

# 基于展开-合成技术平顶尖峰成形算法研究

兰继美<sup>1</sup> 尹文成<sup>2</sup> 刘羽<sup>2</sup> 沈统<sup>1</sup> 张金钊<sup>3</sup> 冷阳春<sup>1</sup>

1(西南科技大学 绵阳 621010)

2(中广核工程有限公司 深圳 518124)

3(自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005)

**摘要** 展开-合成技术常用于核辐射测量中的数字脉冲处理系统。本文提出了一种基于脉冲展开-合成技术的多项式数字脉冲成形方法,实现了平顶展宽尖峰脉冲成形算法。该算法首先将核脉冲信号展开为单位脉冲系列组合,然后合成冲激响应系统来形成尖峰形状,利用改进的平顶尖峰成形算法处理,并在幅值提取准确性、抗干扰能力和堆积识别等方面与传统的滤波成形算法进行比较分析。实验结果表明:针对<sup>137</sup>Cs的 $\gamma$ 特征峰,在相同的成形时间,平顶尖峰成形算法的能量分辨率为7.2%,优于梯形成形、三角成形和高斯成形算法,并且具有高计数率通过性能。因此,该方法可有效取代传统的脉冲成形方法,用于高精度、高计数率的 $\gamma$ 能谱测量。

**关键词** 展开-合成技术, 平顶尖峰成形, 堆积识别, 能量分辨率

中图分类号 TL822<sup>+</sup>.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010401

## Flat-topped cusp-like shaper algorithm based on the unfolding-synthesis technique

LAN Jimei<sup>1</sup> YIN Wencheng<sup>2</sup> LIU Yu<sup>2</sup> SHEN Tong<sup>1</sup> ZHANG Jinzhao<sup>3</sup> LENG Yangchun<sup>1</sup>

1(Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

2(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Shenzhen 518124, China)

3(Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

**Abstract** [Background] The unfolding-synthesis technique is commonly used in digital pulse processing systems for nuclear radiation measurements. [Purpose] This study aims to propose a novel flat-topped widened peak-shaping algorithm based on the pulse unfolding-synthesis technique is proposed. [Methods] Firstly, the repetition and polynomials were utilized to shape the digital pulses, and the nuclear pulse signal was unfolded into unit pulses series. Then, an impulse response system was employed to synthesize these unit pulses series to achieve the desired peak shape. Finally, the improved flat-topped peak-shaping algorithm was compared and analyzed against traditional filter shaping algorithms in terms of accuracy in amplitude extraction, interference resistance, and pile-up recognition. [Results] Experimental results demonstrate that, under the same shaping time, the energy resolution of the flat-topped peak-shaping algorithm for the  $\gamma$  characteristic peak of <sup>137</sup>Cs is 7.2%, outperforming the trapezoidal, triangular, and Gaussian shaping algorithms. Additionally, it exhibits high counting rate performance. [Conclusions] The flat-topped peak-shaping algorithm of this study can effectively replace traditional pulse-shaping methods and be utilized for high-precision, high-count-rate  $\gamma$  spectroscopy measurements.

中国国家杰出青年科学家基金(No.41603214)、四川省青年科学基金(No.2022NSFSC1110)、西南科技大学博士基金(No.19zx7159)资助  
第一作者: 兰继美, 女, 1998年出生, 2021年毕业于四川轻化工大学, 现为硕士研究生, 主要从事信号采集和数字处理研究

通信作者: 沈统, E-mail: sht@swust.edu.cn

收稿日期: 2023-07-06, 修回日期: 2023-08-28

Supported by China National Funds for Distinguished Young Scientists (No. 41603214), Youth Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC1110), Doctoral Fund of Southwest University of Science and Technology (No.19zx7159)

First author: LAN Jimei, female, born in 1998, graduated from Sichuan University of Science & Engineering in 2021, master student, focusing on signal acquisition and digital processing

Corresponding author: SHEN Tong, E-mail: sht@swust.edu.cn

Received date: 2023-07-06, revised date: 2023-08-28

**Key words** Unfolding-synthesis technique, Flat-topped cusp-like shaper, Pile-up recognition, Energy resolution

数字能谱采集系统与模拟能谱采集系统相比,在脉冲处理速度、可编程灵活性和能量分辨率等方面都有显著提高<sup>[1-3]</sup>。谱仪信号的数字滤波成形是数字频谱采集系统中的关键技术之一,它在降低电子噪声、脉冲堆积和弹道损失方面发挥着重要作用<sup>[4]</sup>。常见的数字滤波成形方法包括高斯、梯形、三角和尖峰滤波成形<sup>[5-7]</sup>。然而,传统的尖峰脉冲成形算法存在一些问题,如低信噪比和动态范围窄。

研究人员从理论上证明了使用数字展开-合成技术合成的尖峰脉冲成形不仅具有高计数率通过性特点,而且可以解决脉冲堆积效应最小化和增强计数率能力等需求<sup>[8]</sup>。有限时间宽度的尖峰脉冲成形具有高信噪比、最小化弹道损失和短成形时间等特点,同时可以最大限度地减少信号处理资源的使用<sup>[9-11]</sup>。

基于以上理论,本文在已有的尖峰脉冲成形算

法研究基础上,以递归的形式提出了在有限时间宽度约束下实现平顶展宽的尖峰脉冲成形方法。同时,根据有限时间约束条件设计了堆积识别方法,并将其与常见的高斯、梯形和三角数字滤波成形算法进行了比较分析,对计数率通过性、脉冲堆积识别能力和能量分辨率等性能指标进行对比分析。

## 1 尖峰脉冲成形原理

探测器模拟信号通常经过调理并施加到数字化ADC(Analog-to-digital Converter)以转换成离散时间信号。数字脉冲整形的过程通过以下步骤实现:首先,展开(去卷积)数字化的模拟信号;然后,通过合成期望脉冲形状的脉冲响应来实现。图1中描述了基于展开-合成技术的平顶尖峰脉冲成形系统的结构。

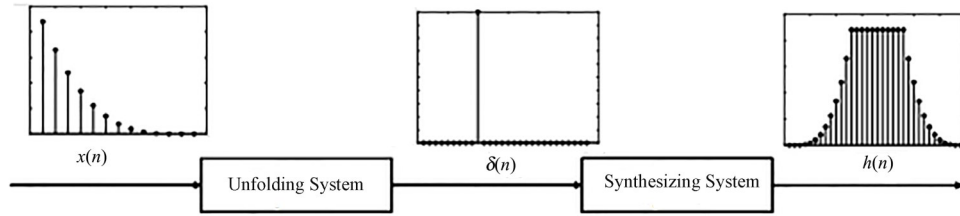


图1 尖峰脉冲整形的传递函数模型  
Fig.1 Transfer function model of peak pulse shaping

### 1.1 核信号的展开

以核探测器输出的负指数信号为例,在实现数字展开-合成技术的系统之前,需将核探测器的模拟信号经调节转换为数字信号,将连续时间信号数字化,生成由离散时间卷积表示的数字信号,定义为  $x(n)$ ,即:

$$x(n) = \begin{cases} a^n & \text{for } n \geq 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $a=e^{-\Delta T/\tau}$ ,且  $0 < a < 1$ ,  $\Delta T$ 为ADC的采样间隔,数字指数信号的指数基  $a$ 与信号的衰减时间常数  $\tau$ 相关,两个连续值比值可表示为:

$$\frac{x(n)}{x(n-1)} = \frac{a^n}{a^{n-1}} = a \quad (2)$$

$$h(n) = \begin{cases} 0 & n < 0 \text{ and } n \geq n_c \\ r(n) = \frac{n(n+1)(n+2)}{6} & 0 < n \leq n_a \\ f(n) = \frac{n_a(n_a+1)(n_a+2)}{6} & n_a < n \leq n_b \\ d(n) = \frac{(n_c-n)(n_c-n+1)(n_c-n+2)}{6} & n_b < n < n_c \end{cases} \quad (4)$$

其中  $n > 0$ ,且  $x(n)=1$ ,故  $x(n)$ 的反卷积递归式可表示为:

$$x(n) = \delta(n) + ax(n-1) \quad (3)$$

式中:  $\delta(n)$ 表示冲击离散信号。

### 1.2 尖峰脉冲的合成

数字合成平顶尖峰脉冲成形的方法的核心是由  $x(n)$ 展开后的冲击响应的相应部分的分开进行多次累加,最后通过延迟合成最终的尖峰脉冲形状,如图2所示,尖峰脉冲形状  $h(n)$ 由上升部分  $r(n)$ 、平顶部分  $f(n)$ 、下降部分  $d(n)$ 组成,脉冲响应  $h(n)$ 可近似为三阶多项式,时域表达式可表示为如下分段函数:

式中： $n_c=n_a+n_b$ ， $n_a=t_a/\Delta T$ ， $n_b=t_b/\Delta T$ ， $n_c=t_c/\Delta T$ ， $t_a$ 、 $t_b$ 、 $t_c$ 分别为尖峰成形的上升时间、上升时间和平顶时间之和以及尖峰成形时间。当 $n_a-n_b=0$ 时，平顶时间为0。

由单位脉冲 $\delta(n)$ 4次连续累加得到三阶多项式成形的平顶尖峰脉冲成形算法，可以由以下递归式表示：

$$h^3(n) = h^3(n-1) + \delta(n) - \delta(n-n_a) - \delta(n-n_b-2) + \delta(n-n_c-2) \quad (5)$$

$$h^2(n) = h^2(n-1) + h^3(n) - n_a[\delta(n-n_a) - \delta(n-n_b-1)] \quad (6)$$

$$h^1(n) = h^1(n-1) + h^2(n) - \frac{n_a(n_a+1)}{2} [\delta(n-n_a) + \delta(n-n_b)] \quad (7)$$

$$h(n) = h(n-1) + h^1(n) \quad (8)$$

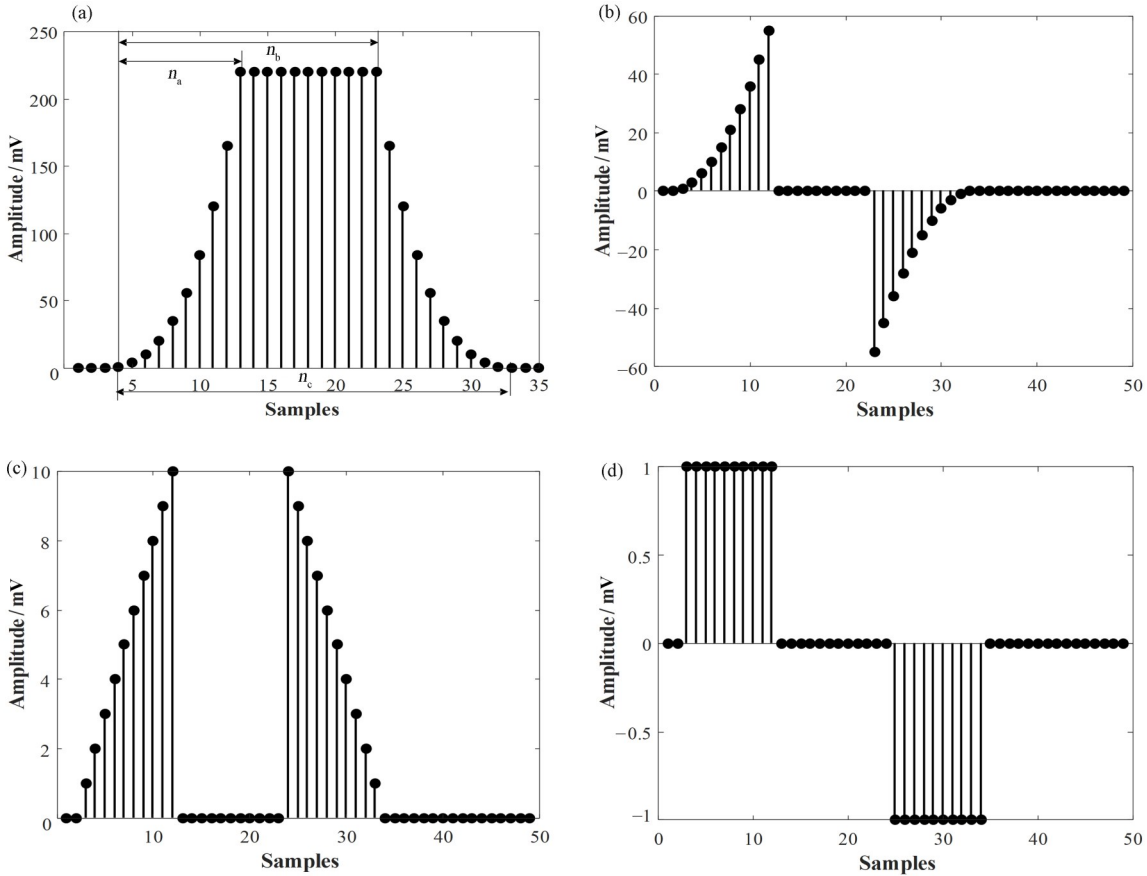


图2 平顶尖峰脉冲形状及其导数的定义

(a) 尖峰脉冲形状  $h(n)$ ，其中  $n_a = 10, n_b = 20, n_c = 30$ ，(b) 一阶导数  $h^1(n)$ ，(c) 二阶导数  $h^2(n)$ ，(d) 三阶导数  $h^3(n)$   
 Fig.2 Definition of the shape of a flat-top peaking pulse and its derivatives (a) Shape of the pulse  $h(n)$ , where  $n_a = 10, n_b = 20, n_c = 30$ , (b) First derivative  $h^1(n)$ , (c) Second derivative  $h^2(n)$ , (d) Third derivative  $h^3(n)$

原始脉冲函数 $x(n)$ 反卷积得到冲击信号 $\delta(n)$ ，然后 $\delta(n)$ 通过第一次累加合成 $h^3(n)$ ，经第二次累加合成对称的三角形脉冲 $h^2(n)$ ，经过3次累加获取双极性脉冲 $h^1(n)$ ，最后做第4次累加得到最终的平顶尖峰脉冲形状 $h(n)$ 。

## 2 实验测试

### 2.1 仿真测试

通过使用MATLAB软件，可以对负指数信号进

行仿真，实现平顶尖峰脉冲成形算法，并对其参数进行分析<sup>[12]</sup>。在合成不同波形时，首先需要将原始负指数信号展开为单位脉冲，展开过程中，需要使用准确的时间常数 $\tau$ ，并使用与原信号相同的指数基作为展开常数，以确保平顶尖峰成形的平顶在同一水平线上。图3展示了理想负指数脉冲的时间常数为2  $\mu s$ 的情况。当平顶尖峰成形的时间常数偏大或偏小时，会导致平顶部分的倾斜，过度倾斜会导致形状严重畸变。

实际脉冲信号并非标准的负指数信号，因为探

探测器中的电荷与电子收集需要一定时间。同时,探测器中存在的电阻和电容会损失部分电荷,导致弹道亏损的问题。为了克服弹道亏损,可以增加平顶部分的电荷收集时间。在探测器电荷收集完成时,脉冲信号的高度达到最大值,从而弥补了弹道亏损的影响。与没有平顶时间的尖峰脉冲成形和三角成形相比,平顶尖峰成形可以减少弹道亏损的影响。然而,如果成形时间设置过长,会增加脉冲堆积的概率。为了权衡弹道亏损和脉冲堆积,平顶尖峰成形的上升时间应大于原始信号的上升时间,并以原始信号的脉冲宽度作为成形时间的参考。

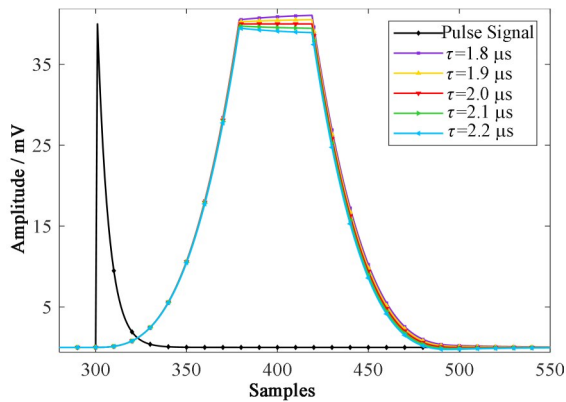


图3 平顶尖峰脉冲成形参数设置

Fig.3 Parameter settings for flat-top peaking pulse shaping

## 2.2 硬件系统的实现

系统选用由滨松光子生产的CH158-06型的NaI(Tl)闪烁体探测器( $\phi 75\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ )测量放置在距离探测器顶部中心10 cm处的 $^{137}\text{Cs}$ 放射源(强度为 $3 \times 10^5\text{ Bq}$ 和 $3 \times 10^7\text{ Bq}$ )。为了实现高性能的数字能谱测量系统,选择了高性能AD9226模数转换器,其最大采样速率可达65 MHz。为了保证采样值的



图5 数字能谱测量系统

Fig.5 Digital spectroscopy measurement system

## 2.3 稳定性分析

通过带有随机噪声干扰的负指数信号仿真,将平顶尖峰脉冲成形与平顶时间为0的尖峰脉冲成形和三角滤波成形对比,分析其抗干扰能力,三种方法滤波效果如图5所示。

平顶尖峰脉冲具有平顶部分,因此,提取峰值时可先提取脉冲的平顶幅度,再通过求平均值的方式实现。输入电压为40 mV,叠加随机噪声为0.5 mV的负指数信号,通过3种方法输出信号幅值比较,结果如表1所示。经过10次测试,平顶尖峰脉冲成形

线性度,并结合实际信号特点,实验中将采样频率设置为50 MHz,数据位宽为12位。实验测试装置如图4所示。

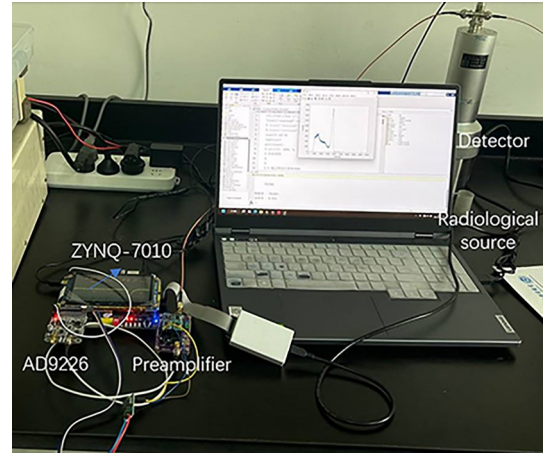


图4 实验测试装置图片

Fig.4 Photograph of experimental test setup

为了实现高速采样,核探测器的原始脉冲信号经过信号调理电路处理,以适应采样电路的要求范围。系统选用Xilinx公司的ZYNQ-7010核心板,内置一个双核ARM Cortex-A9处理器和一个传统的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)逻辑部件,对采样得到的数字脉冲信号进行并行运算,实现数字脉冲处理算法。通过FPGA实现了多道幅度分系统的数字化设计,其中主要包括数字滤波成形模块、堆积判弃模块、基线估计模块、幅值提取模块、能谱生成模块等功能模块<sup>[13-16]</sup>。这些模块协同工作,对数字脉冲信号进行处理,完成能谱结果的生成等任务。本实验系统的实现流程如图5所示。

方法的输出电压幅值标准差为0.11 mV、平顶时间为0的尖峰脉冲成形方法的输出电压幅值标准差为0.3 mV、三角滤波成形的输出电压幅值标准差为0.26 mV。结果表明,平顶尖峰脉冲成形方法的结果准确度与抗干扰能力优于平顶时间为0的尖峰脉冲成形和三角滤波成形。

## 2.4 脉冲堆积识别

在探测器高计数率的条件下,脉冲堆积是非常普遍的现象,对堆积信号进行分离提取是提高系统能量分辨率的有效途径<sup>[17-19]</sup>。

表1 三种方法输出信号幅值比较  
Table 1 Comparison of signal amplitude using three different methods

输入电压 Input voltage / mV	输出电压 Output voltage / mV		
	平顶尖峰脉冲成形 Flat-top peaking pulse shaping	平顶宽度为0的尖峰脉冲成形 Flat-top pulse shaping with width of 0	三角滤波成形 Triangular filter shaping
40	40.07	40.14	40.13
40	40.00	40.20	40.19
40	39.92	39.20	39.36
40	40.19	40.27	40.25
40	39.78	39.83	39.80
40	40.03	40.08	40.05
40	40.07	40.06	40.08
40	39.92	39.91	39.89
40	40.02	40.10	40.12
40	39.97	39.96	39.92

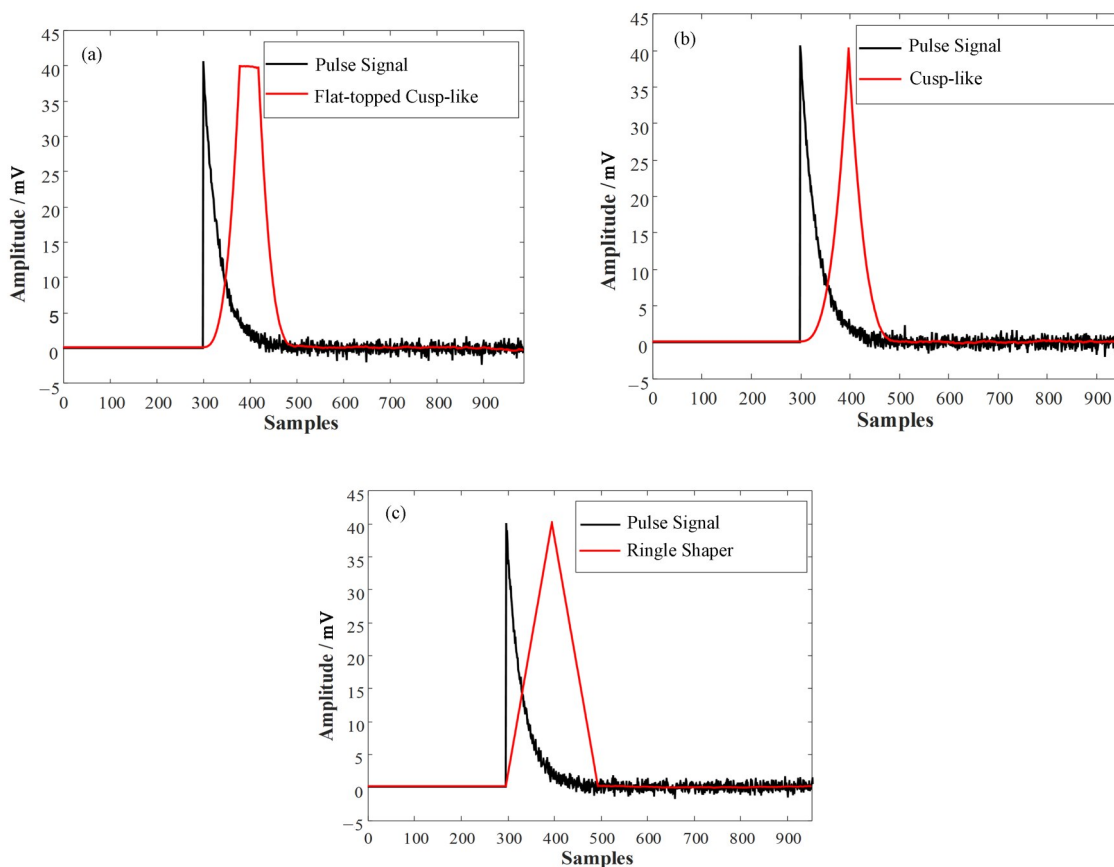


图6 噪声干扰下不同成形滤波效果 (a) 平顶尖峰脉冲成形, (b) 平顶宽度为0的尖峰脉冲成形, (c) 三角滤波成形

Fig.6 Different shaping filter effects under noise interference

(a) Flat-top peaking pulse shaping, (b) Flat-top pulse shaping with a width of 0, (c) Triangular filter shaping

为了验证尖峰成形算法的堆积识别效果, 首先设计了一组理想负指数信号, 脉冲参数参考探测器的输出信号, 设置参数如下: 幅值  $A=40$  mV, 脉冲成形时间点数  $N=200$ 。对比梯形成形和平顶尖峰成形的滤波成形算法的堆积识别效果如图7所示。

如图7(a)所示, 设两个信号的堆积部分的长度

为1, 当  $0 < l < n_b$  时, 两个信号出现轻微的堆积, 梯形成形和平顶尖峰脉冲成形均能输出堆积分离后的两个信号的幅值, 但尖峰脉冲成形脉冲更窄, 更易进行脉冲堆积分离和幅值提取。

如图7(b)所示, 当两个信号的堆积程度  $l=n_b$ , 经过平顶尖峰成形处理后的两个信号可以分离, 而经

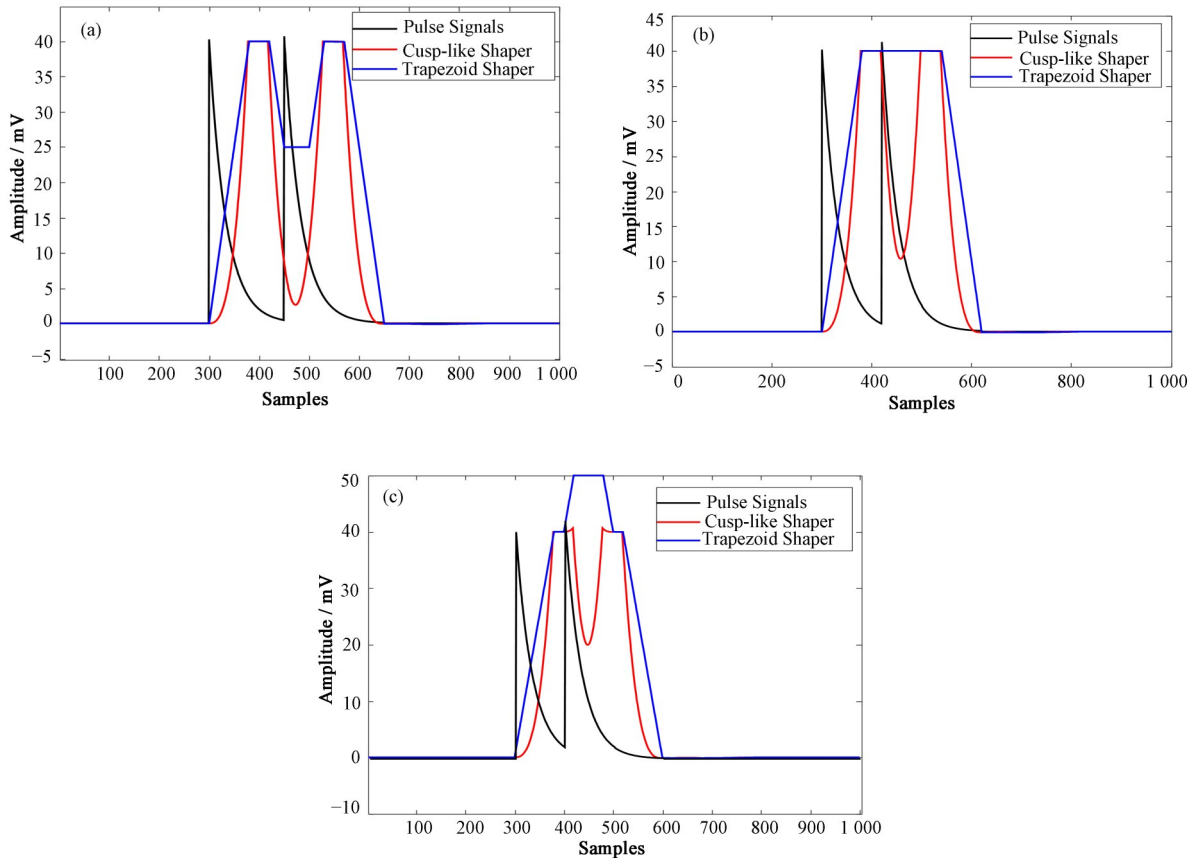


图7 相同上升时间和成形时间的梯形成形和平顶尖峰成形在不同堆积下的识别效果(彩图见网络版)  
(a) 堆积程度为 $0 < l < n_b$ 的识别效果, 其中 $n_a=40, n_b=80, n_c=200$ , (b) 堆积程度 $l = n_b$ , (c) 堆积程度为 $n_b < l < n_a + n_b$

Fig.7 Recognition performance of trapezoidal shaping and flat-top peaking shaping with the same rise time and shaping time under different pileup conditions: recognition performance at (a) Pileup level  $0 < l < n_b$ , where  $n_a=40, n_b=80$  and  $n_c=200$ , (b) Pileup level  $l = n_b$ , (c) Pileup level  $n_b < l < n_a + n_b$  (color online)

过梯形滤波成形后的两个信号的两个梯形的平坦部分完全重合在一起, 不能将两个堆积的信号进行分离。

如图7(c)所示, 当两个信号的堆积程度为 $n_b < l < n_a + n_b$ , 此时, 两个信号发生严重的脉冲堆积, 两个梯形已经重合使其平顶的最大幅值发生改变, 无法对信号进行分离和幅值提取, 对于平顶尖峰脉冲成形处理后, 虽然平顶部分幅值有所改变, 但仍能通过分析平顶部分数值使两个信号分离和准确地幅值提取。

基于Sallen-Key的高斯成形的算法设计, 如图8所示, 由于算法本身会出现拖尾的情况, 所以无法解决脉冲信号的堆积事件, 同时难以从高斯成形后的堆积信号得到准确的拟合参数实现堆积信号的分离。

## 2.5 能谱测量

图9展示了采用尖峰平顶成形算法的FPGA数字能谱系统对 $^{137}\text{Cs}$ 能谱进行的测试结果。为了评估

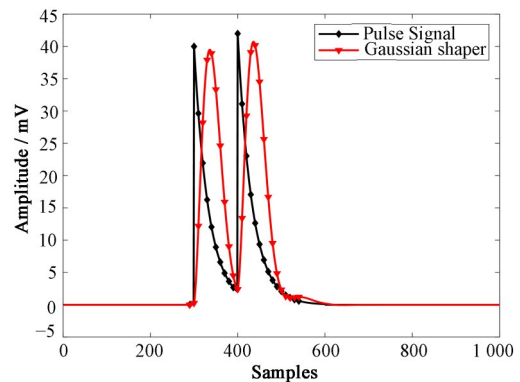


图8 高斯成形堆积识别结果  
Fig.8 Gaussian shaping stacking identification results

平顶尖峰成形方法对能量分辨率的影响, 本文使用了4种不同的滤波方法进行相同测量时间的能谱获取: 高斯成形法、梯形成形法、三角成形法以及平顶尖峰脉冲成形法。通过平顶尖峰脉冲成形法获得的能量分辨率为7.2%, 梯形成形的能量分辨率为7.5%, 三角成形的能量分辨率为7.8%, 高斯成形的能量分辨率为8.2%。

本文进行多次测量以获取<sup>137</sup>Cs的能谱测量结果,以特征峰对应的道址作为系统稳定性的测试对象,测试系统的稳定性。系统道址总数为4 096,如表2所示,在9次测试中的道址均值为2 548,仅有10个道址的偏差,表明系统具有良好的稳定性。

在对不同成形算法进行测试时,通过在不同计数率环境下测试<sup>137</sup>Cs特征峰对应的道址计数值,比

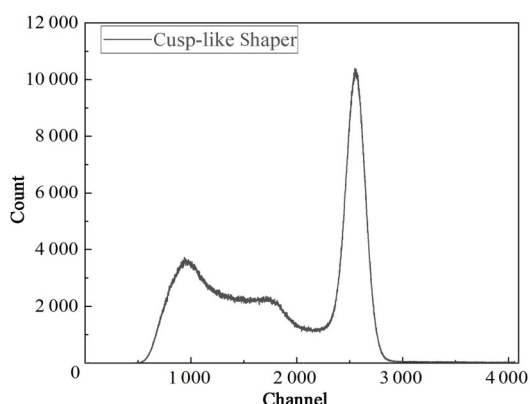


图9 FPGA数字能谱系统测试效果  
Fig.9 Testing performance of FPGA-based digital spectroscopy system

表2 数字能谱系统测量<sup>137</sup>Cs特征峰道址  
Table 2 Numerical spectrum analyzer system measurements of the characteristic peak channel address of <sup>137</sup>Cs

测量时间 Measure time / min	第一次 First time	第二次 Second time	第三次 Third time
1	2 552	2 543	2 538
5	2 549	2 547	2 548
10	2 553	2 553	2 549

较它们的计数率通过性。根据表3所示的结果,在计数率较低的情况下,三角成形算法优于其他三种算法,其次是平顶尖峰脉冲成形算法,稍低于三角成形算法。然而,在高计数率的情况下,平顶尖峰脉冲成形算法的计数率通过性比其他三种算法更高。综合考虑能量分辨率和计数率通过性两个指标,平顶尖峰脉冲成形算法展现了更好的性能。

实验结果表明,将平顶尖峰成形方法应用于高计数率下的核脉冲实时堆积判别是有效的。这种方法在提高 $\gamma$ 谱分辨率方面具有一定的改善作用,并且在FPGA的硬件开发平台上具有良好的稳定性。

表3 <sup>137</sup>Cs特征峰位计数率比较  
Table 3 Comparisons of characteristic peak count rates for <sup>137</sup>Cs

方法 Methods	峰位计数率1 Count rates 1 / s <sup>-1</sup>	峰位计数率2 Count rates 2 / s <sup>-1</sup>
平顶尖峰脉冲成形 Flat-top peaking pulse shaping	23.54	2 623
三角成形 Triangular shaping	24.25	2 487
梯形成形 trapezoidal shaping	22.36	2 253
高斯成形 Gaussian shaping	20.52	1 877

### 3 结语

利用合成-展开方法推导平顶尖峰脉冲成形的递推方程。在实际的硬件系统中,通过选择适当的参数进行尖峰脉冲成形,可以有效地实现滤波功能,并且可用于堆积信号的识别,从而准确地提取脉冲幅值。最后,将该算法实现在FPGA中。与传统的三角成形、梯形成形和高斯成形相比,平顶尖峰脉冲成形不仅满足高能量分辨率的要求,还具备更好的计数率通过性。因此,它可以有效地取代传统的脉冲成形方法,用于高精度、高计数率的 $\gamma$ 能谱测量。

**作者贡献声明** 兰继美负责研究的提出和设计、算法的可行性实验验证、文章的撰写;尹文成负责测量系统的实验测试;刘羽负责系统实验平台的搭建;沈统负责论文的整体规划并指导实验的开展;张金钊负责文章图表的绘制及论文的审阅与修订;冷阳春

负责项目的监督和管理。

### 参考文献

- Zhang J F, Yang Z, Li Y H. Research on gamma spectroscopy system while drilling based on DSP and FPGA[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2418(1): 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/2418/1/012024.
- Huang L, Yuan X Y, Wang H D, et al. Research on application of digital signal processing technology in communication[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 799(1): 012026. DOI: 10.1088/1757-899x/799/1/012026.
- 张怀强. 数字核谱仪系统中关键技术的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. ZHANG Huaiqiang. Study on key technologies of digital

- nuclear spectrometer system[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- 4 Xiong C Y, Liu M Z, Zuo Z, *et al.* Ballistic deficit compensation method for a large-volume HPGe detector at high count rates[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, **27**(3): 67. DOI: [10.1007/s41365-016-0063-0](https://doi.org/10.1007/s41365-016-0063-0).
  - 5 Jordanov V T. Exponential signal synthesis in digital pulse processing[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, **670**: 18 - 24. DOI: [10.1016/j.nima.2011.12.042](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.12.042).
  - 6 杨小艳, 洪旭, 周建斌, 等. 基于小波变换的双指数信号高斯脉冲成形算法研究[J]. 核技术, 2023, **46**(5): 050403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050403).  
YANG Xiaoyan, HONG Xu, ZHOU Jianbin, *et al.* Gaussian pulse shaping algorithm for dual exponential signals based on wavelet transform[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(5): 050403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050403).
  - 7 刘寅宇, 王玉东, 周荣, 等. 数字化能谱获取中梯形成形研究[J]. 核技术, 2017, **40**(2): 020402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020402).  
LIU Yinyu, WANG Yudong, ZHOU Rong, *et al.* Trapezoidal filter for digital spectrum acquire[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(2): 020402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.020402).
  - 8 Jordanov V T, Jordanova K V. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing, Part 2: synthesis[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1044**: 167421. DOI: [10.1016/j.nima.2022.167421](https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167421).
  - 9 Kafaee M, Moussavi-Zarandi A. Baseline restoration and pile-up correction based on bipolar cusp-like shaping for high-resolution radiation spectroscopy[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2016, **68**(8): 960 - 964. DOI: [10.3938/jkps.68.960](https://doi.org/10.3938/jkps.68.960).
  - 10 范新洋, 王敏, 洪旭, 等. 尖峰脉冲成形算法改进与性能分析[J]. 核技术, 2021, **44**(1): 010402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010402).  
FAN Xinyang, WANG Min, HONG Xu, *et al.* Improvement and performance analysis of cusp-like pulse shaping algorithm[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(1): 010402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010402).
  - 11 Liu J, Yang J, Zeng G Q, *et al.* Implementation of a cusp-like for real-time digital pulse shaper in nuclear spectrometry[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(7): 103. DOI: [10.1007/s41365-017-0248-1](https://doi.org/10.1007/s41365-017-0248-1).
  - 12 张怀强, 卢炜煌, 汤彬. 基于MATLAB的核脉冲信号数字成形实现与性能分析[J]. 核技术, 2018, **41**(10): 100401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100401).  
ZHANG Huaiqiang, LU Weihuang, TANG Bin. Digital shaping and performance analysis of nuclear pulse signal based on MATLAB[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(10): 100401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100401).
  - 13 Arriojas A, Barros H, Walter J, *et al.* FPGA based digital signal processing for high resolution low energy gamma spectrometry[J]. AIP Conference Proceedings, 2015, **1607**(1): 65 - 69. DOI: [10.1063/1.4890704](https://doi.org/10.1063/1.4890704).
  - 14 Lavelle C M. Gamma ray spectroscopy with arduino UNO [J]. American Journal of Physics, 2018, **86**(5): 384 - 394. DOI: [10.1119/1.5026595](https://doi.org/10.1119/1.5026595).
  - 15 李强, 虞先国, 石睿, 等. 快速核素识别仪设计[J]. 核电子学与探测技术, 2018, **38**(2): 278 - 283. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2018.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2018.02.025).  
LI Qiang, TUO Xianguo, SHI Rui, *et al.* Design of fast nuclide identification instrument[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2018, **38**(2): 278 - 283. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2018.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2018.02.025).
  - 16 Kasani H, Ashrafi S, Ghal-Eh N, *et al.* Gamma-ray spectroscopy with anode pulses of NaI(Tl) detector using a low-cost digitizer system[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **176**: 109854. DOI: [10.1016/j.apradiso.2021.109854](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109854).
  - 17 Adrich P, Zychor I. Least-squares fitting algorithm for peak pile-up correction in gamma-ray spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **990**: 164962. DOI: [10.1016/j.nima.2020.164962](https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164962).
  - 18 Yang H, Zhang J L, Zhou J H, *et al.* Efficient pile-up correction based on pulse-tail prediction for high count rates[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1029**: 166376. DOI: [10.1016/j.nima.2022.166376](https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166376).



- 19 钱云琛, 张怀强, 卢奋华, 等. 尖顶成形方法的参数优化选取与堆积识别[J]. 核技术, 2021, **44**(11): 110402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110402).  
QIAN Yunchen, ZHANG Huaiqiang, LU Fenhua, *et al.*

Parameter optimization and pile-up identification of cusp shaping for nuclear pulse signal[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(11): 110402. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110402](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110402).