

基于 FPGA 的多道脉冲幅度分析器设计

焦波¹, 武丽¹, 杨民², 杨露¹

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对核辐射能谱测量, 介绍了一种基于 FPGA 的多道脉冲幅度分析器的设计。通过滤波成形、程控放大、A/D 采样、数据处理等软硬件模块的设计, 实现对核探测器输出信号的模拟变换和数字化。采用 Flash FPGA 作为数字核信号处理器, 设计了滤波、寻峰、道址计数、数据存储等模块, 实现对核能谱的获取。最后通过 UART 协议实现数字多道与 PC 端能谱分析软件的通信, 并完成能谱分析。

关键词: 核辐射; 放大; A/D 采集; FPGA; 寻峰; 能谱图

中图分类号: TP23

文章标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)24-0024-04

Design of the multi-channel pulse amplitude analyzer based on FPGA

Jiao Bo¹, Wu Li¹, Yang Min², Yang Lu¹

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper introduces a multi-channel pulse amplitude analyzer which is based on FPGA. Shaping, programmable amplification, A/D acquisition and data deal modules are designed in order to realize the nuclear detector simulation transformation. Using Flash FPGA as the nuclear signal processor, the modules of filter, peak find, counter and memory are designed to get nuclear energy spectrum. And then, the communication of digital multi-channel and PC energy spectrum analysis software is achieved by UART.

Key words: nuclear radiation; amplifier; A/D acquisition; FPGA; peak find; energy spectrum

核能谱的获取在核物理研究、射线探测和核技术应用领域意义深远。核谱仪的核心技术是多道脉冲幅度分析技术, 核辐射测量中, 入射粒子的能量与核探测器输出的电压脉冲信号幅度成正比关系, 测量脉冲信号的幅度就能得到核辐射能量。同时, 随着高速、高分辨率的 ADC 器件、数字信号处理器、可编程现场阵列技术的快速发展, 对脉冲幅度进行有效的提取和分析已经成为现实。

现有的数字型脉冲幅度分析器一般是将输入信号直接数字化、存储、传输, 主要借助计算机软件实现对脉冲信号的成形、堆积判别、运算分析等功能, 对采样要求、存储容量和传输速率要求非常高, 脉冲通过率低。本文设计了基于 FPGA 的多道脉冲幅度分析器, 能够实现对随机、快速的核辐射电压脉冲信号进行滤波、成形、放大、模/数转换、数字分析和能谱获取。采用 FPGA 实现数字核信号的处理具有较强的灵活性、稳定性和抗干扰性。该多道脉冲幅度分析器能广泛应用于核谱分析、射线探测、工业、医疗等领域。

1 系统方案设计

模拟式核谱仪主要以硬件电路方式实现核信号的放大成形、基线恢复、堆积判别以及峰值保持等处理^[1]; 数字核谱仪以高速 ADC 为核心, 主要利用数字信号处理器完成处理任务。本文结合模拟式核谱仪设计了滤波成形电路, 从硬件上实现核信号的堆积判别、基线恢复和高斯成形, 减少后续数字处理负担^[2]; 同时兼顾数字核谱仪优势, 摒弃采样保持等电路, 直接选择高速 ADC 芯片实现数字化。一方面, 最大限度减小系统死机时间, 提高脉冲通过率; 另一方面, 处理器无需做复杂的成形运算, 并尽可能高效地设计幅度提取算法。本文系统框图如图 1 所示。探测器检测输出的电压脉冲信号经过滤波成形模块、程控放大模块、A/D 采集模块实现模拟信号采集和量化; 数字信号进入 FPGA 处理器实现基线恢复、幅度提取、多道计数、存储、通信等功能^[3-7], 得到核辐射能量强度谱; 最后将能谱信息通过 UART 串行接口传输到 PC 上位机能谱分析软件, 实现能谱的分析。

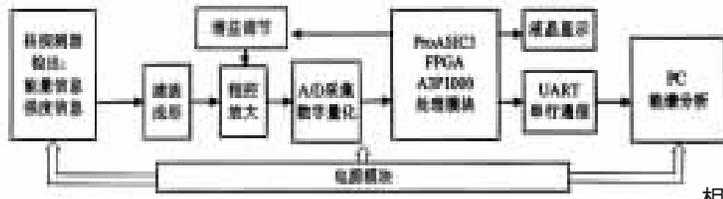


图1 系统结构框图

2 信号采集与量化

核辐射能量通过核探测器检出,核探测器常与前置放大器结合在一起,合称“探头”。测量条件和对象的不同使得探头输出信号幅度各异。为了使输出信号能满足后续信号采集与分析需求,信号调理部分需要设计增益可调的放大电路;同时模拟信号的数字量化是整个系统的基础,是后续信号处理和信息提取的依据。本节重点介绍信号的程控放大和 A/D 转换模块的电路设计。

2.1 程控放大电路设计

为实现增益可调整的放大电路,本文选用由 ADI 公司推出的低噪声、高带宽且具有增益可调整功能的集成运放 AD603。其工作带宽高达 90 MHz,增益的调整与控制电压成线性关系。电路设计如图 2 所示,图中采用两片 AD603 级联构成两级放大,都工作于高宽频带模式下,增益范围为 $-10\sim+30$ dB。设控制电压为 V_g ,则 V_g 为 1 脚与 2 脚端口电压差值,差值范围为 -500 mV $\sim+500$ mV,通过调节 1 脚端口电压值可实现增益调节。1 脚端口电压采用 DAC 输出进行控制,2 脚端口电压固定为 DAC 芯片内部参考电压 $V_{ref}=1.024$ V。数/模转换器采用 TI 公司推出的小型、低功率、两路电压输出型的 12 位数/模转换器 TLV5638,电压输出具有良好的线性关系,电路采用 DAC 芯片内部参考电压源 V_{ref} 。

2.2 A/D 采集电路设计

在多道脉冲幅度分析仪的设计中,数字量化误差也是影响能量分辨率的重要因子。使用片外高速 ADC 芯片进行数据采集,应当具备精准的基准电压源,本文选用了一款较高精度的低压差电源芯片 LM4120-2.0 提供 2.048 V 参考电压 V_{ref} 。ADC 转换器支持差分输入方式,

并且差动模拟信号输入时,转换器在总谐波失真和无杂散动态范围方面都获得最佳性能。本设计选用了 ADI 公司的高性能高速差分放大器 AD8138 进行模拟信号的单端到差分的驱动,该放大器模拟带宽 320 MHz,输入阻抗高达 6 M Ω ,可以直接与输入信号相连而省略隔离放大器。

系统选择 AD9226 作为多道分析仪的 ADC 芯片。AD9226 是 ADI 公司推出的高速、高分辨率的模/数转换器,该芯片有良好的线性关系,采取单电源供电,具有 12 bit 精度,数据并行输出,采样频率高达 65 MHz。芯片内集成高性能的采样保持放大器和参考基准电压源。AD9226 采用多级差分流水结构,带有误差校正功能,65 MS/s 采样率下能获得精确的采样数据。该电路设计如图 3 所示。电路采用外部基准电压,采样时钟采用 FPGA 输出的 64 MHz 时钟,信号差动输入,直接二进制码输出 12 bit 的转换数据。选择外部参考电压源,满量程值为 $V_{ref}=2.048$ V。

3 FPGA 系统设计

本文采用 FPGA 作为数字信号处理的核心处理器,运用 FPGA 实现数字信号的处理和分析,对脉冲信号的幅度进行统计从而得到能量信息。本节介绍 FPGA 内部模块结构设计以及数据寻峰模型的建立与设计^[8]。选取 Actel 公司推出的第三代 Flash 架构的 FPGA ProASIC3 作为核心处理器,该系列 FPGA 具有面积小、低阻抗性、非易失性、高度安全性和可靠性等特点。内部包含了大量的逻辑单元、存储单元、乘法器资源等常用电路结构,适合比较复杂的时序控制和数字信号处理应用。本系统需要运用到大量的 SRAM 存储单元,而 FPGA 内嵌的丰富存储资源满足设计要求,无需再外扩存储器,降低了开发成本。

3.1 FPGA 模块结构

FPGA 作为数字信号处理器,采用模块化设计方法,主要由 PLL 模块、FIFO 模块、基线恢复模块、幅度提取模块、双端口存储模块、串口通信模块以及系统逻辑控制模块组成。其模块结构框图如图 4 所示。

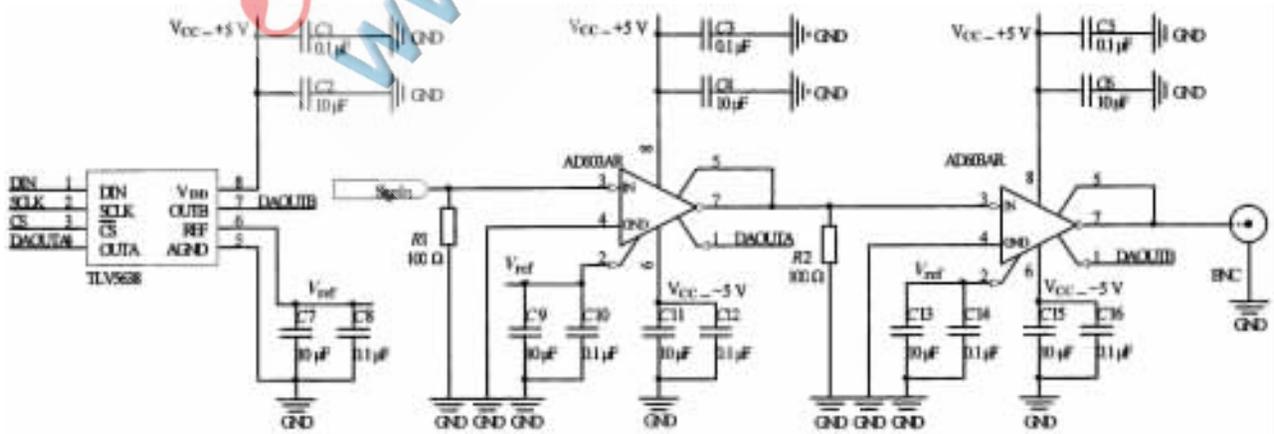


图2 AD603 放大电路

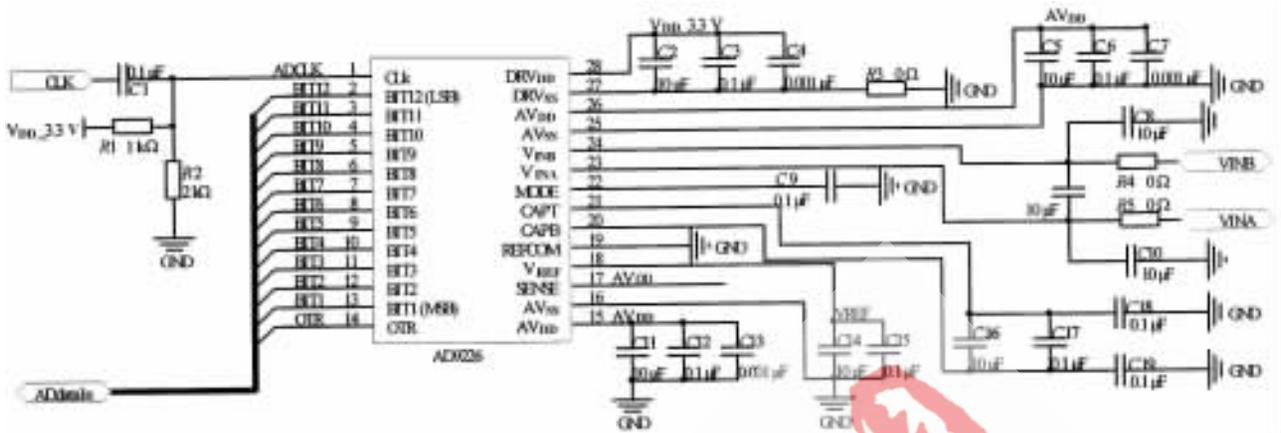


图 3 AD9226 外围电路设计

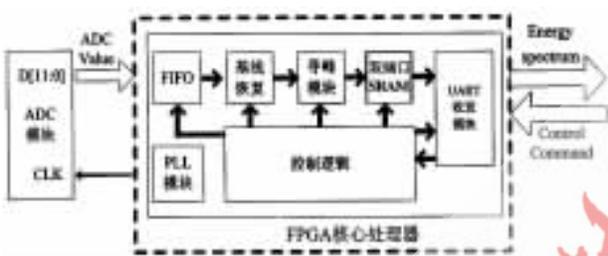


图 4 FPGA 模块结构框图

图 4 中, PLL 模块实现时钟倍频并产生 ADC 采样时钟, ADC 采样时钟也作为整个系统的同步时钟, 采集数据流 ADCValue 先通过 FIFO 模块实现缓存, 基线恢复模块实现对信号的不稳定基线进行扣除。幅度提取模块通过建立的数据寻峰算法完成脉冲峰顶值获取, 然后将峰值换算到对应道址并进行累计存储, 在能谱采集过程中, 定时将能谱强度信息通过 UART 通信模块传输到上位机, UART 同时可以接收上位机配置命令, 包括道址设置、增益设置以及采集时间设置等, 接收到的命令通过逻辑控制模块解析并控制整个系统。

3.2 寻峰模型

数据寻峰模块是系统是否能够准确、有效、快速地捕获核信号脉冲电压峰值的关键, 电压脉冲信号经过模拟变换后得到对称的高斯型波形, 波形宽度与微积分成形电路参数设置有关, 经过计算和实际测量, 本文设计的波形宽度 $\tau \approx 0.5 \mu\text{s}$, A/D 采集时钟 $\text{ADCLK}=64 \text{ MHz}$ 。则单个电压脉冲周期含采样点 $N=\text{ADCLK} \times \tau$ 。根据奈奎斯特采样定理得知, 采样后的数字信号能够完整地保留原始信号中的信息。寻峰算法选择动态双阈值比较法, 双阈值由阈值生成器动态确定, 分别是比较器的起止阈值。其寻峰模型如图 5 所示。

设单个脉冲周期内有离散点 $X(n), 0 \leq n \leq N$, n 为正整数, $N=32$ 。对 $X(n)$ 进行后向差分得:

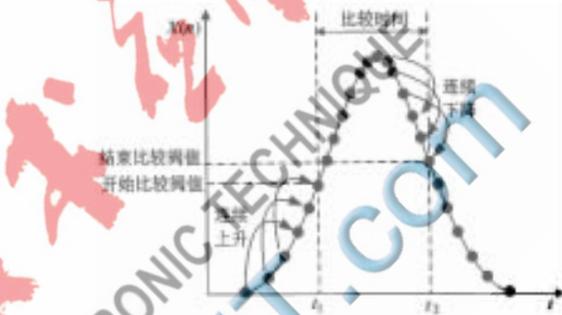


图 5 数据寻峰模型

$$\nabla X(n) = X(n) - X(n-\varepsilon) \quad (1)$$

式中 $\varepsilon=3$, 结合图 5 得, 在脉冲上升时间内有 $\nabla X(n) > 0$, 在脉冲下降时间内有 $\nabla X(n) < 0$ 。当 $\nabla X(n)$ 连续 m 次大于 0 时, 则确定开始比较阈值, 阈值为 t_1 时刻对应的 $X(n)$ 值。将开始阈值存于阈值比较器作为初始峰值, 打开阈值比较器开始比较, 数据流 ADCValue 逐一与阈值比较器中的峰值比较, 如果当前数据大于峰值, 则将阈值比较器中的峰值换为 ADCValue。这样不断循环比较使得在单个脉冲周期内阈值比较器保存了最大峰值, 在找到结束比较阈值时刻关闭阈值比较器。当 $\nabla X(n)$ 连续 m 次小于 0 时确定结束比较阈值, 图 6 中产生结束比较阈值时刻为 t_2, m 取值为 3。使用双阈值比较器可以有效避免信号在阈值前后振荡而造成重复寻峰。阈值比较器在确定开始阈值后启动, 在确定结束阈值后停止, 阈值比较器最终保持脉冲峰值。使用 ModelSim 仿真软件得到寻峰模块的仿真结果如图 6 所示。

4 结果与分析

本文采用 NaI(Tl) 探测器输出信号对该多道脉冲幅

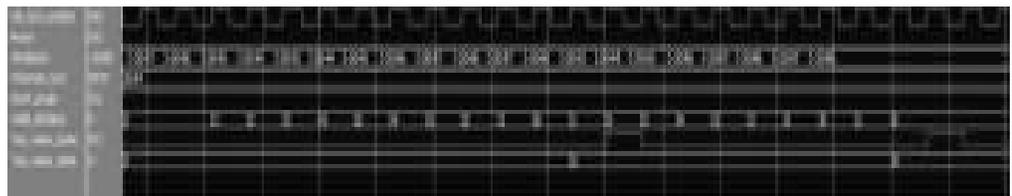


图 6 数据寻峰模型仿真图

度分析器进行了测试,该系统能够将快速的、随机的脉冲信号整形为满足采样要求的高斯型波形。测试信号经过多道脉冲幅度分析器处理后得到 Fe-55 源的实测能谱如图 7 所示,该图为系统设置为 1024 道多道分析器时的测试结果,图中可以清楚看出 Fe-55 发出的全能峰。通过对全能峰的分析得出,峰位半高宽为 12.4,能量分辨率为 5.4%(能量未标定);测量过程中,可以通过软件标定重点区域作特殊分析,也可以通过调整放大倍数使 Fe-55 核素的特征峰落在能谱的中央区域。该多道脉冲幅度分析仪的主要性能指标如表 1 所示。

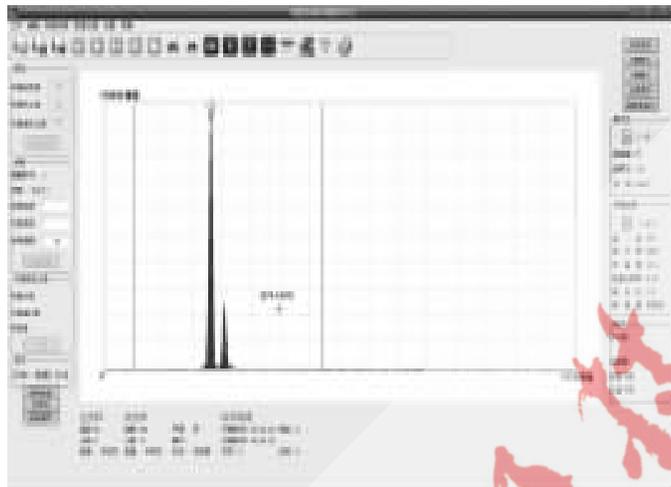


图 7 Fe-55 源的实测能谱图

表 1 中积分非线性指标测试利用滑移脉冲发生器输出频率固定幅度变化的脉冲串,进行重复多次测量和记录,得到反映能量线性的一组数据。数据通过积分非线性误差的计算式(2)得到,其中 N_{\max} 为最大信号幅度对应的最大峰值道址, ΔN_{\max} 是实测值与拟合曲线的最大偏差。DNL 与 INL 的测试方法大致相同。

$$\text{INL} = \frac{\Delta N_{\max}}{N_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

表 1 性能指标

指标类型	指标参数
信号输入范围	单极性: 0~5 V
可调增益	10/20/40/80/160 倍可调
道数	4 096 道
能量分辨率	<10%
积分非线性	<0.2%
微分非线性	<2%

参考文献

- [1] 王芝英,楼滨乔,朱俊杰.核电子技术原理[M].北京:原子能出版社,1989.
- [2] 晓林,方国明,弟宇鸣,等.核辐射脉冲幅度分析的基线卡尔曼滤波估计[J].原子能科学技术,2007,41(3):375-377.
- [3] 周清华,张软玉,李泰华.数字化核信号梯形成形滤波算法的研究[J].四川大学学报(自然科学版),2007,44(1):111-114.
- [4] 覃章健.基于 FPGA 的便携式数字核谱仪研制[D].四川:成都理工大学,2008.
- [5] 王磊,虞先国,成毅,等.基于 DSP 的数字多道脉冲幅度分析器设计[J].核电子学与探测技术,2009,29(4):880-882.
- [6] 许鹏,霍勇刚,邱晓林.核辐射信号数字测量与分析方法(上接第 27 页)研究[J].核技术,2008,31(10):791-795.
- [7] 王敏,方方,曹建宇,等.基于 FPGA 的数字脉冲成形技术的研究[J].电子技术应用,2013,39(7):87-88.
- [8] 肖无云,梁卫平,邵建辉,等.基于 FPGA 的数字化核脉冲幅度分析器[J].核电子学与探测技术,2008,28(6):1609-1611.

(收稿日期:2013-10-17)

作者简介:

焦波,男,1989 年生,在读研究生,主要研究方向:弱信号检测处理、智能仪器仪表。