

# 基于 ZYNQ 的 ICP-MS 数据 采集处理系统设计与实现

苏伟童<sup>1</sup>, 韩文念<sup>2</sup>, 王康<sup>1</sup>, 田霖<sup>1</sup>, 赵珍阳<sup>3</sup>, 张勇<sup>3</sup>, 田中朝<sup>3</sup>, 汪曦<sup>1</sup>

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 天津智谱仪器有限公司, 天津 300134;

3. 山东东仪光电仪器有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:**数据采集系统是电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)的重要组成部分。本研究针对 ICP-MS 需要同步采集脉冲和模拟信号,且信号信噪比低的问题,提出了一种基于 ZYNQ 芯片的数据采集处理解决方案。利用 ZYNQ 集处理器和可编程逻辑于一体的特性,在 ARM 端搭载了用于流程控制及以太网通讯的 FreeRTOS 实时操作系统,在 FPGA 端基于 FIR compiler 和 MCDMA IP 核实现了数据的采集、缓存、动态滤波及传输。脱机测试结果表明,脉冲计数误差率小于 0.000 5%,模拟计数线性度高达 0.999 98,数字滤波幅频特性曲线与理论基本一致。在本团队自行研制的 ICP-MS 仪器中,利用本系统测试标准调谐液 TUNE D,数据采集满足仪器需求,配置 64 阶低通滤波后,模拟计数中<sup>115</sup>In 谱峰信噪比提高了 49.59%。该系统 FPGA 端各资源占用率均小于 50%,片上总功耗仅为 2.28 W,有利于推动质谱仪小型化、智能化发展。

**关键词:**电感耦合等离子体质谱(ICP-MS); ZYNQ; 数据采集; 动态数字滤波

**中图分类号:** O657.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-2997(2022)04-0473-09

**doi:** 10.7538/zpxb.2021.0216

## Design and Implementation of ICP-MS Data Acquisition and Processing System Based on ZYNQ

SU Wei-tong<sup>1</sup>, HAN Wen-nian<sup>2</sup>, WANG Kang<sup>1</sup>, TIAN Lin<sup>1</sup>,  
ZHAO Zhen-yang<sup>3</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>, TIAN Zhong-chao<sup>3</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin AIMS Instrument Co., Ltd, Tianjin 300134, China;

3. Shandong Dongyi Photoelectric Instrument Co., Ltd., Yantai 264000, China)

**Abstract:** Data acquisition system is an important part of inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). Aiming at the problem that ICP-MS pulse and analog signal need to be collected synchronously and the signal-to-noise ratio is low, a data acquisition and processing solution based on ZYNQ chip were proposed. Using the characteristics of ZYNQ integrating processor and programmable logic, the FreeRTOS real-time operating system for process control and Ethernet communication was equipped on the

ARM side. Three modules were designed on the FPGA side to realize data acquisition, cache, dynamic filtering and transmission, including counting module for synchronous acquisition of ICP-MS pulse signal and analog signal, FIR filter module supporting online configuration based on FIR compiler IP core, and dual channel data transmission module based on MCDMA IP core. The dynamic configuration of FIR filter module was controlled by ARM, and the filter coefficients were generated by ARM calculation to improve the universality of the system. Moreover, the communication between ARM and FPGA and between modules were all based on AXI4 bus. The Modbus/TCP transport protocol was used for Ethernet communication to ensure the stability and universality of the system. The system test was divided into two steps of offline test and online test. The offline test verified the function and performance of each module in the system. The performance of the pulse count module was tested by using the pulse signal generated by the signal generator AFG320 to simulate ICP-MS. After eliminating the error caused by the crystal vibration deviation, the relative error of the pulse count was less than 0.000 5%. The ADC in the analog count was calibrated by using DP832 DC regulator power supply and 34401A six-bit half-digital multimeter. The result showed that the fitting linearity is as high as 0.999 98. The digital filter performance was tested by inputting sinusoidal signals of different frequencies, and the results showed that the amplitude-frequency characteristic curve is basically consistent with the theory. A standard tuning solution, tune D (Thermo Fisher Scientific), was tested in our team's self-study ICP-MS instrument in-house using this system. It was found that the pulse count had little noise, while the analog count had a large amount of noise thereby affecting the subsequent spectral peak feature extraction. The noise spectrum distribution in the data was analyzed by FFT analysis of the analog count results, and the appropriate parameters of FIR digital filter were selected according to the characteristics of Gaussian peaks. After filtering, the analog count spectrogram is improved significantly, the main noise intensity attenuation is greater than 40 dB, and the signal-to-noise ratio of <sup>115</sup>In peak is increased by 49.59%. The filtered spectrum fully meets the requirements of subsequent peak feature extraction. The resource occupancy rate of the FPGA end of the system is less than 50%, and the total power consumption on the chip is only 2.28 W, which is conducive to promoting the miniaturization and intellectualization of mass spectrometry. In the future, algorithms can be designed at the ARM side or upper computer end to automatically adjust the filter parameters and further improve the degree of system automation.

**Key words:** inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS); ZYNQ; data acquisition; dynamic digital filtering

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)自20世纪80年代问世以来,凭借高灵敏度、超痕量检测限、多元素分析等特点,使其在医学、环境、半导体等领域具有举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。ICP-MS基本结构一般包括进样系统、ICP离子源、接口、离子光学系统、四极杆质量分析器、离子

检测器以及数据采集系统等<sup>[2]</sup>。其中,数据采集系统对检测器输出的数据进行采集、处理和传输,采集速度、采集稳定性、数据信噪比等均会影响仪器的扫描速度、灵敏度、分辨率等关键性能指标<sup>[3]</sup>。因此,一套实时、高效、稳定的数据采集系统是优质ICP-MS的必要条件。

ICP-MS 的检测器可以在脉冲模式和模拟模式下工作。脉冲模式负责测量样品中低浓度元素,检测器输出高频脉冲信号,脉冲频率反映元素浓度;模拟模式负责测量样品中高浓度元素,检测器输出微弱电流信号,电流大小反映元素浓度。通常情况下,在分析样品之前需要选择合适浓度的调谐溶液对 2 种模式下的输出信号做交叉校准<sup>[3]</sup>,将信号量统一为每秒脉冲计数(cps)。当计数率在  $10^4 \sim 10^6$  cps 时,检测器可同时输出脉冲和模拟 2 种检测信号<sup>[4]</sup>。因此,数据采集系统需要同时采集 2 种模式下的输出信号。

ICP-MS 的理想谱峰形状为矩形,由于离子的能量分散、空间电荷影响、加速电压的不稳定、四极杆的加工误差以及长度限制等原因,谱峰呈现为高斯峰<sup>[5-6]</sup>,并且由于电源波动、电子元件噪声、等离子体噪声、样品引入的不稳定<sup>[7]</sup>以及四极杆射频电源<sup>[8]</sup>和 ICP 射频源的不完全屏蔽等,使得采集到的信号存在大量噪声。前级模拟电路并不能完全滤除噪声,且由于环境中噪声的不确定性,模拟滤波并不具备良好的普适性。基于此,本研究拟采用动态可配置数字滤波器对质谱信号进行预处理以提高信噪比。

## 1 系统硬件电路设计

本系统的设计采用 Xilinx 公司的 ZYNQ 可扩展处理平台作为核心处理芯片,分为处理系统(PS)端和可编程逻辑(PL)端。其中,PS 端以 Cortex-A9 作为处理器,PL 端囊括了现场可编程门阵列(FPGA)逻辑单元和数字信号处理(DSP)资源<sup>[9]</sup>。系统硬件电路框图示于图 1,

其中 PL 端负责采集处理来自前级板的质谱信号并传输至同步动态随机存储器(DDR3)内存芯片中,PS 端负责实现整个系统控制流程并通过以太网与上位机进行实时交互。

ICP-MS 驻留时间最小为  $100 \mu\text{s}$ ,即模拟-数字转换器(ADC)采样率最小为 10 kHz。因此,ADC 采用美国 Analog Devices 公司生产的 AD7663 芯片,其是一款精度为 16 bit,最高支持 250 kHz 采样率的逐次逼近型 ADC,支持串行外设接口(SPI)通信,并且其工作功耗典型值仅为 35 mW,完全符合模拟计数要求。

脉冲信号的传输采用同轴连接器(BNC)与同轴电缆共同作用,可以减少传输过程中可能引入的干扰,提高信噪比。

ICP-MS 单次全扫总数据量约为 20 kB。因此,数据存储芯片采用 2 片型号为 NT5CB256M16EP-DI 的 DDR3 芯片,总容量为 1 GB。FLASH 芯片采用容量为 32 MB 的 W25Q256FVEI 芯片,完全满足系统程序设计要求。为实现质谱数据的实时传输,以太网芯片采用带宽千兆的 RTL8211E-VL 以实现上下位机实时通信。

## 2 系统软件逻辑设计

ZYNQ 内部逻辑框图示于图 2,其中 PL 端主要包括计数模块、滤波模块、数据传输模块,PS 端以 FreeRTOS 系统为内核负责整个数据采集流程的控制。并且,系统内部通信协议采用 ARM 公司推出的第四代高级标准可扩展接口协议(AXI4),该协议的各通道均利用 ready 和 valid 的双向握手机制来确保通信的

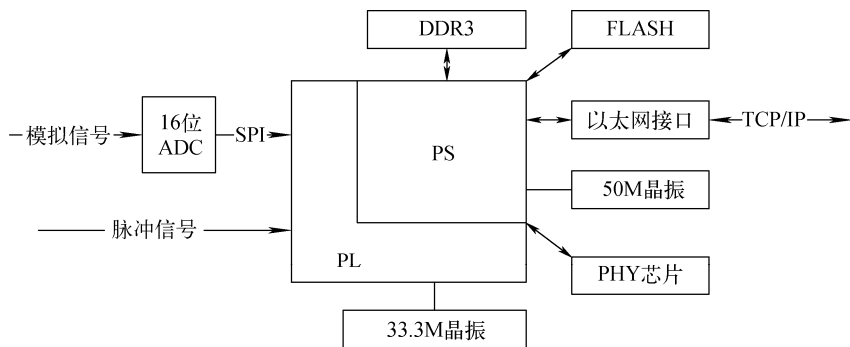


图 1 系统硬件电路框图

Fig. 1 System hardware circuit block diagram

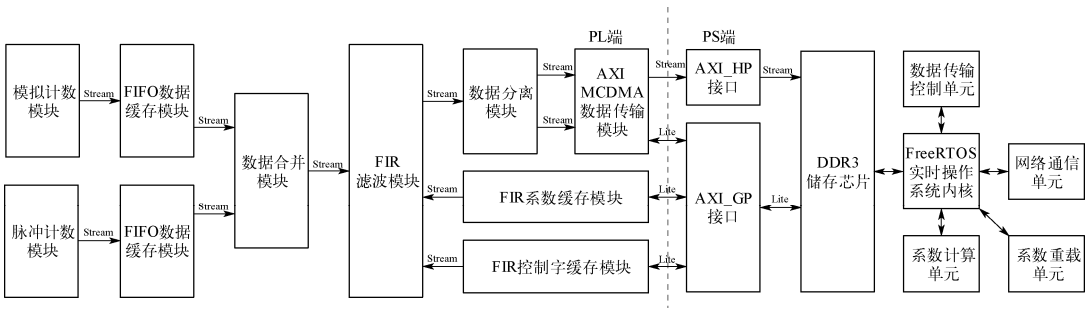


图2 ZYNQ 内部逻辑框图

Fig. 2 Internal logic block diagram of ZYNQ

精准控制及稳定。其中,PS 端与 PL 端的通信采用 AXI4-Lite 接口控制参数的传递,PL 端内部各模块间通信采用 AXI4-Stream 接口用于高速数据流的传输。

### 2.1 计数模块

ICP-MS 检测器脉冲模式输出的是高频电流脉冲信号,脉冲计数模块需要记录特定时间内的脉冲个数。由于所选检测器产生的脉冲持续时间最短为 5 ns,脉冲频率范围最高可达 10 MHz,因此选用 400 MHz 作为脉冲检测触发时钟。400 MHz 时钟由混合模式时钟管理器(MMCM)倍频全局时钟 200 MHz 产生。脉冲检测方式为上升沿检测,即检测到输入脉冲信号的上升沿时,计数器加 1。而检测器模拟模式输出的是微弱电流信号,前置放大通过电流电压放大将其转换成 0~2.5 V 电压信号后,由模拟计数模块控制 AD7663 模数转换器进行采集。

计数模块工作时序示于图 3,其中 Settling 信号用于模块的复位及采集开始,Capture 信号用于使能数据输出。为了防止后续模块由于初始化或延迟导致的数据丢失,数据采集后暂

时缓存在 FIFO 存储器中。

### 2.2 FIR 滤波模块

根据单位冲激响应的类型,数字滤波器可分为 FIR 滤波器和 IIR 滤波器<sup>[10]</sup>。对于 ICP-MS 数据,IIR 滤波器的相位非线性变化会导致谱峰信息失真,因此采用具有线性相位特征的 FIR 滤波器<sup>[11]</sup>。若用高斯峰来描述 ICP-MS 谱峰,则谱峰函数  $f(t)$  可表示为<sup>[12]</sup>:

$$f(t) = Ee^{-\left(\frac{t-m}{\tau}\right)^2} \quad (1)$$

其中, $m$  为谱峰的位置, $\tau$  为峰宽, $E$  为峰强, $t$  为峰持续时间。对式(1)进行傅里叶变换可得频率分布:

$$F(\omega) = \sqrt{\pi}E\tau e^{-\left(\frac{\omega}{\tau}\right)^2} \quad (2)$$

由此可知,谱峰信号为低频信号,频率分布与峰宽  $\tau$  有关。若将频域峰峰值衰减 70 dB 处的频率作为谱峰上限频率,则可大致表示为:

$$f_h \approx \frac{2.84}{\pi\tau} \quad (3)$$

可见,上限频率  $f_h$  与峰宽  $\tau$  成反比,即与扫描速度成反比。

本课题组自主研发的 ICP-MS 样机扫描速度为 1~100 ms/u,则谱峰上限频率约为 35~

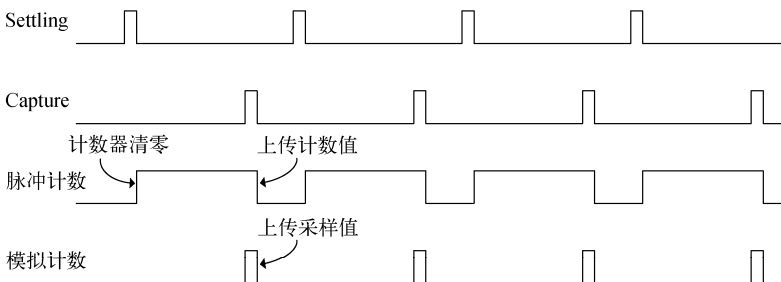


图3 计数模块工作时序图

Fig. 3 Working sequence diagram of counting module

3 500 Hz。因此需要设计一种 FIR 低通滤波器。

FIR 滤波模块设计基于 Xilinx 公司的 FIR compiler IP 核,可生成高度可参数化、高资源利用率以及高性能的 FIR 滤波器。滤波器架构采用脉动直接型以减小滤波器内部关键路径延迟,提高滤波速率。

FIR compiler IP 核支持双通道并行模式以实现同步滤波,但该 IP 核仅支持单个 AXI4-Stream 数据输入接口,因此需设计数据合并模块,将 2 通道 32bit 数据位宽总线合并为 64bit 数据位宽的单通道总线。同样,输出接口也采用数据分离模块将滤波后数据拆分为 2 通道。

滤波器初始系数通过导入 MATLAB fdatool 工具生成的对应 coe 文件来配置,并启用系数重载功能以实现动态 FIR 滤波器。初始滤波器采用 Hamming 窗设计为 200 阶截止频率 4 000 Hz 的低通滤波器,可以实现 53 dB 的最小阻带衰减。实际应用中可根据环境噪声的分布及实验要求,对窗函数、阶数以及截止频率进行动态调整以实现数据最佳预处理。系数生成采用计算方式而非传统的预存方式<sup>[13]</sup>,以提高系统的普适性,并且采用 PS 端计算系数以减小 PL 端资源的消耗,计算流程示于图 4。

动态系数的导入与配置由 PS 端控制实现(图 2),PS 端从 AXI\_GP 接口通过 AXI4-Lite 总线将系数与控制字发送至对应缓存模块,缓存模块将其转换为 AXI4-Stream 协议格式后依次发送至 FIR compiler IP 核。

### 2.3 双通道数据传输模块

双通道数据传输模块基于 Xilinx 公司的多通道直接内存访问(MCDMA)IP 核,每个通道支持独立的中断(图 2),采用 AXI-HP 接口作为 MCDMA 到 DDR3 的接口,最高传输速率可达 1 200 M/s。PS 端通过 AXI4-Lite 总线对 MCDMA IP 核的各数据通道初始化、状态、数据包信息以及管理寄存器进行配置访问,控制流程示于图 5。

本系统在运行过程中需要对数据传输进行控制,完成 FIR 滤波器系数计算与重载,并与上位机进行实时交互,这要求系统应具有高实时性和高稳定性,因此移植 FreeRTOS 实时操作系统到 PS 端<sup>[14]</sup>。以太网通信采用 Modbus/

TCP 传输协议以提高系统的稳定性、通用性和实时性<sup>[15]</sup>。

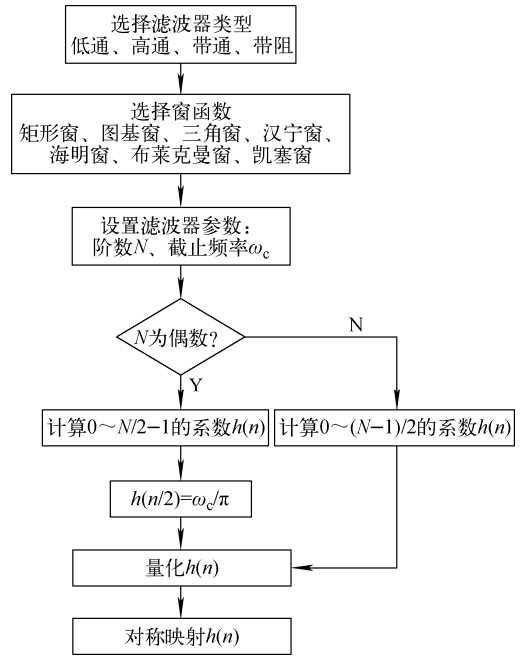


图 4 FIR 滤波器系数计算流程图  
Fig. 4 Flow chart of FIR filter coefficient calculation

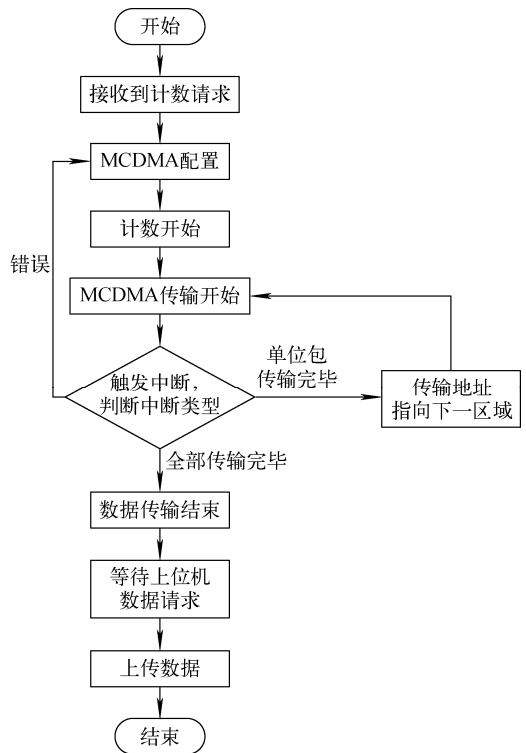


图 5 数据传输控制流程图  
Fig. 5 Flow chart of data transmission control

### 3 结果与讨论

#### 3.1 脱机测试

**3.1.1 脉冲计数** 为测量系统脉冲计数的准确度,利用 Tektronix 公司的 AFG320 信号发生器生成 LVCOMS-3.3 电平的脉冲信号来模拟 ICP-MS 检测器输出的脉冲信号。测试实验变量包括单次数据采集时间和信号发生器产生的脉冲频率。变量取值范围均大于 ICP-MS 真实参数取值范围。实验测试统计了采集值和采集相对误差,其中采集值为 1 000 次相同实验条件下采集结果的平均值,采集相对误差为采集误差与理论值的比值。实验采集相对误差示于图 6,可以看到,随着采集时间的增加,采集相对误差逐渐趋近于 0.002%。因此,推测采集误差主要由 ZYNQ 与 AFG320 所用基准晶振的偏差造成。

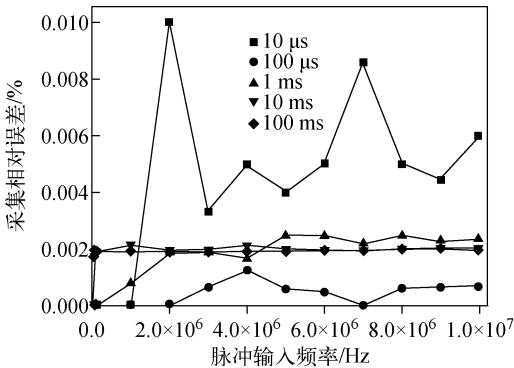


图 6 校正前实验采集相对误差

Fig. 6 Relative errors of experimental acquisition before correction

为准确验证脉冲计数性能,需要计算校正因子  $A$  来消除由晶振间偏差产生的误差。

$$T_c \cdot A = T_{sg} \quad (4)$$

其中,  $T_c$  为 ZYNQ 芯片所设采集时间,  $T_{sg}$  为实际信号发生器输出信号的时间。若用  $T_e$  表示  $T_c$  与  $T_{sg}$  相差的时间,则  $T_c$  可表示为:

$$T_c = T_{sg} + T_e \quad (5)$$

并且,  $T_e$  可用误差个数  $E$  与输入信号频率  $F$  表示,即:

$$T_e = \frac{E}{F} \quad (6)$$

采用线性相关系数最大的采集时间 100 ms 的数据来计算,校正因子  $A$  为 0.999 98。校正之

后再次测试,结果示于图 7,采集值与脉冲输入频率呈极强的线性关系,相对误差  $\leq 0.0005\%$ 。

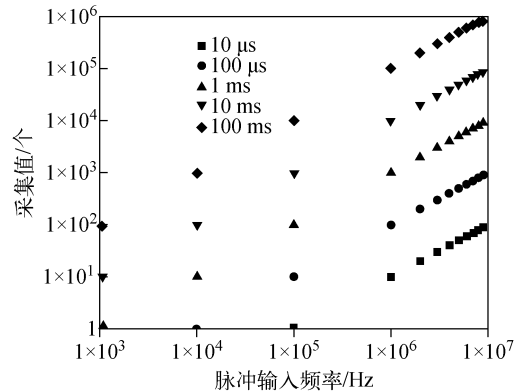


图 7 校正后实验采集值

Fig. 7 Experimental collected values after correction

**3.1.2 模拟计数** 为校准模拟计数中 ADC 采样,利用 RIGOL 公司的 DP832 直流稳压电源产生 0~2.5 V 模拟信号来模拟 ICP-MS 检测器输出的模拟信号,单次采集时间固定为 1 ms,采集个数为 1 000 个。同时,用 Agilent 公司的 34401A 六位半数字万用表测量模拟信号电压,将其作为标准输入电压与采样电压进行比较,采集结果示于图 8。

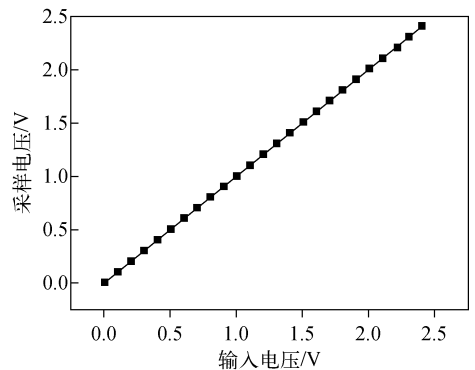


图 8 模拟计数测试结果

Fig. 8 Test results of analog counting

对结果进行线性拟合,拟合公式为:

$$y = 1.001x - 7.886 \times 10^{-4} \quad (R^2 = 0.99998) \quad (7)$$

其中,  $x$  为输入电压,  $y$  为采样电压。

**3.1.3 数字滤波** 为测试系统数字滤波性能,利用 Tektronix 公司的 AFG320 信号发生器

成 0~2 V 正弦波,频率范围为 10~100 kHz。利用系统模拟计数通道采集数字滤波,采样频率为 200 kHz,配置数字滤波模块为基于 Hamming 窗的截止频率 50 kHz 的 200 阶低通滤波器。采集信号后,对数字滤波进行快速傅里叶变换(FFT),记录对应频率的幅值,以此绘制滤波器幅频特性曲线,示于图 9。该实验结果与理论幅频特性曲线基本吻合。

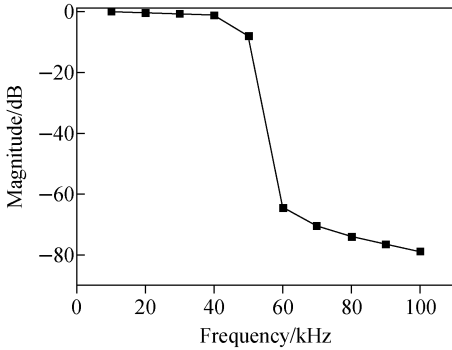


图 9 数字滤波测试结果

Fig. 9 Test results of digital filter

综上,本系统脉冲计数具有较高的准确度,模拟计数具有很高的线性度,数字滤波器表现出很好的滤波效果,在测试时整个系统表现出极高的稳定性,完全满足 ICP-MS 数据采集的需求。

### 3.2 上机测试

基于自行研制的 ICP-MS 测试平台,利用本系统测试  $5 \times 10^{-9} \mu\text{g/L}$  标准调谐液 TUNE D,质量范围 90~150 u,驻留时间 100  $\mu\text{s}$ ,通道数 30。首次测试时禁用系统滤波功能,直接获取原始脉冲和模拟双通道质谱数据,结果示

于图 10a、10b。可以看到,脉冲计数几乎没有噪声,信噪比满足后续谱峰特征提取需求,而模拟计数在经过前级板模拟滤波之后仍有大量噪声,其频谱分布图示于图 10c。信号中包含白噪声和部分高频噪声,而音频噪声<sup>[16]</sup>以及工频干扰均在谱峰信号频率范围内。

基于此,需要采用滤波器对信号进行降噪处理。如 2.2 节所述,本系统采用窗函数对 FIR 滤波器进行设计,并且支持多种窗函数。由图 10c 可知,大约 3.38 kHz 频率处噪声强度最大,为 0.118 6,需要至少衰减 30 dB,满足此衰减度的窗函数包括 Hanning、Hamming、Blackman 等,其中同等阶数下 Hanning 与 Hamming 的过渡带接近且最小,因此选择两者中最小阻带衰减偏大的 Hamming 进行 FIR 滤波器设计。观察频谱图并结合式(3)可得本次测试谱峰上限频率约为 1.2 kHz。综合以上参数设计了阶数 64 阶,截止频率 1.2 kHz,基于 Hamming 窗的低通滤波器,利用本系统数字滤波功能对模拟计数谱图进行滤波。为防止数字滤波对通带内谱峰信号的微小衰减影响后续交叉校正的准确性,需要对脉冲计数进行相同的滤波处理,滤波后数据分别示于图 11a、11b。

对比滤波前的质谱图,滤波后的脉冲计数几乎没有变化,而模拟计数噪声明显减少,对滤波模拟计数数据进行 FFT 可得到其频谱分布图,示于图 11c。通带外的噪声均已明显衰减,主要噪声频率衰减度列于表 1,均在 40 dB 以上;而通带内的噪声对质谱信号形状影响并不明显。若将质量数 140~150 u 处的数据作为噪声,<sup>115</sup>In 的谱峰信噪比由滤波前的 49.493 dB 增大为 74.037 dB,提高了 49.59%,得到明显改善。

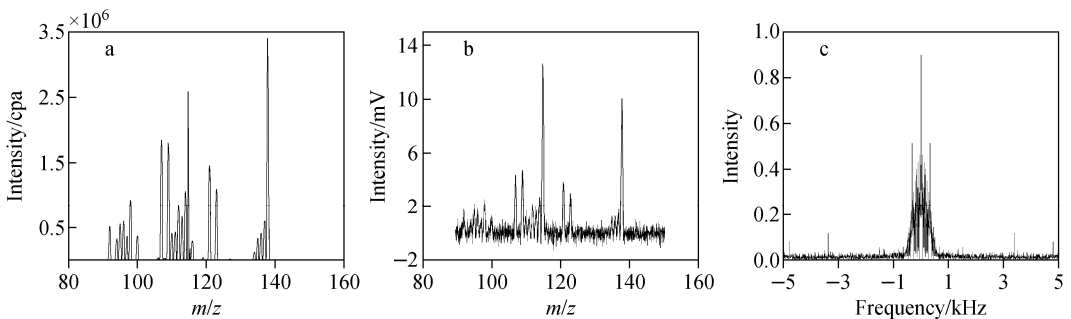


图 10 滤波前的脉冲计数(a)、模拟计数(b)、模拟计数频谱(c)

Fig. 10 Pulse counting (a), analog counting (b), analog counting spectrum (c) before filtering

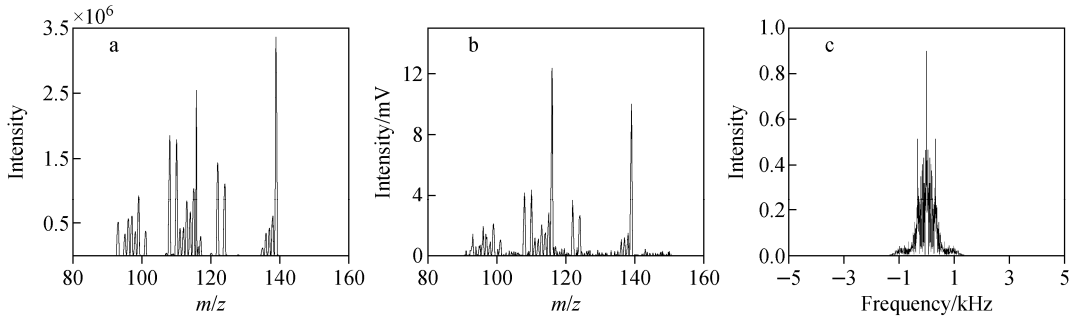


图 11 滤波后的脉冲计数(a)、模拟计数(b)、模拟计数频谱(c)

Fig. 11 Pulse counting (a), analog counting (b), analog counting spectrum (c) after filtering

表 1 模拟计数主要噪声频率衰减度

Table 1 Attenuation degree of main noise frequency of analog counting

| 噪声频率<br>Noise frequency/kHz | 滤波前强度<br>Intensity before filtering | 滤波后强度<br>Intensity after filtering | 衰减度<br>Attenuation/dB |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 1.518                       | $5.769 \times 10^{-2}$              | $3.196 \times 10^{-4}$             | -45.130               |
| 3.380                       | $1.186 \times 10^{-1}$              | $1.058 \times 10^{-4}$             | -60.992               |
| 4.796                       | $8.179 \times 10^{-2}$              | $5.787 \times 10^{-5}$             | -63.005               |

实际应用中,在得到脉冲和模拟 2 种模式下的数据后需要进行交叉校正,将模拟计数的数据转换为等效的脉冲计数数据<sup>[4]</sup>,即将模拟计数的数据单位 mV 转换为 cps。具体校正方式不再赘述,模拟计数校正之后的数据示于图 12。

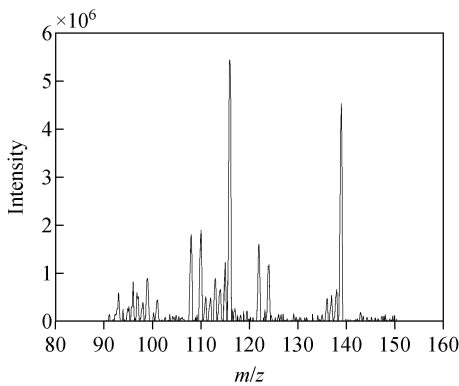


图 12 交叉校正后模拟计数谱图

Fig. 12 Analog counting spectrum after cross correction

质谱数据在经过 FIR 滤波后会向右偏移,即发生相位延迟,并且延迟的相位为滤波器阶数  $N$  的一半。因此,为获取正确的谱峰信息,本系统在采集完质谱数据后,会在数据

末尾补零进行数据延拓,并且丢弃滤波后前  $N/2$  个数据。

本系统 FPGA 端资源占用情况列于表 2。可以看到,各资源占用率均小于 50%,仍有足够余量用于后续功能模块使用,并且系统片上功耗仅 2.27 W。

表 2 系统 FPGA 端资源占用情况

Table 2 Resource occupation in system FPGA end

| 资源<br>Resource | 已使用<br>Utilization | 可用<br>Available | 占用比例<br>Utilization/% |
|----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|
| LUT            | 11727              | 53200           | 22.04                 |
| LUTRAM         | 2096               | 17400           | 12.05                 |
| FF             | 16762              | 106400          | 15.75                 |
| BRAM           | 54                 | 140             | 38.57                 |
| DSP            | 14                 | 220             | 6.36                  |
| IO             | 9                  | 125             | 7.20                  |
| BUFG           | 6                  | 32              | 18.75                 |
| MMCM           | 2                  | 4               | 50.00                 |

## 4 结论

本研究设计了一种基于 ZYNQ 的数据采集处理系统应用于电感耦合等离子质谱仪,相

比于传统的数据采集系统,该系统实现了双模式数据同步采集和传输,并创新性地设计了可在线配置的动态数字滤波器用于质谱数据预处理,适应不同环境噪声,实际测试中配置了 64 阶低通 FIR 数字滤波器,<sup>115</sup>In 的谱峰信噪比提高了 49.59%。该系统具有普适性,有利于推动质谱仪小型化、智能化进程。

### 参考文献:

- [1] SIMON M. Inductively coupled plasma mass spectrometry handbook[M]. New York: CRC Press, 2005: 385-462.
- [2] TAYLOR H E. ICP-MS practices and techniques [M]. San Diego: Academic Press, 2001: 29-51.
- [3] 李冰,杨红霞. 电感耦合等离子体质谱原理和应用[M]. 北京:地质出版社,2005:34-48.
- [4] THOMAS R. Practical guide to ICP-MS: a tutorial for beginners[M]. New York: CRC Press, 2008: 96-100.
- [5] BLAUM K, GEPPERT C, MÜLLER P, NORTERSHAUSER W, WENDT K, BUSHAW B A. Peak shape for a quadrupole mass spectrometer; comparison of computer simulation and experiment[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2000, 202(1/3): 81-89.
- [6] LONDRY F A, WELLS G J, MARCH R E. Enhanced mass resolution in a quadrupole ion trap[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 1993, 7(1): 43-45.
- [7] INCE A T, WILLIAMS J G, GRAY A L. Noise in inductively coupled plasma mass spectrometry: some preliminary measurements[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1993, 8(6): 899-903.
- [8] MARSH E, PRAT L, GILTON T, COWIN J P. Notch filter and fast current amplifier for use with time-resolved quadrupole mass spectrometers[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(9): 3 070-3 071.
- [9] XILINX. Zynq-7000 all programmable SoC technical reference manual[EB/OL]. (2021-04-02) [2021-12-01]. <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug585-Zynq-7000-TRM>.
- [10] 高西泉,丁玉美. 数字信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2016:153-157.
- [11] 王宁,黄泽建,刘梅英,楚士颖,戴新华,方向,江游,田地. 基于可编程门阵列的四极杆质谱仪数字滤波器的设计与应用[J]. 分析化学,2020,48(8):990-996.  
WANG Ning, HUANG Zejian, LIU Meiyong, CHU Shiyong, DAI Xinhua, FANG Xiang, JIANG You, TIAN Di. Design and application of digital filter for quadrupole mass spectrometer based on field programmable gate array[J]. Analytical Chemistry, 2020, 48(8): 990-996(in Chinese).
- [12] 程磊. 四极质谱仪数据采集电路的设计[D]. 南京:东南大学,2015.
- [13] 周盛,李仙琴,王晓春,何新喜,杨军,计建军,王延群. 全数字 B 超动态滤波器的设计与实现[J]. 中国生物医学工程学报,2010,29(3):418-421.  
ZHOU Sheng, LI Xianqin, WANG Xiaochun, HE Xinxi, YANG Jun, JI Jianjun, WANG Yanqun. Design and realization of a dynamic filter in digital B mode ultrasonography[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2010, 29(3): 418-421(in Chinese).
- [14] 刘滨,王琦,刘丽丽. 嵌入式操作系统 FreeRTOS 的原理与实现[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2005(7):8-11.  
LIU Bin, WANG Qi, LIU Lili. Principle and implementation of embedded operating system FreeRTOS[J]. Microcontrollers and Embedded Systems, 2005(7): 8-11(in Chinese).
- [15] 周明天,汪文勇. TCP/IP 网络原理与技术[M]. 北京,清华大学出版社,1993:1-10.
- [16] CRAIN J S, HOUK R S, ECKELS D E. Noise power spectral characteristics of an inductively coupled plasma-mass spectrometer[J]. Analytical Chemistry, 1989, 61(6): 606-612.  
(收稿日期:2021-12-29;修回日期:2022-02-23)