

Subsystem Design

高增益自补偿 ADC



1 说明

此子系统采用两个级联运算放大器，并通过 DAC 控制的偏置来消除直流漂移并防止输出饱和。反馈环路能够实时将信号居中，从而保持动态范围，并支持 UART 传输。

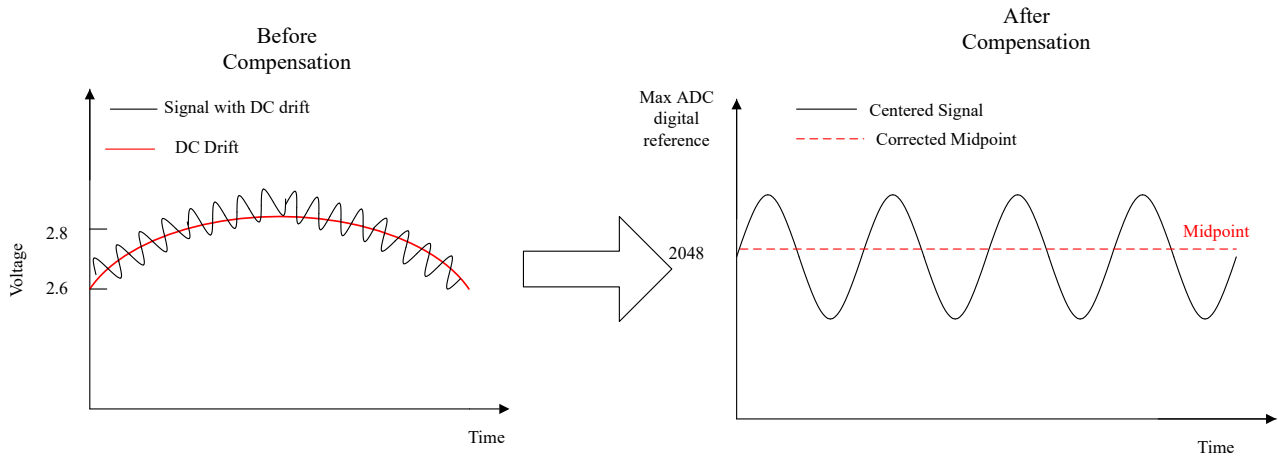


图 1-1. 1 实时校正直流漂移

该子系统由两级级联运算放大器架构组成，使用 MSPM0 的内部 OPA、ADC 和 DAC 实现。第一级 (OPA0) 以可编程增益 (增益 1) 放大输入信号，并通过 DAC8_0 施加直流偏移，使信号保持在 ADC 中点范围内。第二级 (OPA1) 同样具有可编程增益 (增益 2)，提供进一步的放大，同时通过 DAC8_1 对输出进行监测和动态校正，以避免饱和。两个级均通过 ADC 反馈和数字补偿逻辑进行实时主动控制，以保持信号采集的良好动态范围。

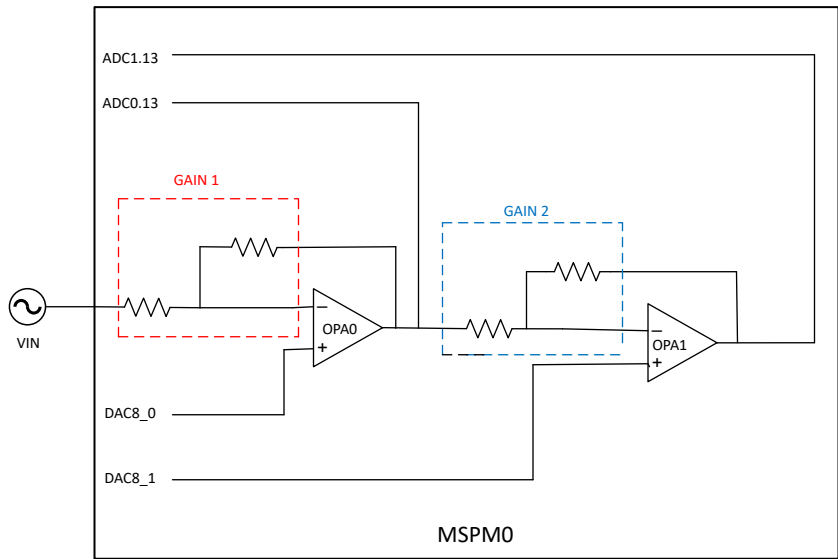


图 1-2. 高增益自补偿 ADC 架构

2 所需外设

表 2-1 介绍了所需的集成外设。

表 2-1. 所需外设

子块	使用的外设	注释
第一级 DAC 偏置控制	DAC8_0 (通过 COMP_0)	根据放大输入的 EMA 进行调整
第二级 DAC 饱和控制	DAC8_1 (通过 COMP_1)	调节输出以防止饱和
输入/输出电压测量	ADC12	监测 OPA0 和 OPA1 输出
时间控制	TIMERX	设置系统采样率
数据传输	UART	通过 UART 以 4 字节数据包发送级联输出

3 设计步骤

1. 配置两个内部 DAC 控制的运算放大器和两个 ADC 通道。设置用于数据输出的 UART 接口，以及计时器来控制采样率。
2. 系统上电后，初始化 DAC 输出，以使两个运算放大器级的偏置进入有效工作范围。
3. 在可定制特性头文件中定义系统特定参数，例如放大器增益、ADC 阈值、平滑系数和数据包大小。
4. 测量第一级的输出电压，使用 EMA 滤波器估算直流分量，并调整 DAC 使信号居于 ADC 输入范围的中点。
5. 利用两个级的输出计算最终对应于放大输入的级联信号。
6. 监测第二级输出，并调整 DAC 偏置，以保持信号在有效范围内，并防止削波或饱和。
7. 将最终放大值封装成 4 字节帧，通过 UART 发送，以便进行外部记录或分析。

4 设计注意事项

1. **动态范围居中**：运算放大器输出必须保持在 ADC 输入范围内的中间位置，以更大限度地提高分辨率并避免削波，尤其是在存在直流漂移时。
2. **增益选择与稳定性**：每一级电路的增益设置都至关重要，既要保证输入信号得到足够放大以便准确检测，又不能过大导致信号进入饱和状态。
3. **EMA 滤波器响应**：指数移动平均滤波器必须进行调节，使其既能有效跟踪缓慢的直流漂移，又能抑制交流信号和高频噪声。
4. **采样率控制**：计时器必须进行配置，以调节信号测量的频率。采样率必须足够快，以实时跟踪漂移；同时又要足够慢，以避免对高频内容产生响应或导致不必要的 DAC 更新。

5 软件流程图

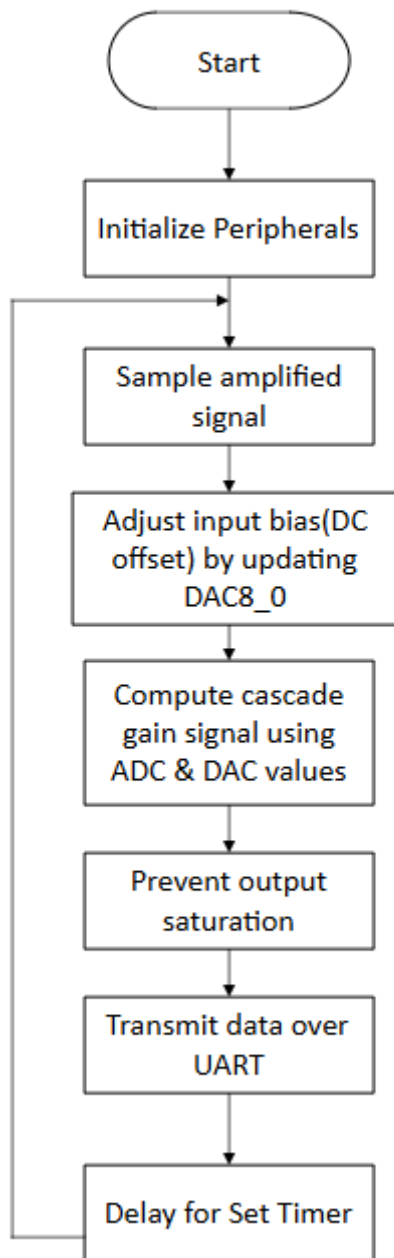


图 5-1. 软件流程图

6 器件配置

此子系统利用 TI 的 SysConfig 图形工具来配置所有必要的外设。如图 图 6-1 所示，MSPM0 器件内部将输入信号通过两个级联运算放大器级 (OPA0 和 OPA1) 进行路由，每个级均配置为反相放大器，并通过内部电阻梯抽头 (RTOP 和 RBOT) 实现可编程增益。DAC8_0 和 DAC8_1 分别为 OPA0 和 OPA1 的同相输入提供偏置电压，从而实现每级的动态直流偏置控制。

运算放大器的输出由 ADC 通道 ADC0.13 和 ADC1.13 进行监控。TIMERX 被配置为生成周期性中断，这些中断用于调节信号采样率，从而随着时间的推移保持稳定的补偿。UART 也被配置为通过回传通道接口进行串行通信，以固定的 4 字节数据包的形式传输级联输出。

所有关键参数 (例如增益值、饱和限值和滤波器常量) 都在 customizable_features.h 中定义，以便在不更改核心应用逻辑的情况下轻松进行调节。

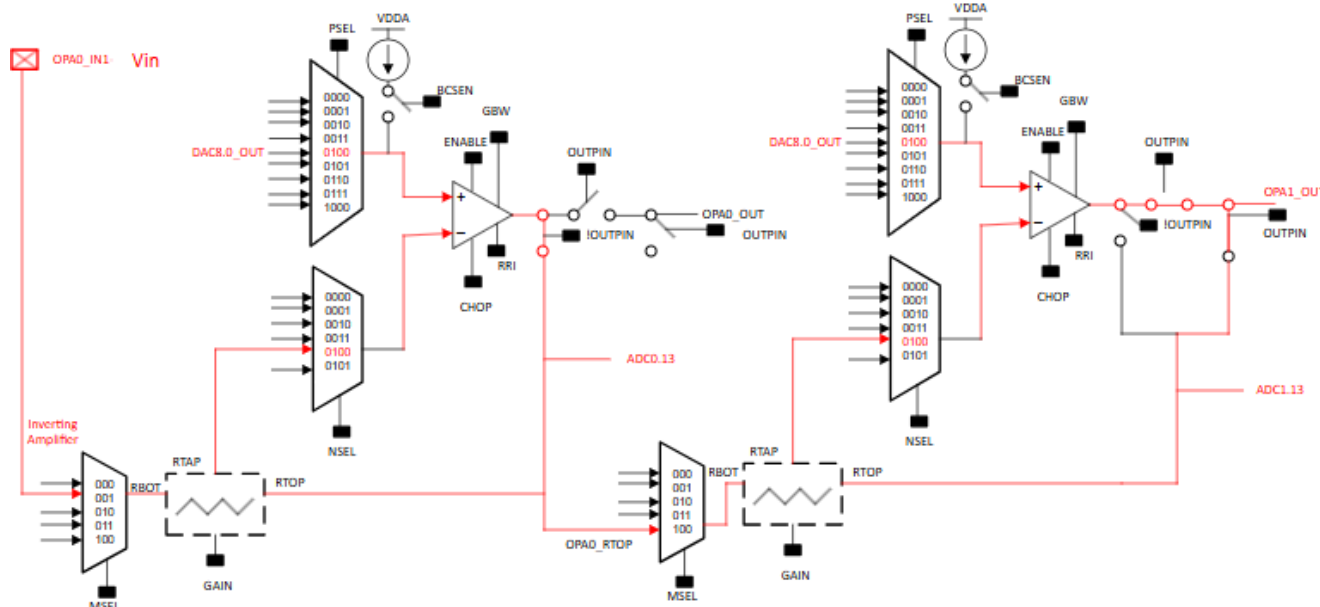


图 6-1. 反相级联放大器配置

7 应用代码

主循环执行自补偿序列，包括直流偏置调整、级联电压计算、饱和控制和 UART 传输。

```
int main(void){
/**** Beginning of hardware initialization *****/

    // Initialize Hardware
    SYSCFG_DL_init();

    //Initialize interrupts and exceptions via the NVIC.
    NVIC_EnableIRQ(TIMER_1_INST_INT_IRQN);
    NVIC_EnableIRQ(ADC12_0_INST_INT_IRQN);
    NVIC_EnableIRQ(ADC12_1_INST_INT_IRQN);

/**** End of hardware initialization *****/

/**** Beginning of software initialization *****/

    // Initialize DACs
    dacs_init();
/**** End of software initialization *****/

    //Start TimerA
    DL_TimerA_startCounter(TIMER_1_INST);

    while(1){
        //Self-Compensating Functions
        remove_dc_voltage(); //Adjusts DAC8_0 based on input DC
        cascade_gained_input_voltage = cascade_input_voltage(OPA1_output); //Calculates Vin x G1 x G2
        saturation_control(OPA1_output); //Adjusts DAC8_1 based on OPA1 output

        //Transmit Cascade Gained Data over UART
        send_UART_Data();

        //Increment pointer but not looping
        Data_pointer += 1;
        if(Data_pointer == DATALOGGING_LENGTH){Data_pointer = DATALOGGING_LENGTH-1;}

        //TIMER_1 time delay for sampling interval: 50ms //Configurable in SysConfig
        while (false == TIMER_1_Timeout) {
            __WFI();
        }
        TIMER_1_Timeout = false;
    }
}
```

图 7-1. Main.c 代码

- **remove_dc_voltage()** 利用第一级运算放大器的输出和 DAC 基准电压计算放大后的输入。指数移动平均 (EMA) 滤波器用于隔离直流分量，并通过调整 DAC 使输出电压保持在中点附近。
- **cascade_input_voltage()** 使用 DAC 值和运算放大器输出计算级联信号 $G1 \cdot G2 \cdot V_{in}$ 。此输出表示系统经过滤波和增益校正后的信号。
- **saturation_control()** 如果输出电压超过设定范围，通过调整 DAC 参考防止第二级运算放大器中出现输出削波。
- **send_UART_Data()** 将 32 位级联输出分解为 4 个字节，并通过 UART 传输。
- 计时器和 ADC 中断可控制周期性执行和采样。TIMER_1 ISR 每 50ms 会设置一个超时标志，而 ADC ISR 会捕获并存储转换结果。

customizable_features.h 中定义了所有可调的系统常量，如增益值、电压阈值、缓冲区长度和平滑系数。

7.1 应用代码 - 级联信号计算

此子系统功能的一个关键部分是计算完全级联的信号输出，表示为 $G1 \times G2 \times V_{in}$ 。这一功能由 `cascade_input_voltage()` 函数完成，该函数通过考虑两个运算放大器级及 DAC 施加的偏置电压，重构完整放大后的输入信号。

```

/**** Function *****/

/*! \brief Calculates Cascaded Gained Input:  G1*G2*Vin1
 *
 * (G1*G2*Vin1) = Vout2 + ((1+G1)*G2*Vdac1)*2^4 - ((1+G2)*Vdac2*2^4)
 *
 * \return G1*G2*Vin1
 */
uint32_t cascade_input_voltage (uint32_t gOPA1_output)
{
    uint32_t result;
    /*
     * (G1*G2*Vin1/4096)*VDDA = (Vout2/4096)*VDDA + ((1+G1)*G2*Vdac1/256)*VDDA - ((1+G2)*Vdac2/256)*VDDA
     * (G1*G2*Vin1) = Vout2 + ((1+G1)*G2*Vdac1)*2^4 - ((1+G2)*Vdac2*2^4)
     *
     * for:
     *     G1 = OPA0_Gain
     *     G2 = OPA1_Gain
     */
    result = (gDAC8_0_DATA * 4) * ((OPA0_Gain+1) * OPA1_Gain );
    result -= (gDAC8_1_DATA * 4) * (OPA1_Gain + 1);
    result += gOPA1_output;

    return (result);
} /* calc_cascade_input_voltage() */

```

图 7-2. Cascade_Input_Voltage() 代码

该计算背后的数学模型为：

$$(G1 \times G2 \times V_{in1}) = V_{out2} + ((1 + G1) \times G2 \times V_{dac1}) \times 2^4 - ((1 + G2) \times V_{dac2} \times 2^4) \quad (1)$$

由以下组合推导而来

$$V_{out1} = -G1 \times V_{in1} + (1 + G1) \times V_{dac1} \quad (2)$$

$$V_{out2} = -G2 \times V_{out1} + (1 + G2) \times V_{dac2} \quad (3)$$

其中：

- $G1$ 和 $G2$ 分别是第一级和第二级运算放大器的增益。
- V_{out1} 和 V_{out2} 分别是第一级和第二级放大器 (OPA0 和 OPA1) 的输出。
- V_{dac1} 和 V_{dac2} 分别是通过 DAC8_0 和 DAC8_1 施加到 OPA0 和 OPA1 的偏置电压。

该公式补偿每一级 DAC 引起的偏移影响，并重构真实输入信号，仿佛未施加任何偏置一样。代码中使用的左移 (<< 4) 操作，以在缩放回 12 位环境时补偿 8 位 DAC 的分辨率限制，每个 DAC 值必须乘以 16 (例如， 2^4) 才能与完整的 ADC 范围保持一致。然后，该重构的信号通过 UART 传输，从而为主机系统提供原始输入电压的直流补偿表示，并由所配置的系统增益进行调整比例

8 结果

图 8-1 显示了两级放大器的测量输出：橙色 (C1) 为 OPA0 的输出，蓝色 (C2) 为 OPA1 的输出。输入信号为 250MHz、10mVpp 正弦波，并叠加 505 mV 直流偏移。如图所示，OPA1 会进一步放大 OPA0 的输出，但由于高增益、供电余量有限以及饱和效应，波形不再像 OPA0 那样能线性跟随输入。相比之下，OPA0 输出较为平滑，增益较低，因此能够保持在其线性工作范围内。

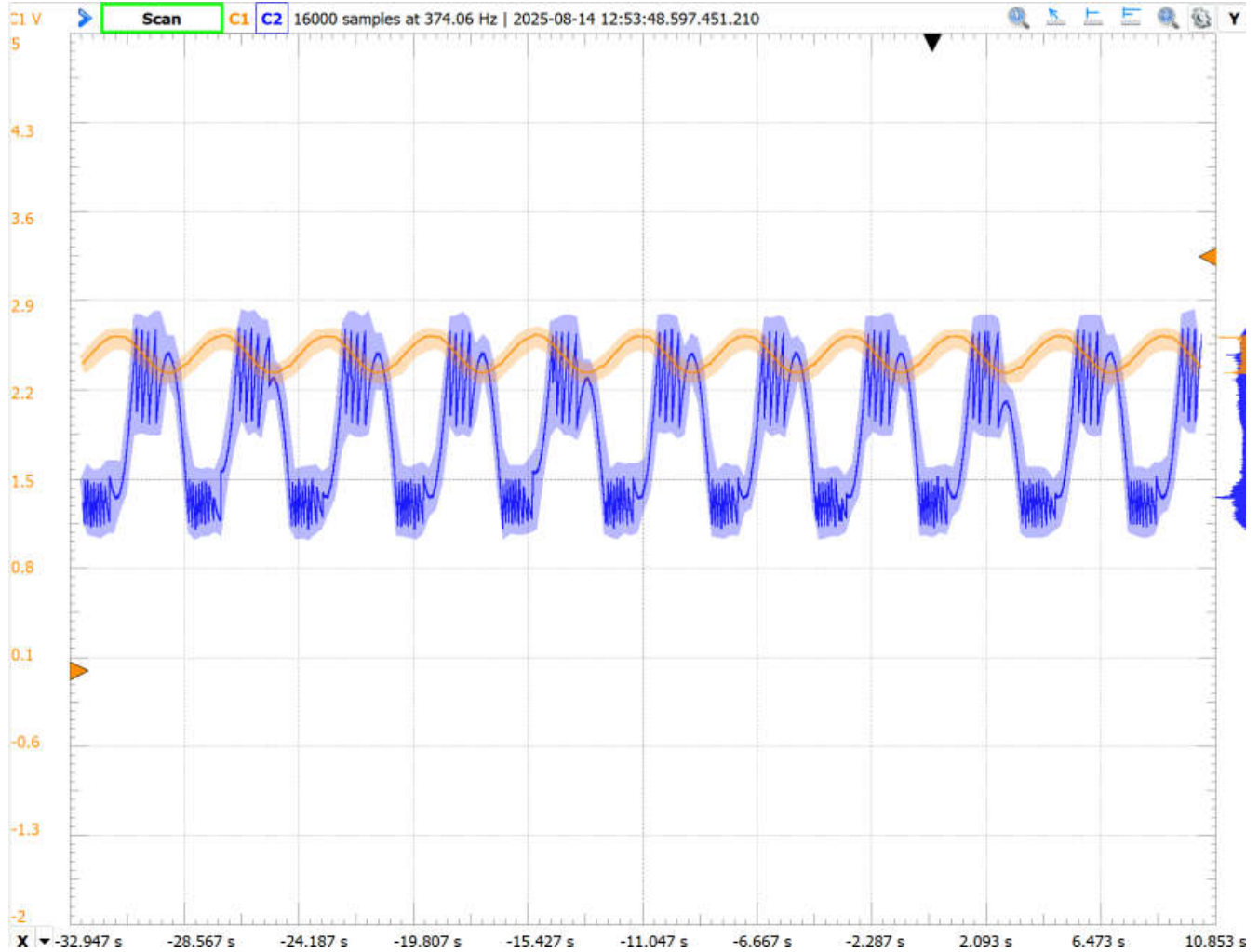


图 8-1. OPA0 和 OPA1 输出

为了解决这一问题，系统会按照前文所述，在软件中计算真实的放大信号 ($G1 \times G2 \times V_{in}$)，并根据已知的增益和偏置参数重构无失真版本，即使物理输出出现削波。图 8-2 表示级联信号。

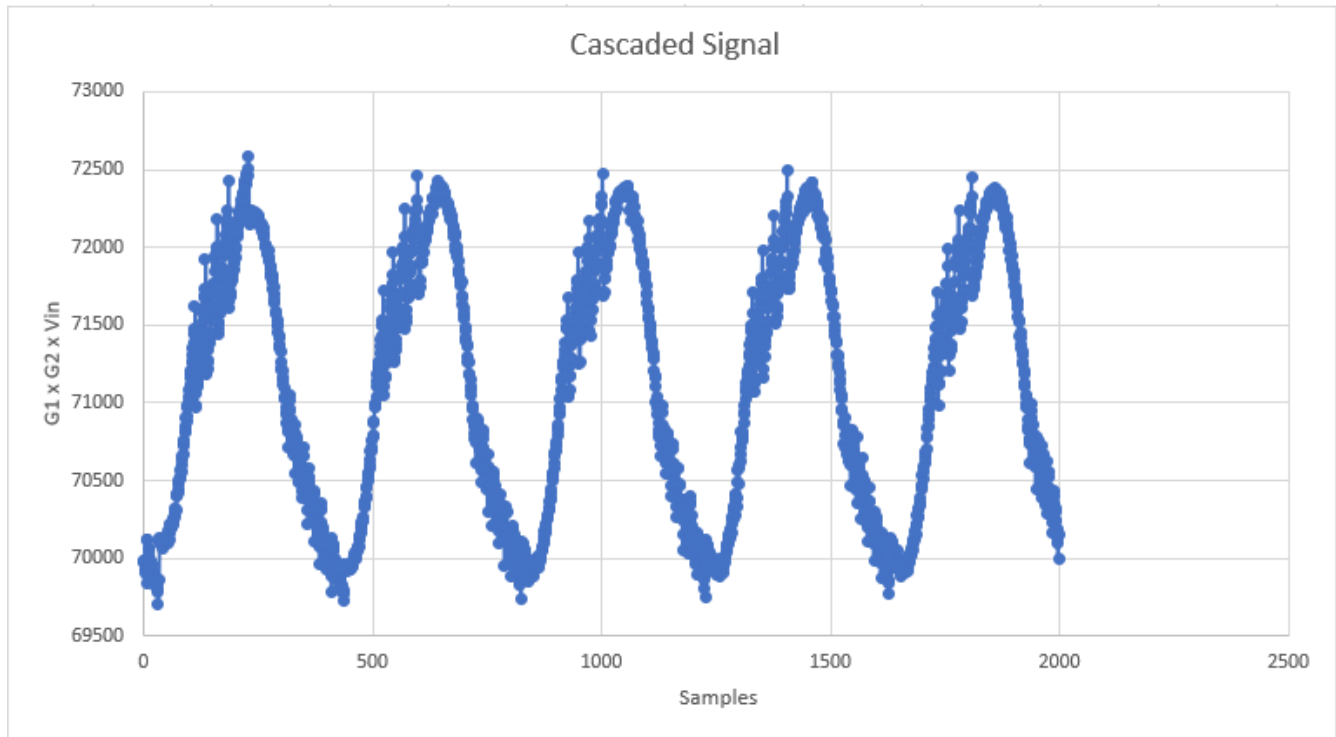


图 8-2. 级联信号

9 其他资源

- 德州仪器 (TI), [下载 MSPM0 SDK](#)
- 德州仪器 (TI), [详细了解 SysConfig](#)
- 德州仪器 (TI), [MSPM0G LaunchPad™](#)
- 德州仪器 (TI), [MSPM0 Academy](#)

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司