

一种实时核脉冲信号峰值检测方法 及能谱分析

袁 源 张流强 罗小丽 李盈霖

(重庆大学 光电技术与系统教育部重点实验室 重庆 400044)

摘要 针对双阈值峰值检测算法的两个缺陷,提出了一种新型实时单阈值峰值检测方法。该方法采用状态机方式,在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)中实现,方法中三个状态能够灵活转移,抗噪声能力强,且输出峰值稳定,错误率低,以 ^{241}Am 放射源为例,测量不同阈值下的能谱图,通过分析比对确定了实验中的最佳阈值。对比有放射源和无放射源下的能谱图,测定了能谱中噪声峰的位置。最后通过 ^{241}Am 的三个主要光子能量强度确定了能谱峰的各个峰的成分,验证了该方法的可行性。为后续系统的优化、多通道的扩展、光子成像的应用等提供了基础。

关键词 实时峰值检测, 单阈值, 状态机法, 能谱分析, 现场可编程门阵列

中图分类号 TL82

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.020404

A real-time peak detection method for nuclear pulse signal and energy spectrum analysis

YUAN Yuan ZHANG Liuqiang LUO Xiaoli LI Yinglin

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract [Background] Most real-time peak detection algorithms are based on double threshold which have two, defects: 1) pulse near the threshold line can not be detected well; 2) the peak output point is unstable. [Purpose] This study aims to overcome the disadvantage of double threshold peak detection algorithm by proposing a new real-time peak detection method based on single threshold. [Methods] Single threshold detection method is implemented in field programmable gate array by using state machine. Three states, i.e., seeking the minimum state, seeking the maximum state and peak output state, can be switched randomly. The ^{241}Am radiation source was taken as an example to measure the energy spectra under different thresholds. The optimal threshold was selected by comparing the spectrum of different thresholds, and the components of the spectrum were determined by comparing the noise peak to the signal peak. and the output peak is stable. [Results] Three main photon energy intensities of ^{241}Am were verified by using this method to determine the composition of each peak of the energy spectrum. [Conclusion] Single threshold method can improve the shortcoming of double threshold algorithm, and has good application in energy spectrum measurement.

Key words Real-time peak detection, Single threshold, State machine method, Energy spectrum analysis, FPGA

随着数字化脉冲处理技术(Digital Pulse Processing, DPP)^[1-2]的发展,数字化多道脉冲幅度

分析逐渐成为多道分析的主流^[3-4]。在脉冲幅值检测方面,实时脉冲信号峰值检测较非实时检测^[5]有

国家自然科学基金(No.61274048)资助

第一作者: 袁源, 男, 1994年出生, 2016年毕业于华北水利水电大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核辐射探测技术

通信作者: 张流强, E-mail: zlq@cqu.edu.cn

收稿日期: 2018-10-09, 修回日期: 2018-12-29

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61274048)

First author: YUAN Yuan, male, born in 1994, graduated from North China University of Water Resources and Electric Power in 2016, master student, focusing on radiation detection technology

Corresponding author: ZHANG Liuqiang, E-mail: zlq@cqu.edu.cn

Received date: 2018-10-09, revised date: 2018-12-29

寻峰速率快、占用缓存小、可扩展通道数多等优点。因而在多通道、大规模核能谱测量中,实时峰值检测方法具有重要的应用。

目前,大部分的实时峰值检测算法都是基于双阈值(或者是高低阈值)方式实现^[6-10]。但很多文献中对算法的具体实现方式描述较为模糊,得出的结论也多是基于理论上或者仿真形式上,使用起来较为不便。

基于此,本文介绍了一种新型的单阈值实时峰值检测方法。该方法通过状态机的方式,在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)中实现。方法简单有效,识别峰值效率高,在实际的核辐射能谱测量中表现优异。文中采集了多

个阈值下的能谱图像,相互对比后确定了实验中的最佳阈值。利用该方法,通过碲锌镉(CdZnTe, CZT)探测器对²⁴¹Am放射源进行能谱实验测试,并对获得的能谱图进行有关分析^[11-13],为后续系统的优化提供了基础。

1 能谱系统的搭建

本文选取²⁴¹Am放射源,使用CZT探测器^[14]对其进行核辐射探测。构建后续信号读出电路^[15],对探测器生成的脉冲进行幅度测量并计数,最后传输到上位机中进行显示并分析。系统的总体结构如图1所示。

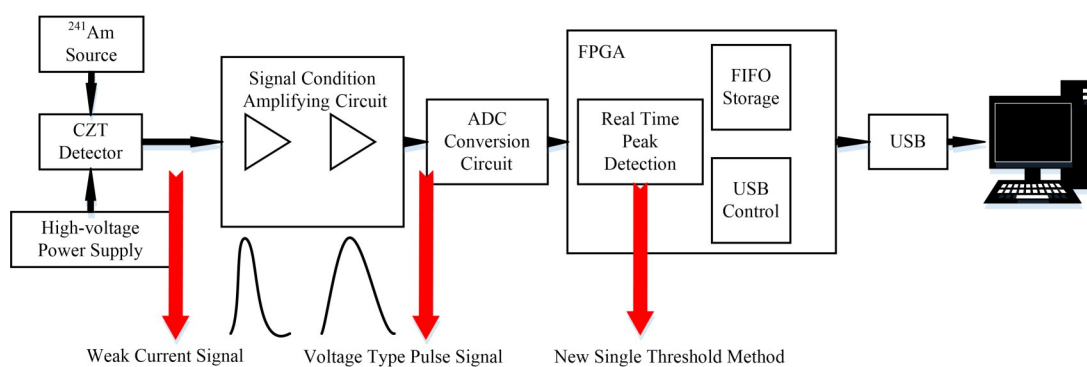


图1 系统结构框图
Fig.1 System structure block diagram

信号放大调理电路将探测器输出的微弱电流信号转化成模拟数字转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)可输入范围内的电压型脉冲信号。经过ADC离散量化之后传入到FPGA,进行实时峰值检测,检测到的峰值信息存储到先入先出队列(First Input First Output, FIFO)中,并通过USB协议传输到PC机进行处理显示。

实验中,前端调理电路出来的电压型脉冲信号幅度较小,最大值仅有530 mV左右,最小值为

-72 mV,不满足ADC中0~2 V的输入范围,如图2(a)所示。因此需采用信噪比较高的运放搭建一个信号变换电路,使整体信号放大且往上平移。这里选用ADA4805作为放大器芯片,采用ADR130作为放大器反向端的基准芯片。处理后的信号如图2(b)所示。另外,从图2可以看出,脉冲信号宽度在2~18 μ s,幅值较小的信号宽度也较小,我们将宽度大于2 μ s的脉冲认定为核辐射事件脉冲。

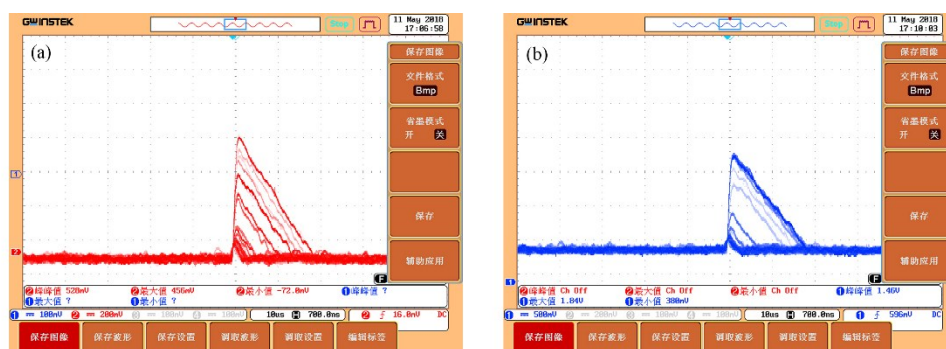


图2 放大前(a)和放大后(b)的信号
Fig.2 Signal waveform before (a) and after (b) amplification

系统中,ADC采用AD9226,输入 V_{pp} 为2 V,前端采用AD8138将信号进行单端转差分处理;FPGA采用CycloneIV系列的EP4CE10F17C8;USB则使用CY7C68013A,将其设置为Slave FIFO模式;上位机软件采用C#编写,使用多线程方式,实现多通道能谱显示、滤波、峰值计数等功能。

2 新型实时峰值检测方法

2.1 双阈值方法存在的问题

一般的双阈值方法,即高阈值时初始化最大值

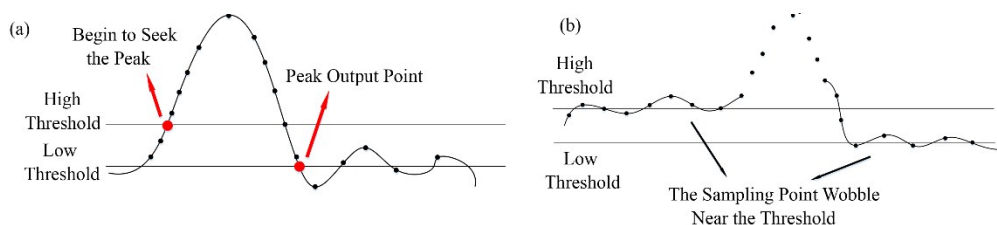


图3 理想状态下(a)和实际状态下(b)的双阈值检测
Fig.3 Dual threshold detection in ideal state (a) and actual state (b)

由图3可知,双阈值可能会存在如下两个问题:

1)处于阈值线附近的脉冲,峰值不能很好被检测到。

2)峰值输出点不稳定。

通过FPGA将ADC的采样率设置为40 MSPS,则采样间隔为25 ns,相对于前端输出的时间宽度在2~18 μ s的电压脉冲,一个脉冲周期内采样点数在80~720,脉冲宽度相对于采样间隔很宽。所以在阈值附近的采样点变化程度会很小,对于大幅度脉冲,最后采样点会上升到一定的高度并远离阈值线,不会对峰值检测造成影响。但对于幅度在阈值线附近的脉冲,如图3(b)所示,其采样点大部分在阈值线上下摆动,这样就会出现这个问题,即程序可能一直处在初始化最大值寄存器这个状态,脉冲峰值不能很好被检测到,也无法完整地实现一个寻峰周期,导致了以上第一个问题。

同时,在脉冲下降沿,双阈值是通过低阈值线检测采样点,并输出峰值。但在低阈值附近,如图3(b)所示,很多采样点可能也在阈值线上下摆动,这就对峰值输出的时刻点判断造成干扰,可能会不断重复输出幅值数据,更坏的情况是输出错误的峰值数据且寻峰周期紊乱,导致了以上第二个问题。

寄存器,开始寻峰,低阈值时,通过最大值寄存器减去最小值寄存器获取峰值并输出,同时初始化最小值寄存器,实现一次完整的寻峰过程。如图3(a)所示。

理想的情况下,采样点曲线如图3(a)所示,光滑且连续上升。但是实际中,采样点不一定连续上升,可能在某个区域摆动然后再缓慢上升,特别是当脉冲宽度相对于采样间隔很宽时,这种情况尤为明显,如图3(b)所示。

2.2 单阈值峰值检测原理

由图3(b)可以看出,双阈值方法存在的问题主要由于采样数据点在阈值线上下摆动造成的。结合这一点,本文提出了单阈值峰值检测方法。原理如下:

峰值检测分为三个状态:寻找最小值状态、寻找最大值状态和峰值输出状态。

1)初始化峰值检测,首先进入到寻找最小值状态。设立单阈值条件,如果采样数据点低于此阈值,则继续本状态,并不断刷新最小值寄存器;否则采样数据点高于此阈值,则立刻进入到寻找最大值状态,计数器开始累加并不断刷新最大值寄存器;

2)当计数器值大于80(即时间宽度大于2 μ s)且采样数据点低于此阈值时,进入到峰值输出状态同时计数器清零,如果中途某一时刻采样数据点低于了此阈值,则立刻重新返回到寻找最小值状态同时计数器清零;

3)当状态变成峰值输出状态后,立刻用最大值寄存器值减去最小值寄存器值,输出峰值数据和写标志位,同时初始化最大值最小值寄存器,状态转移至寻找最小值寄存器状态。完成一次寻峰过程。

如图4所示,峰值检测原理的状态机表示。其中,峰值输出状态需要满足严格的条件才能到达,且

只需一个时钟周期完成,便立刻进入到下个寻峰周期状态中。这样能改善双阈值的第二个缺点,即保证每个寻峰周期只输出一个峰值数据。同时,寻找最小值状态与寻找最大值状态能够实现轻松切换,即一个寻峰周期中前期数据点的改变不会影响后续峰值的输出,这样就能改善双阈值的第一个缺点,即保证峰值能稳定的被识别。图5为单阈值峰值检测中脉冲形状与状态变化的关系。前三个状态形成一个完整的周期,即能输出峰值。后面的4个状态形成不了完整周期,无法输出峰值。实际上,如果脉冲的宽度小于 $2\mu\text{s}$,则不认为其是核辐射事件产生脉冲,可以作为噪声屏蔽掉,这样能提高系统的抗噪声能力。并且从图5可以看出,寻找最大值状态与寻找最小值状态能够轻松切换,使得峰值的寻找更加方便。

FPGA 的精髓之一在于状态机的使用,而单阈

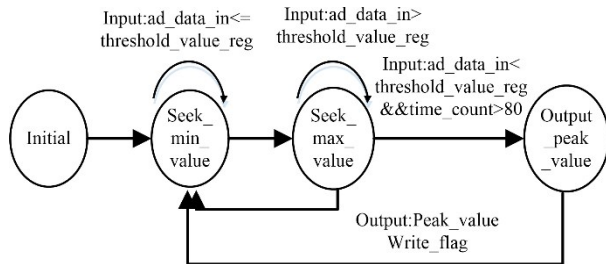
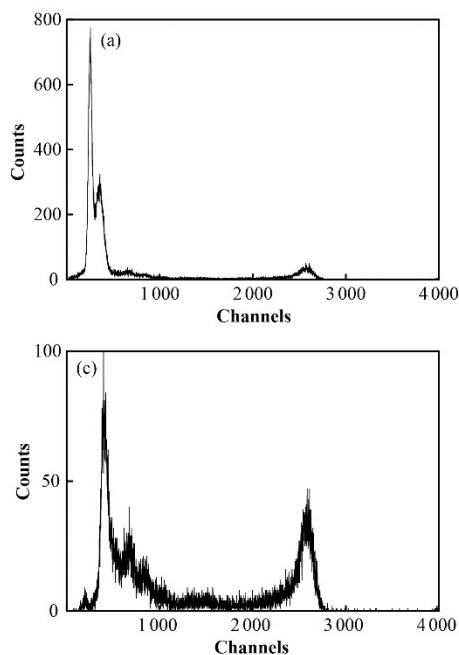


图4 实时单阈值峰值检测状态机
Fig.4 State machine of real time single threshold peak detection



值峰值检测方法就是结合这一精髓,不仅使代码变得更简洁,而且使代码变得更高效率灵活,不易紊乱。再结合FPGA的并行特点,能够轻松实现多通道实时性的测量,这也为后续的工作提供了保障。

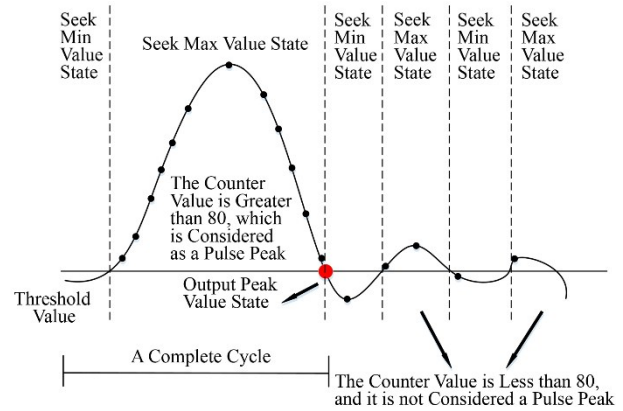


图5 脉冲形状与状态变化的关系
Fig.5 The relationship between the shape of the pulse and the change of state

3 测得能谱数据分析比对

使用上述的实时单阈值峰值检测方法,系统能够测得 ^{241}Am 的完整能谱图像。将单阈值分别设置为330、350、370、400(这里的阈值为ADC的范围0~4 095,单位为LSB,若转化为幅值需乘0.48,幅值单位为mV),测量时间设置为300 s,分别得到如图6的4个能谱图像。

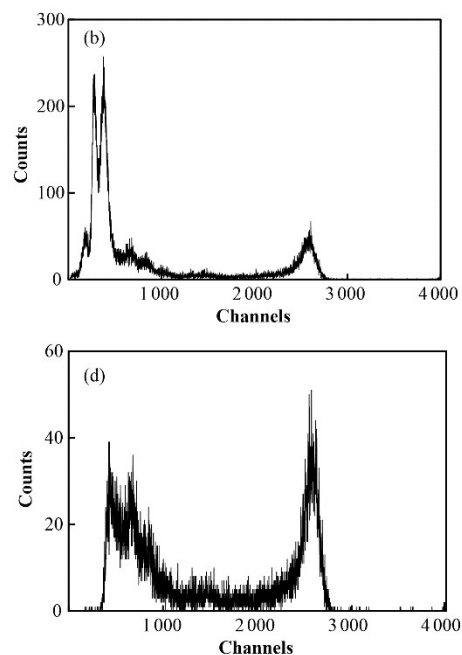


图6 测量时间300 s,阈值分别设置为330 (a)、350 (b)、370 (c)、400 (d)下的各能谱图
Fig.6 Energy spectra with 300 s measuring time at various thresholds (a) 330, (b) 350, (c) 370, (d) 400

定义道址小于1 000(即幅值低于480 mV的脉冲)的信号为小信号。从图6可以看出,当阈值设置逐渐增大时,小信号的计数量有明显的减少,这与理论情况相符合,即阈值线高于输入脉冲幅值时,脉冲将不会被采到。比对图6(a)和(b)可以看出,当阈值过小时,小信号的计数量将大量增加,这是因为阈值逐渐接近基线后,一些噪声脉冲伴随着信号脉冲被采入到系统中,这一点后续将会证明。

如图7所示,4个阈值下能谱道址大于500后的图像基本重合,说明无论阈值选取多大,在阈值之上的信号脉冲计数量基本一致,这也反映出系统的一致性较好。仅观察第2个峰,发现随着阈值的减小,其逐渐“显现”出来,说明阈值越小,能谱被测得越完整。再观察第1个峰,在370、400的阈值下没有出现,但在350、330的阈值下出现并迅速增高,我们怀疑它为噪声峰,并通过下面实验来证实。

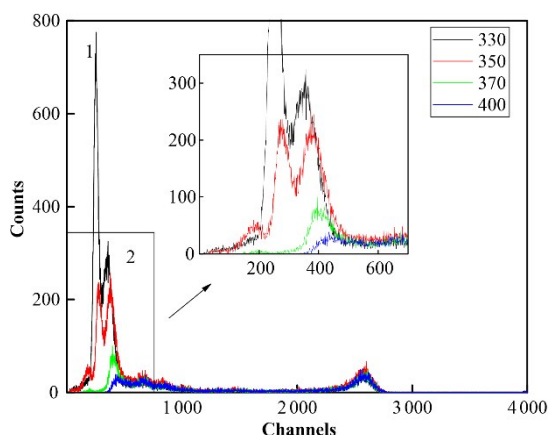


图7 测量时间300 s,阈值分别设置为330、350、370、400下的汇总能谱图

Fig.7 Summary energy spectra with 300 s measuring time at various thresholds (330, 350, 370, 400)

调整阈值为330,测量时间为300 s,分别测得有放射源和无放射源时的能谱图像,如图8所示,发现无放射源的能谱图在峰位和计数量上和有放射源能谱图的第1个峰完全对应,证明第1个峰确实是噪声峰。观察图7,在阈值为350时,噪声峰(第1个峰)和信号峰(第2个峰)能很好地区分,但信号峰测得不完整。阈值为330时,噪声峰和信号峰区分没有前者好,但是信号峰能完全测出来,同时噪声峰也特别高。继续降低阈值后(本文未画出该图)发现,噪声峰将信号峰吞噬导致信号峰消失,这说明阈值降的太低已经严重影响系统的脉冲信号识别了。

通过以上分析可以判断330左右是合适的阈值点。该阈值点能够在噪声和信号之间取得一个良好的平衡。

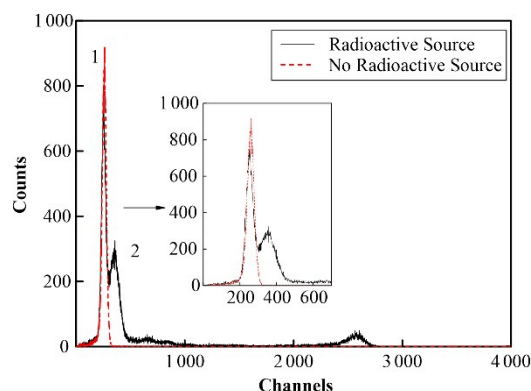


图8 有放射源和无放射源时能谱图的对比
Fig.8 Comparison of energy spectra with and without radioactive sources

设置阈值为350,测得600 s时间下的能谱图做能谱分析。将横坐标道数转化成能量值,并将 ^{241}Am 的主要光子能量值标注出来。如图9所示, ^{241}Am 的三个主要光子能量强度(13.9 keV、26.3 keV、59.5 keV)均能从中体现。不仅如此,我们还测到了能量为17.8 keV的峰,这个在标准核素表中没有,但在其他机构测得的能谱图中均有体现^[16]。综合来看,本系统能够将 ^{241}Am 的能谱图的峰位完全测出来,估算此能谱分辨率在7.7%左右。

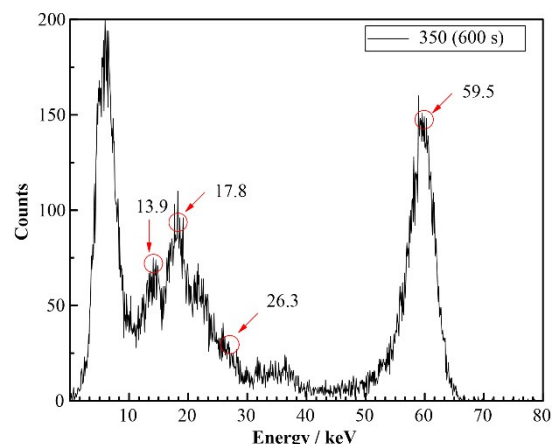


图9 道址转化成能量值后的能谱图
Fig.9 The energy spectrum after the transformation of the channel into the energy value

4 结语

本文具体分析了双阈值实时峰值检测算法的缺点,并针对该缺点提出了改进的单阈值实时峰值检测方法。通过叙述其原理,以及能谱测量实验验证,证明了该方法的可行性。文中通过对不同阈值下能谱谱图的比对,选择了最优的阈值条件。通过噪声峰跟信号峰的比对,以及 ^{241}Am 的三个主要光子能量

强度大小,确定了能谱的各部分组成成分。为后续系统的优化,多通道的扩展,光子成像的应用等提供了基础。

参考文献

- 1 Abbene L, Gerardi G, Principato F. Real time digital pulse processing for X-ray and gamma ray semiconductor detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, **730**: 124–128. DOI: 10.1016/j.nima.2013.04.053.
- 2 Gerardi G, Abbene L. A digital approach for real time high-rate high-resolution radiation measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014, **768**: 46–54. DOI: 10.1016/j.nima.2014.09.047.
- 3 肖无云, 魏义祥, 艾宪芸, 等. 数字化多道脉冲幅度分析技术研究[J]. 核技术, 2005, **28**(10): 787–790.
XIAO Wuyun, WEI Yixiang, AI Xianyun, *et al.* Research on digital multi-channel pulse height analysis techniques[J]. Nuclear Techniques, 2005, **28**(10): 787–790.
- 4 丁卫撑, 王义, 方方. 一种实用多道脉冲幅度分析器[J]. 核技术, 2012, **35**(8): 630–634.
DING Weicheng, WANG Yi, FANG Fang. A practical multi-channel pulse amplitude analyzer[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(8): 630–634.
- 5 桑子儒. 多道脉冲幅度谱仪的硬件快速寻峰方法[C]. 第十五届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 贵州: 中国电子学会核电子学与核探测技术会, 2010: 55–59.
SANG Zirui. A peak value searching method of the MCA based on digital logic devices[C]. Proceedings of the Fifteenth National Annual Conference of Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology, Guizhou: China Electronics Society Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology Association, 2010: 55–59.
- 6 任勇, 魏彪, 冯鹏, 等. 随机脉冲序列的ns级时间检测及峰值检测[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(7): 1101–1105.
REN Yong, WEI Biao, FENG Peng, *et al.* Time and peak detection for random pulse sequence at ns level[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2009, **21**(7): 1101–1105.
- 7 纪圣谋, 刘先昆, 潘红兵, 等. 核脉冲波形甄别[J]. 电子测量技术, 2006, **29**(1): 58–59. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2006.01.036.
JI Shengmou, LIU Xiankun, PAN Hongbing, *et al.* Nuclear pulse shape discrimination based on DSP techniques[J]. Electronic Measurement Technology, 2006, **29**(1): 58–59. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2006.01.036.
- 8 暴洪涛, 程智, 陈锋, 等. 基于FPGA的实时脉冲信号峰值检测方法[J]. 军事医学, 2015, **39**(5): 377–378. DOI: 10.7644/j.issn.1674-9960.2015.05.014.
BAO Hongtao, CHENG Zhi, CHEN Feng, *et al.* An algorithm of real-time peak detection for pulse signals based on FPGA[J]. Military Medicine Science, 2015, **39**(5): 377–378. DOI: 10.7644 / j. issn. 1674-9960.2015.05.014.
- 9 何艳, 张流强, 张建, 等. 基于FPGA的高速峰值检测[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(1): 43–47.
HE Yan, ZHANG Liuqiang, ZHANG Jian, *et al.* High-speed peak detecting based on FPGA[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(1): 43–47.
- 10 彭国杰, 张微, 王忆文, 等. 用于条码信号峰值检测的改进动态双阈值算法[J]. 微电子学与计算机, 2014, **31**(4): 164–167. DOI: 10.19304 / j. cnki. issn1000 - 7180.2014.04.040.
PENG Guojie, ZHANG Wei, WANG Yiwu, *et al.* Improved dynamic dual threshold algorithm for peak detection of barcode signal[J]. Microelectronics & Computer, 2014, **31**(4): 164–167. DOI: 10.19304/j.cnki. issn1000-7180.2014.04.040.
- 11 张爱华, 王平, 丑永新. 基于动态差分阈值的脉搏信号峰值检测算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, **44**(3): 847–852. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201403043.
ZHANG Aihua, WANG Ping, CHOU Yongxin. Peak detection of pulse signal based on dynamic difference threshold[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, **44**(3): 847–852. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201403043.
- 12 黎淼. 面元像素CdZnTe高能辐射探测器原理、系统及特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
LI Miao. Principle, system and characteristics of pixellated CdZnTe detector for high energy radiation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- 13 王一鸣, 魏义祥. 基于CZT探测器的SPRD采集系统研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(3): 259–262.
WANG Yiming, WEI Yixiang. Research on SPRD acquisition system based on CZT detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **31**(3): 259–262.
- 14 王玺, 肖沙里, 张流强, 等. 基于CdZnTe晶体的2×2像素阵列探测器研究[J]. 光电子·激光, 2010, **21**(5): 639–643. DOI: 10.16136/j.joel.2010.05.003.
WANG Xi, XIAO Shali, ZHANG Liuqiang, *et al.* Study of 2 × 2 pixellated nuclear radiation detector based on CdZnTe[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, **21**(5): 639–643. DOI: 10.16136/j.joel.2010.05.003.

- 15 Hu W, Choi Y, Hong K J, *et al.* Free-running ADC- and FPGA-based signal processing method for brain PET using GAPD arrays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, **664**: 370 – 375. DOI: 10.1016/j.nima.2011.05.053.
- 16 Bell S J, Baker M A, Duarte D D, *et al.* Performance comparison of small-pixel CdZnTe radiation detectors with gold contacts formed by sputter and electroless deposition[J]. Journal of Instrumentation, 2017, **12**. DOI: 10.1088/1748-0221/12/06/P06015.