CCCSA 的输入级。由于  $V_{bus}$  和 CCCSA 输入之间没有直流路径，因此直流输入偏置电流为零。此类器件是满足低功耗应用中电流检测要求的可行选择。

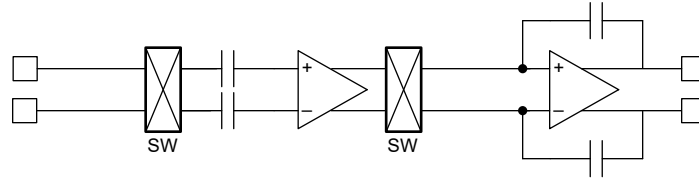


图 2-1. CCCSA 的输入级

对于传统 CSA，输入偏置电流（ $input+$  和  $input-$  之和）可高达 100uA。在相同条件下，CCCSA 的输入偏置电流约为几 nA。超低输入偏置电流不仅支持低功耗应用，还可实现便捷的输入低通滤波，而不会降低系统精度。

## 3 CCCSA 中的混叠

理论上，斩波放大器以连续时间方式工作。输入和输出始终连接，不会出现混叠。实际上，设计限制对这些假设施加了物理限制。通过适当的设计技术可以尽可能降低混叠风险。但是，在硅验证阶段，仍会检查是否存在混叠。时域和频谱分析可用于此目的。

在 CCCSA 中，电阻器增益网络被电容器所取代。为了优化功率和精度，CCCSA 可利用斩波和自动归零的组合。在归零阶段，输入与输出有效断开。由于这种采样保持行为，根据奈奎斯特定理，当输入信号频率超过斩波频率的一半时，便可能发生混叠。

开关电源是一个很好的应用示例，其中要测量的是平均输出电流。当发生混叠时，高频开关纹波会混叠到信号频带中。因此，输出通常表现出更高的失调电压或低频振荡。对输出波形执行 FFT 时还会发现不需要的频率成分。

为了进行演示，在此实验中并排测试了两个 INA190 单元。两个单元均由相同的 20mVpp、800kHz 正弦波形驱动（该波形叠加在直流输入上），以模拟开关稳压器的输出。

图 3-1 显示了两个单元的响应。上半部分显示时域响应（黄色 = 单元 1；绿色 = 单元 2）；下半部分显示频域响应（黄色 = 单元 1；紫色 = 单元 2）。

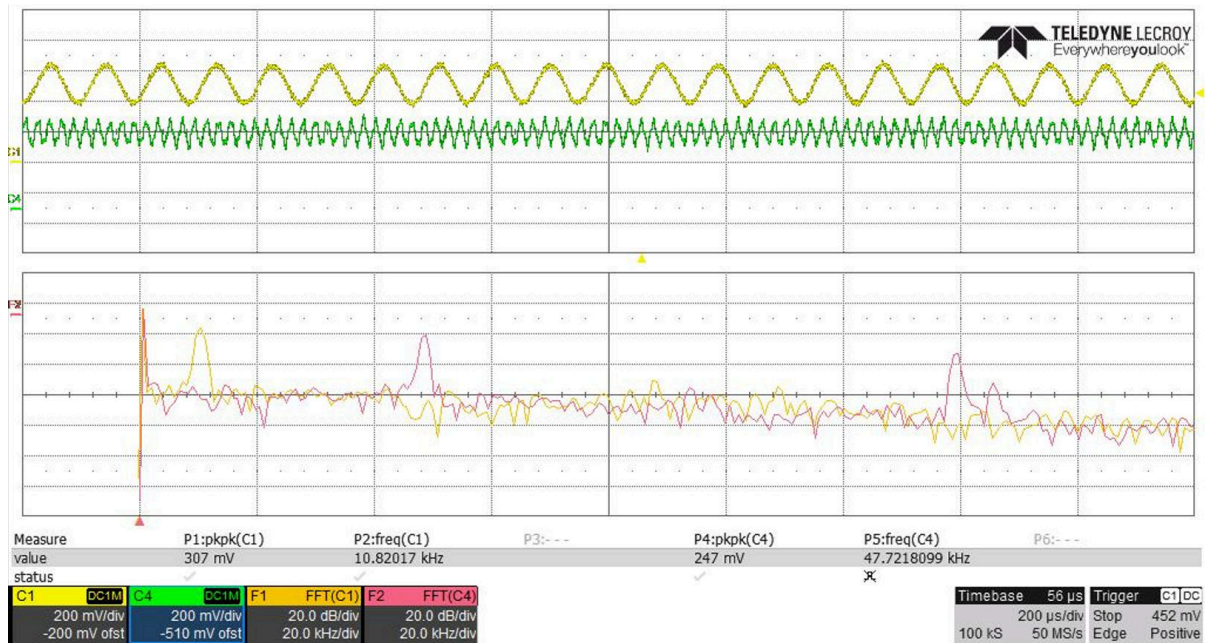


图 3-1. 具有 800kHz 正弦输入的 INA190 输出

谐波的频率是斩波频率和输入信号频率的函数。谐波对称地地位于斩波频率及其倍数附近。根据该属性，可以估算斩波频率。由于器件差异，谐波频率会相应地变化。这就是为什么即使输入相同，单元 1 和单元 2 的响应仍存在显著差异。当考虑到温漂时，此类变化将更难以预测。

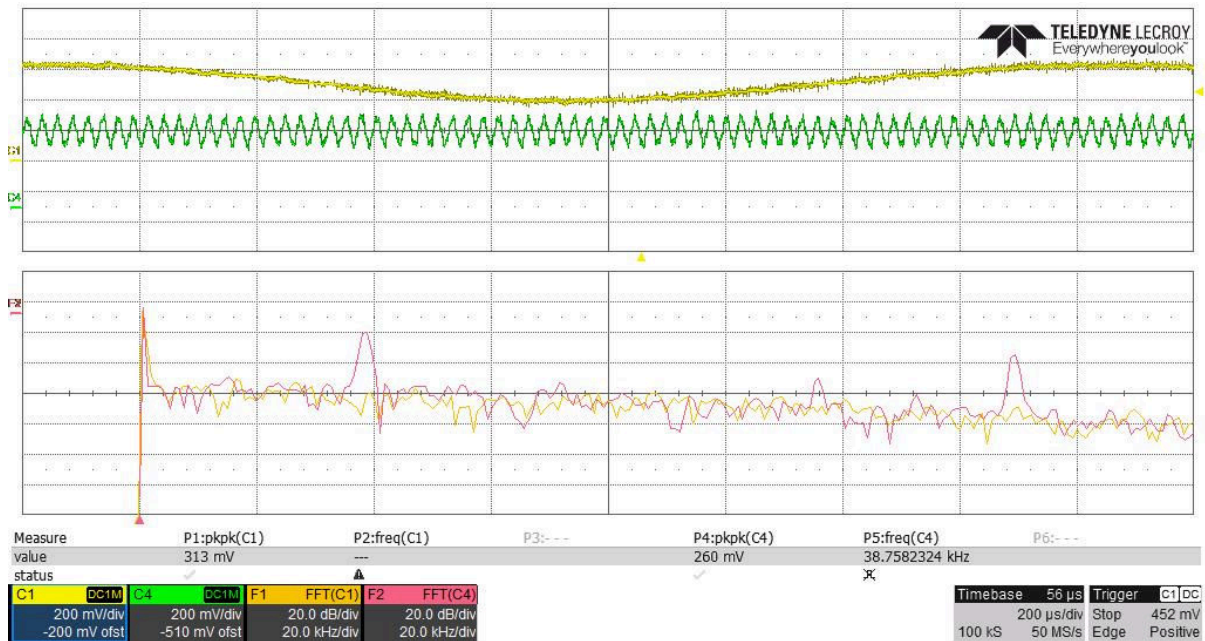


图 3-2. 具有 790kHz 正弦输入的 INA190 输出

图 3-2 显示了相同的设置，其中的唯一区别是将输入信号频率降低至 790kHz。音调偏移 10kHz。在单元 1 中，移位导致直流输出的幅度增加。这种增加与真正的直流输出无法区分开来。

## 4 输入滤波

如果调制后的信号和所需信号之间存在足够的频率间隔，则输出滤波器会具备良好效果；否则，输出滤波器的作用将十分有限。

由于器件差异、输入信号变化和温度影响等因素，可以放心地假设调制后的信号将在任何频率下出现。因此，可以采用输入滤波器以尽可能降低混叠的风险。图 4-1 显示了用于抗混叠的低通滤波器，如 INA190 数据表中的建议。滤波器由两个电阻器  $R_F$  和一个电容器  $C_F$  实现。INA186 和 INA191 在应用需要时可采用这种滤波方案。这些器件基于相同的电容耦合斩波架构。

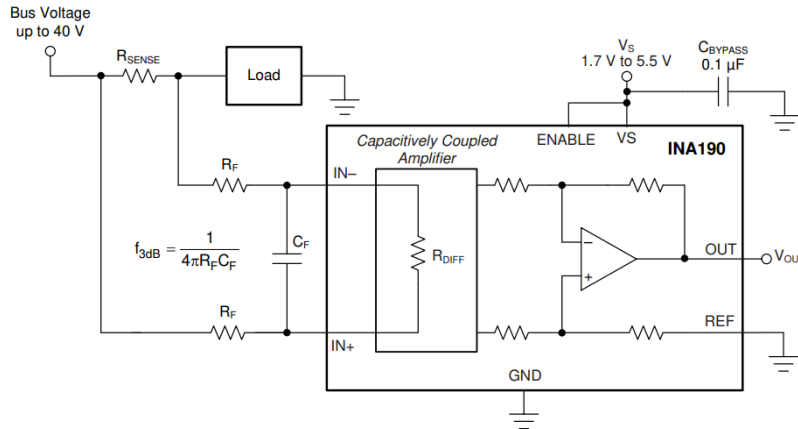


图 4-1. 用于抗混叠的低通滤波器

图 4-2 显示了此类输入滤波器的影响。在该实验中，滤波器仅添加到单元器件 2 的输入中， $R_F = 100 \Omega$  且  $C_F = 0.1 \mu F$ 。

滤波器转角频率约为 8kHz，为 800kHz 输入噪声提供了足够的衰减。一般情况下，选择的转角频率应是测量速度要求所允许的尽可能低的值。此外，根据奈奎斯特定理，转角频率需要低于斩波频率的一半。对于 INA190 和系列，指定的信号带宽远低于斩波频率。

如 图 4-2 所示，使用抗混叠滤波器后，器件 2 输出变得非常干净。FFT 确认谐波已有效消除。

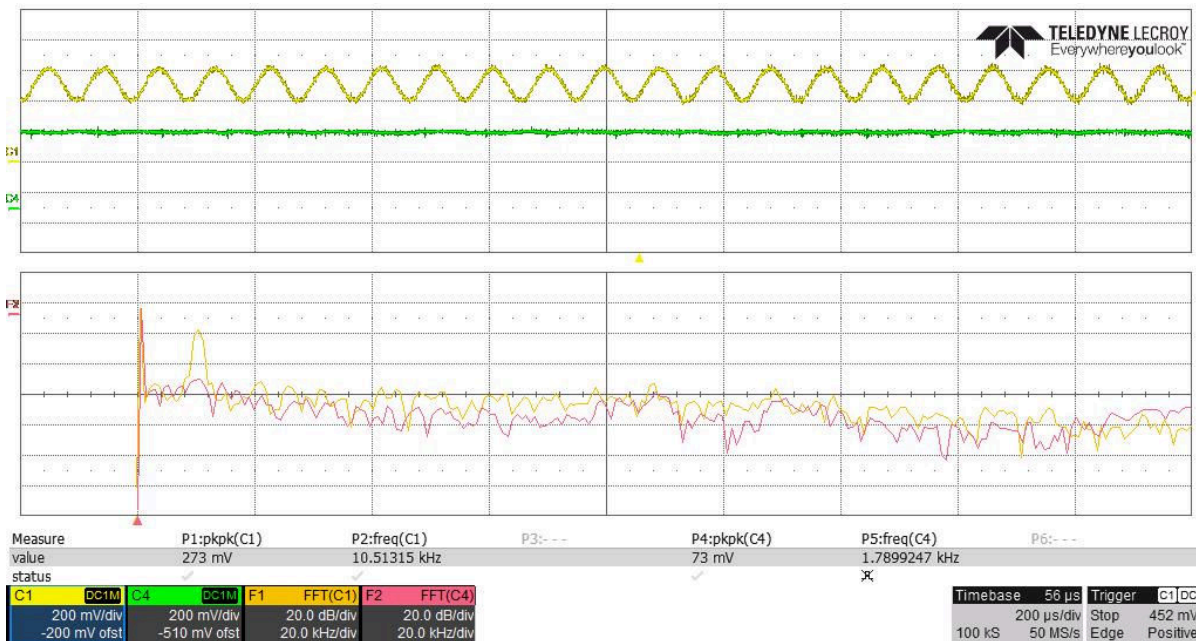


图 4-2. 单元 2 上的输入滤波



数字功率监控器如果基于相同的电容耦合斩波技术，则可能会受到类似的混叠效应的影响。与模拟输出的同类器件类似，其表现包括失调电压升高，或出现与随机噪声特性不符的缓慢变化型失调电压。相同的输入滤波方案可用于抗混叠目的。例如，INA236 数据表有一个专用于输入滤波的部分。值得注意的是，混叠效应与不受输入滤波影响的固有器件噪声区分开来。

## 5 总结

电容耦合电流检测放大器结合了斩波放大器和开关电容器电路的优势，可实现高性能和低功耗。然而，此类 CCCSA 容易出现混叠，尤其是当信号路径中涉及采样保持算法时。在嘈杂的环境中使用此类器件时，建议使用输入低通滤波器来实现抗混叠。低通滤波器中使用的电阻器可能相当大，这使得输入滤波器设计更加灵活。转角频率可置于器件 3dB 带宽或更低位置，以实现有效的噪声衰减。

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI) [INA190 具有使能功能的双向、低功耗、零漂移、宽动态范围精密电流检测放大器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI) [INA236 带 I<sup>2</sup>C 接口的 48V 16 位超精密电流、电压和功率监测器](#) 数据表。
- R. Burt and J. Zhang, "A Micropower Chopper-Stabilized Operational Amplifier Using a SC Notch Filter With Synchronous Integration Inside the Continuous-Time Signal Path", in IEEE Journal of Solid-state Circuits, Vol. 41, no. 12, December 2006

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月