



Research and Comparison of Several Common Pulse Forming Algorithms

Dashun Yan*, Guangming Dai, Quan Yuan, Zhiquan Zhou, Xiaoyan Yang

School of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, China

Email: *1109543596@qq.com

How to cite this paper: Yan, D.S., Dai, G.M., Yuan, Q., Zhou, Z.Q. and Yang, X.Y. (2023) Research and Comparison of Several Common Pulse Forming Algorithms. *Open Access Library Journal*, **10**: e9847. <https://doi.org/10.4236/oalib.1109847>

Received: February 7, 2023

Accepted: March 11, 2023

Published: March 14, 2023

Copyright © 2023 by author(s) and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Energy resolution is an important index to measure the performance of nuclear instruments, and the noise, ballistic defect and accumulation of nuclear pulse signal are important factors affecting energy resolution. In the digital nuclear spectrum measurement system, the digital shaping algorithm is usually used to process the nuclear pulse signal to improve the energy resolution of the measurement system. In this paper, the algorithm is simulated by the theoretical formula of spike pulse forming, symmetric zero-area trapezoid forming and symmetric zero-area sine forming, and the Mn sample is excited by the KYW2000A X-ray tube, and the nuclear signal is collected by FAST-SDD. The influence of different forming methods on the energy resolution under different peak-time conditions is studied. The results show that under the same parameters, the peak forming has the highest energy resolution and peak area count. When the peaking time and flat-top time increase, the energy resolution of the other two forming methods first increases and then decreases, which is greatly affected by pulse accumulation; With the increase of peak-reaching time and flat-top time, the corresponding characteristic peak area counts of the three forming methods gradually decrease.

Subject Areas

Atomic Physics, Information and Communication Theory and Algorithms

Keywords

Energy Resolution, Nuclear Signal, Trapezoid, Peak Area

1. 引言

数字化核仪器中，核心是数字核脉冲处理技术，核脉冲信号的处理与研究作为核技术应用的重要基础和前提，可以在核仪器获得核脉冲信号之后，

对核脉冲信号进行进一步成形，方便后续仪器分析。传统上的模拟核能谱分析技术多采用多道脉冲幅度分析技术，基于模拟电路进行核脉冲信号采集、放大和成形，滤波和基线恢复。因为模拟电路结构复杂，电子元器件受环境温度湿度影响较大，系统不稳定；在高计数率测量条件下脉冲通过率和分辨率较低；加上模拟成形电路处理能力有限无法满足最佳成形滤波效果，所以一个更高质量的核分析技术成为研究人员的目标。

在 20 世纪 70 年代，研究人员已经开始运用数字化技术对核脉冲信号进行处理，但受当时的电子和计算机技术限制，数字化技术没能得到进一步发展。20 世纪 90 年代以来，在 ADC 技术和 FPGA 等技术的快速发展的基础上，数字化核脉冲成形技术发展迅速。美国 Valentin.T.Jordanov 等科研人员用数字化递归算法在计算机上实现了梯形(三角形)成形，还可以实现有限尖峰脉冲和带平顶的尖峰脉冲成形[1]。Alberto Pullia 等人已经提到了零面积脉冲成形的基线滤波器和恢复方法，但是在数字系统中不能轻松实现[2]。Jordanov 等人研究了合成线性时不变有限冲激响应的尖峰脉冲成形的两种指数信号递归算法：第一种是在离散时域中合成真正的尖峰形状，该算法可能对舍入误差敏感，并且可能需要大量的计算资源。第二种算法使用线性插值来合成尖峰形状的近似逼近，不会引入舍入误差，并且已经在硬件中进行了测试[3]。V Esmacili-Sani 等人研究了用于中子伽玛辨别和堆积校正的双极零面积梯形成形算法，使用平顶来确定中子和伽玛信号[4]。由于其零面积形状，双极性零面积梯形成形算法可用于基线恢复，但因为非对称成形，不能限制基线漂移。

本文对尖峰脉冲成形、对称零面积梯形成形、对称零面积正弦成形算法进行原理分析，利用实测核脉冲信号，研究了不同达峰时间和不同平顶时间下能量分辨率和峰面积的规律。

2. 基本原理

2.1. 尖峰脉冲成形

从最佳脉冲成形的理论来看，理想的无限尖峰形状可以提供最佳的信噪比，但是对于硬件系统而言，形成这样的脉冲形状是不切实际的，因为从理论上讲，这需要无限的持续时间[5]。所以，有限宽尖峰脉冲更具有实用价值。当输入理想负指数信号经 ADC 离散化后为 $vi(n) = A * e^{[n] * Ts / \tau}$ ， A 为脉冲幅度， Ts 为采样时间， τ 为时间衰减常数。尖峰成形算法公式如式 1 所示。

$$\begin{cases} p[n] = p[n-1] + vi[n] - d * vi[n-1] \\ s[n] = s[n-1] + p[n] - (na + 1) * p[n-na] + na * p[n-na-1] \\ \quad - na * p[n-nb] + (na + 1) * p[n-nb-1] - p[n-nc-1] \\ k[n] = k[n-1] + s[n] \end{cases} \quad (1)$$

式中 na 是成形上升下降时间， nb 是成形上升时间 + 成形平顶宽度， nc 是成形宽度。 $nb \neq na$ 时，输出是带平顶的尖峰脉冲，调整 na 、 nb 数值改变尖峰脉冲形状；图 1 是尖峰脉冲成形过程仿真图。

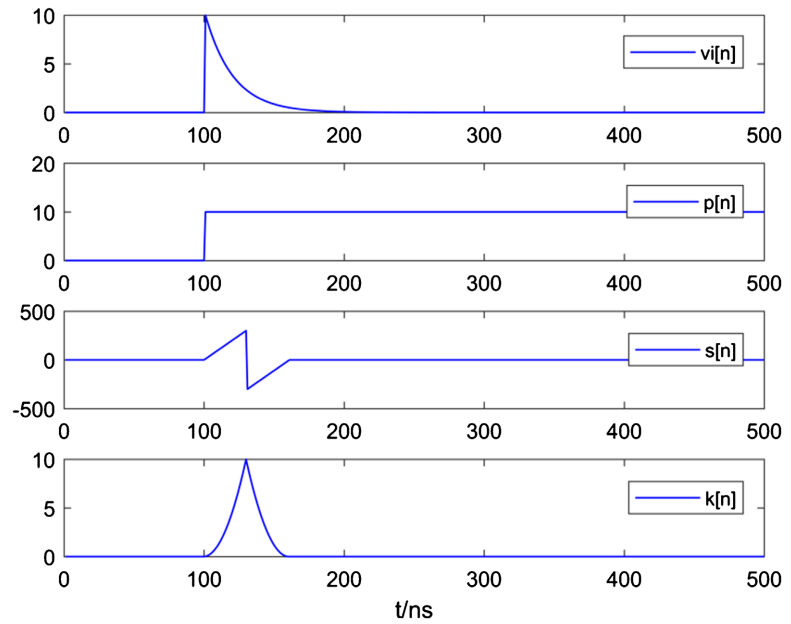


图 1. 尖峰成形过程

当使用成形算法产生对称尖峰形的短脉冲时，弹道亏损和电荷陷阱效应会显著降低能量分辨率。因此，具有有限的平顶形状的尖峰状的成形算法，只要平顶的宽度大于电流脉冲的持续时间，平顶的尖峰脉冲就可以有效克服弹道亏损。通过参数控制尖峰脉冲达峰时间和平顶，将前放的指数衰减信号成形为带平顶的尖峰脉冲，尖峰脉冲其信噪比和更窄的脉冲宽度都是其优势。

2.2. 对称零面积梯形成形

常用的滤波成形算法中梯形成形算法简单，成形快，线性良好，具备弹道亏损修复能力，对称零面积梯形成形是基于普通梯形改进合成所得，对称特性使得这种成形法可以自动进行基线恢复，抑制带基线偏移和直流偏移的脉冲信号，触发阈值只和脉冲信号的幅度有关。普通梯形算法公式如式 2 所示，

$$\begin{cases} p[n] = p[n-1] + vi[n] - d * vi[n-1] \\ s[n] = p[n] - p[n-na] - p[n-nb] + p[n-nc] \\ r[n] = r[n-1] + p[n] \\ k[n] = k[n-1] + r[n] \end{cases} \quad (2)$$

对称零面积梯形在梯形成形上经过延时相减得到对称的三梯形，式 3 是梯形成形延申公式。

$$\begin{cases} z[n] = k[n] - k[n-nc] \\ y[n] = (z[n-nc] - z[n]) / (2 * na) \end{cases} \quad (3)$$

图 2 是对称零面积梯形成形仿真过程图，对称零面积梯形成形相比普通梯形成形宽度宽了两倍，相同成形参数下成形宽度是普通梯形的 3 倍，对称零面积梯形更容易产生脉冲堆积，不易于提取幅值，但其抑制基线漂移和分辨堆积脉冲的能力更适用于快通道脉冲计数[6]。

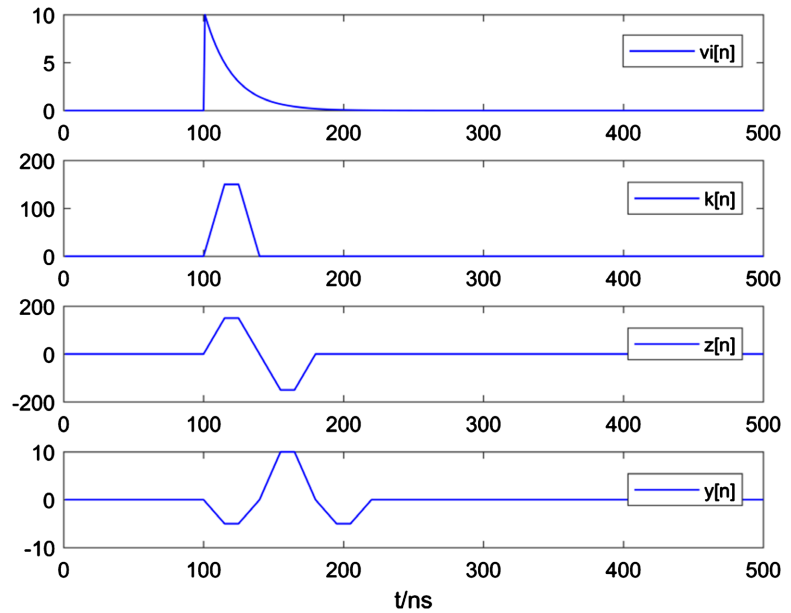


图 2. 对称零面积梯形成形过程

2.3. 对称零面积正弦成形

正弦成形算法与高斯成形相似，顶部平滑，便于峰值搜寻和提取，与对称零面积梯形算法相似，根据普通正弦成形算法合成改进可得到对称零面积正弦成形，其算法公式如式 4 所示。

$$\begin{cases} p[n] = 2 * \cos\left(\frac{\pi i}{nc}\right) * p[n-1] - p[n-2] + \sin\left(\frac{\pi i}{nc}\right) \\ \quad * (vi[n-1] - d * vi[n-2] + vi[n-nc-1] - d * vi[n-nc-2]) \\ r[n] = p[n-1] + p[n] \\ y[n] = r[n-1] + r[n] \end{cases} \quad (4)$$

图 3 是对称零面积正弦成形仿真过程示意图， nc 是对称零面积正弦成形正半部分的宽度，对称零面积正弦成形宽度是普通正弦成形的 3 倍，所以相比普通梯形更容易产生堆积。

3. 能量分辨率

为了研究尖峰脉冲成形算法、对称零面积梯形成形算法和对称零面积正弦成形算法的能量分辨率。用科颐维 KYW2000A 型 X 光管(额定电压 50 kV, 电流 1 mA, W 靶)激发 Mn 样品, 经 FAST-SDD 探测器探测, 采用的 AMPTEK 公司的 XR-100 系列, 峰背比为 20,000:1, 铍窗厚度 12.5 μm , 能量 5.9 keV 时有 122 eVFWHM。用采样率为 20 MSPS (每秒钟取百万个样本)的 ADC 数化, 实测信号的衰减时间常数为 4.8 μs , 脉冲上升时间即最大电荷收集时间大约 0.2 μs , 图 4、图 5 是所用光管和探测器实物图。部分实测信号离散化后如图 6 所示。

对三种成形算法得到的能谱, 进行能量刻度, 记录三种成形算法且平顶时间为 0 下不同达峰时间的能量分辨率, 如图 7 所示。

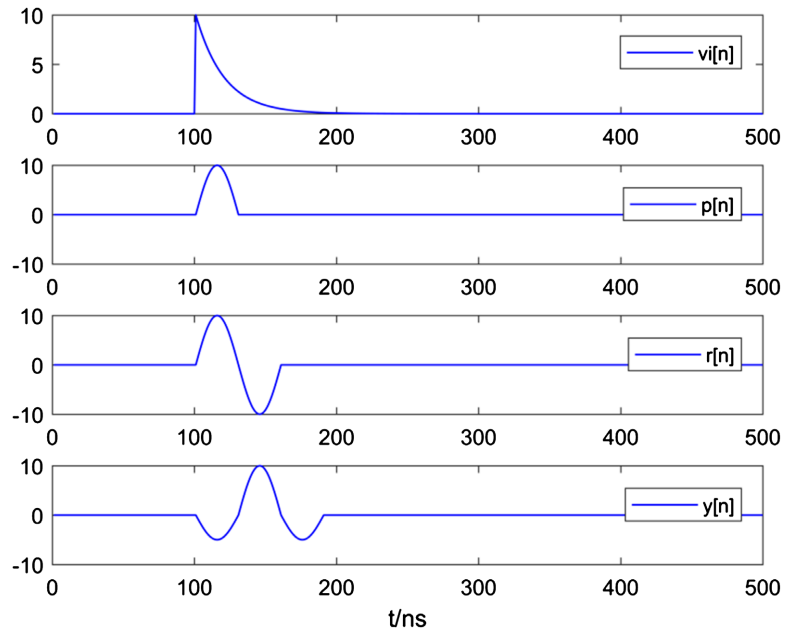


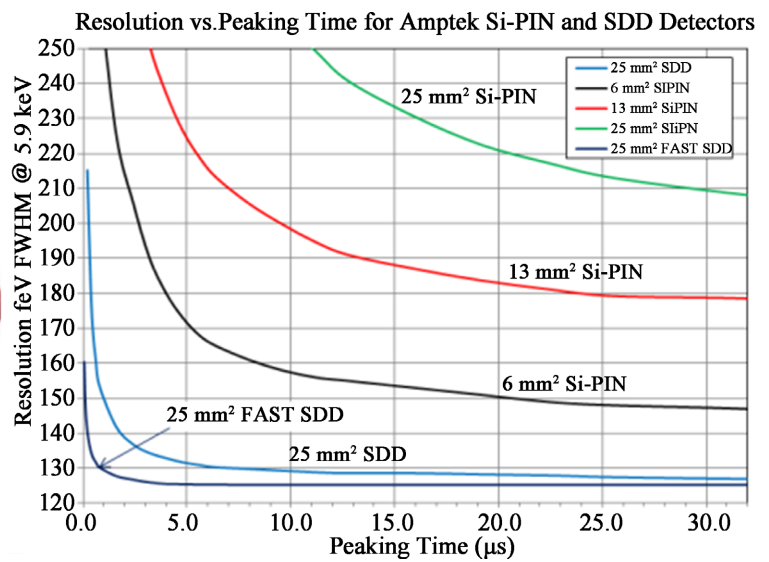
图 3. 对称零面积正弦成形过程



图 4. 科颐维 KYW2000A 型 X 光管



图 5. AMPTEK 公司 FAST-SDD 探测器



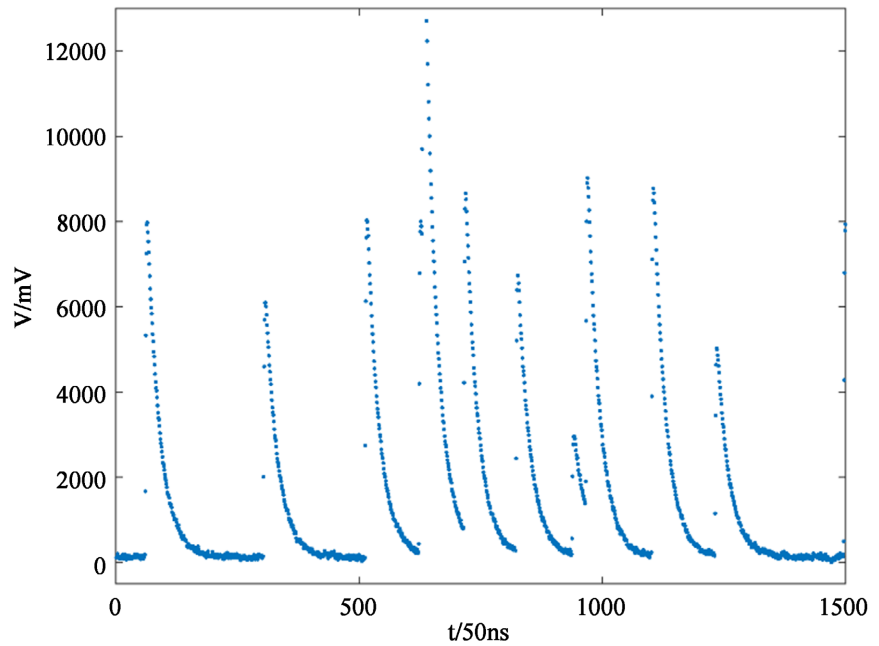


图 6. 实测信号离散化数据图

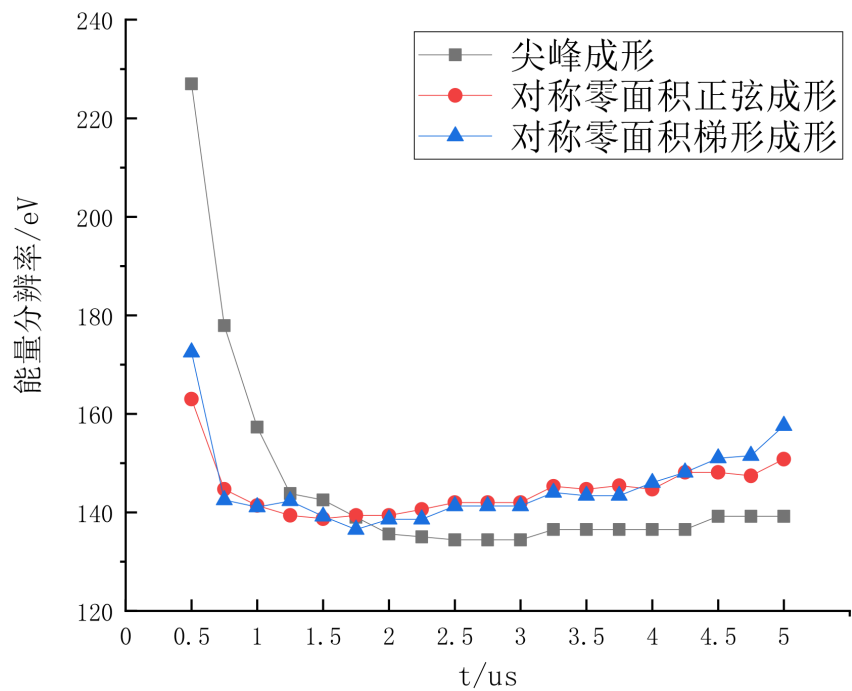


图 7. 不同成形算法下能量分辨率与达峰时间的关系

图 7 看出, 平顶时间为 0 时, 三种成形法得到的能量分辨率随达峰时间增加呈提高后降低趋势, 达峰时间越小变化越明显。在达峰时间为 0.5 us 时, 尖峰成形能量分辨率最差, 对称零面积正弦成形能量分辨率最好, 在达峰时间 2.5 us 以前, 尖峰成形能量分辨率随达峰时间增加明显提高, 由于没有平顶抑制弹道亏损在达峰时间为 1.5 us、1.75 us、2.5 us 处, 分别对应三种成形算法能量分辨率最好。达峰时间较低时, 平顶为 0 的尖峰成形受弹道

亏损的影响最大，其他两种成形法弹道亏损补偿能力较好，在 1.5 μs ，对称零面积正弦成形能量分辨率逐渐降低，1.75 μs 以后，对称零面积梯形成形能量分辨率也逐渐降低，因为两种成形法成形宽度为普通成形宽度的 3 倍，更易产生堆积，脉冲堆积影响大于弹道亏损影响。尖峰成形抗堆积能力较强，因而在达峰时间相对较大时，最高能量分辨率大于两种对称零面积成形法。图 5 中找到三种成形法能量分辨率最低对应的达峰时间，对其增加平顶时间，获取不同平顶时间下成形能谱，进行能量刻度，记录能量分辨率，由于对称零面积正弦成形未包含平顶参数，因而比较其他两种成形，如图 8、图 9 所示。

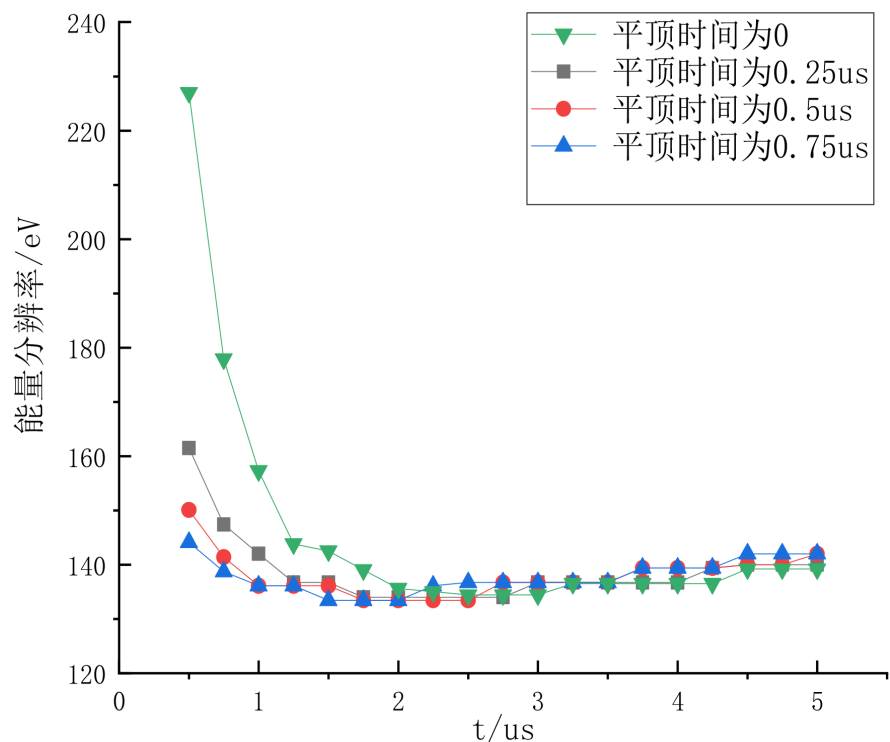


图 8. 不同平顶时间下尖峰脉冲的能量分辨率与达峰时间的关系

最大电荷收集时间约 0.2 μs ，不加平顶时，达峰时间较小时尖峰成形能量分辨率较差，图 8 中，加入平顶后，在低达峰时间处能量分辨率改善较为明显，普遍优于无平顶情况。在平顶时间大于最大电荷收集时间时，提高平顶时间，尖峰成形最优能量分辨率不变，加入不同平顶时，达峰时间在 2 μs 左右，能量分辨率最好，达峰时间 2 μs ，平顶为 0.25 μs 时，尖峰成形综合能量分辨率最好。

图 9 所示，平顶时间 0.25 μs 是已经达到最大电荷收集时间，再提高平顶宽度，弹道亏损对能量分辨率已经没有影响。但是与平顶时间为 0 时相比，弹道亏损抑制的效果非常显著，能量分辨率提高明显。在达峰时间 2 μs 左右，不同平顶时间所得到最优能量分辨率几乎一致，随达峰时间增加，由于对称零面积梯形成形是三倍于普通梯形宽度，平顶宽度引起的梯形成形堆积愈加严重，对能量分辨率影响较大[7]。

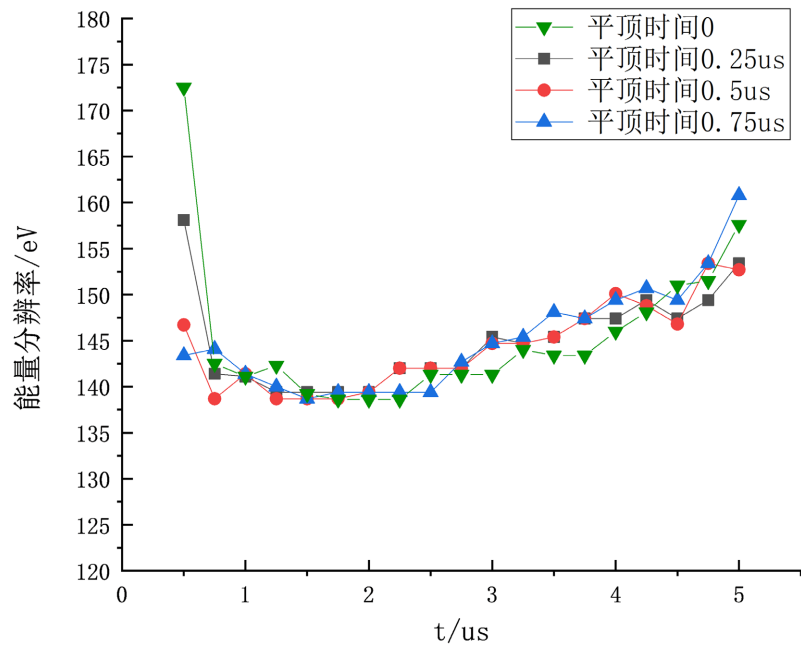


图 9. 不同平顶时间下对称零面积梯形的能量分辨率与达峰时间的关系

4. 三种成形峰面积对比

针对不同成形法, 选取 Mn 能谱中特征峰能量高的峰进行峰面积统计, 成谱道址为 4096 道, 图 10 是三种成形法不同达峰时间与峰面积关系图, 达峰时间从 0.5 us 到 5 us。图 10 中, 尖峰成形不同达峰时间处的成谱峰面积均高于另外两种成形, 而对称零面积梯形成形与对称零面积正弦成形不同达峰时间成谱峰面积大致相同, 对称零面积梯形成形峰面积略大于对称零面积正弦成形。

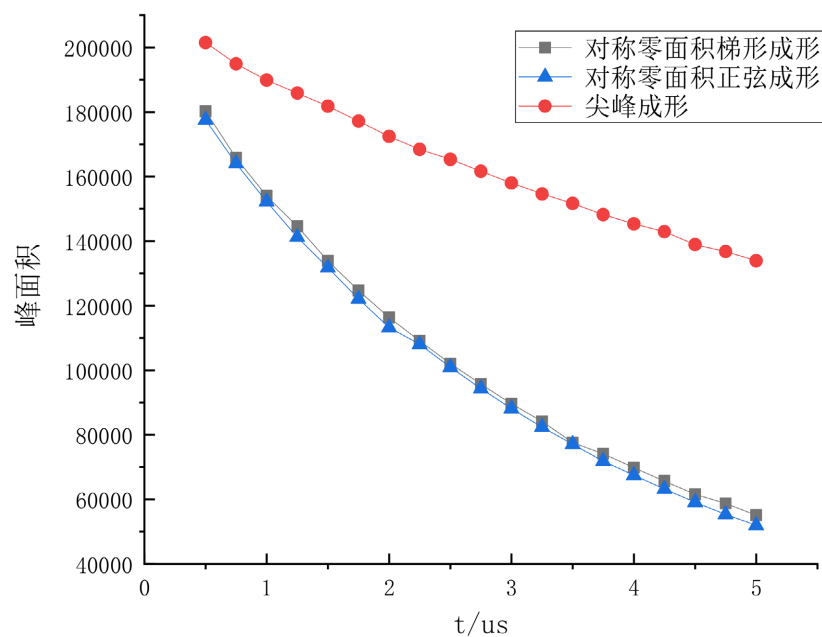


图 10. 三种成形法随达峰时间成谱峰面积比较

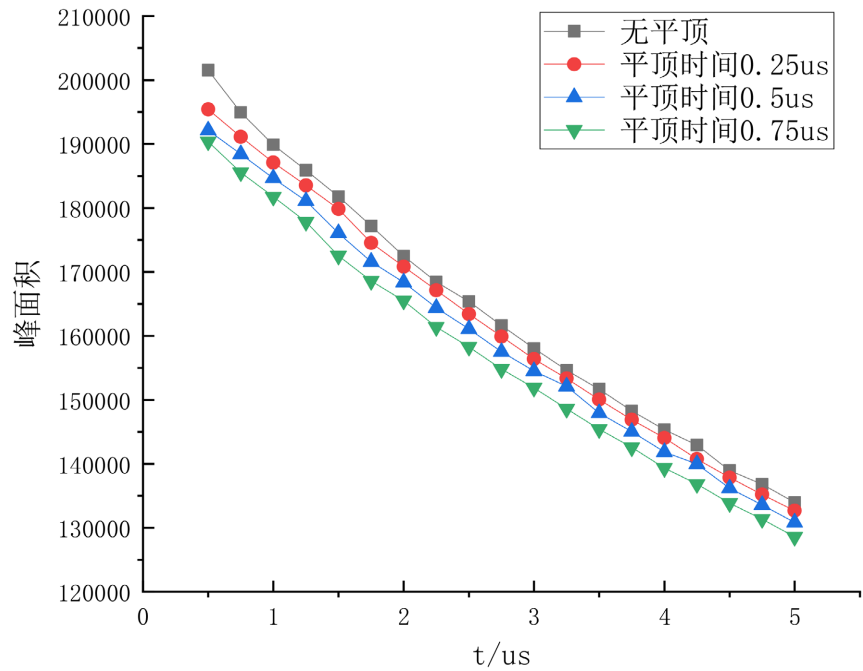


图 11. 不同平顶时间下尖峰成形的峰面积与达峰时间的关系

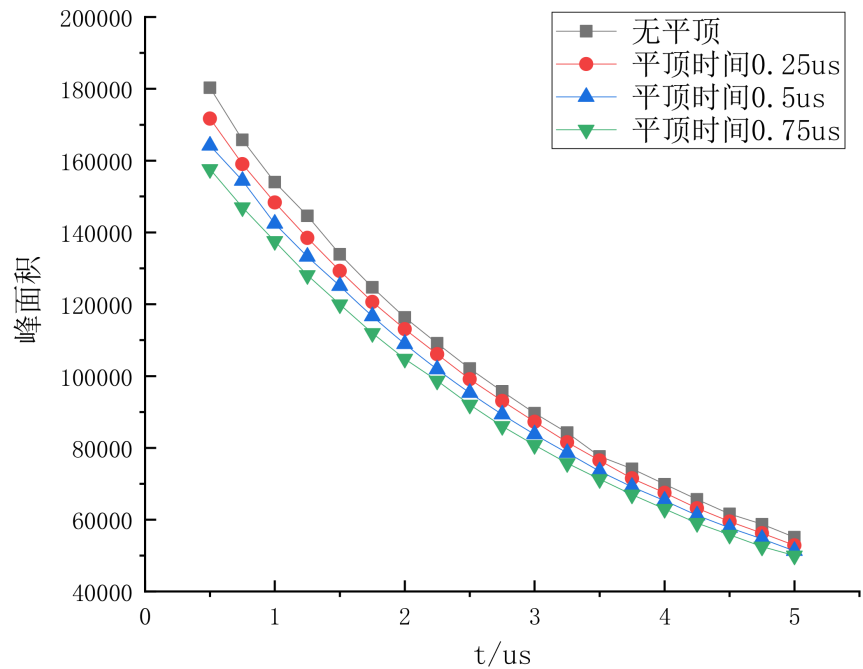


图 12. 不同平顶时间下对称零面积梯形的峰面积与达峰时间的关系

图 11 和图 12 是不同平顶时间下尖峰成形峰面积和对称零面积梯形与达峰时间的关系图，可以看出，随着平顶时间增大，相同达峰时间下尖峰成形和对称零面积梯形成形的峰面积是减小的，这是因为平顶时间越大，发生脉冲堆积的概率增大，所统计的峰面积自然而然减少。而随着达峰时间增加，两种成形的峰面积随之减小是显而易见的，不同达峰时间下尖峰成形的峰面积近似呈线性减小，对称零面积梯形成形的峰面积呈非线性减小。

5. 结论

在对实测核信号进行信号处理时，尖峰成形法相比对称零面积梯形成形法和对称零面积正弦成形法在相同平顶参数和达峰时间下，拥有更窄的成形宽度[8]。当平顶时间设置为0时，三种成形法中尖峰成形对核信号的滤波效果最差，最低能量分辨率达到227 eV，在低达峰时间时对核脉冲信号的滤波效果不如其他两种；加入平顶时间后，尖峰成形法对在低达峰时间参数下对能量分辨率的提高作用很明显。由于对称零面积正弦成形法平顶参数不可调，所以相对其他两种成形法不够灵活，不能通过参数优化调整得到更好的能量分辨率。

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- [1] Jordanov, V.T. (2012) Exponential Signal Synthesis in Digital Pulse Processing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **670**, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.12.042>
- [2] Pullia, A. and Ripamonti, G. (1997) Optimum Zero-Area Filter for Nuclear Signal Sequences. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **391**, 301-309. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00320-3)
- [3] 杨剑. 高纯锗数字多道脉冲幅度分析系统的研制[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [4] Esmaeili-Sani, V., et al. (2011) Triangle Bipolar Pulse Shaping and Pileup Correction Based on DSP. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **665**, 11-14. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.11.039>
- [5] Radeka, V. (1986) Optimum Signal Processing for Pulse Amplitude Spectrometry in the Presence of High-Rate Effects and Noise. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **15**, 455-470. <https://doi.org/10.1109/TNS.1968.4324970>
- [6] Zeng, G.Q., Yang, J., Hu, T.Y., et al. (2017) Baseline Restoration Technique Based on Symmetrical Zero-Area Trapezoidal Pulse Shaper. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **858**, 57-61. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.049>
- [7] Jordanov, V.T. and Knoll, G.F. (1994) Digital Synthesis of Pulse Shapes in Real Time for High Resolution Radiation Spectroscopy. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, **345**, 337-345. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91011-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91011-1)
- [8] 范新洋, 王敏, 洪旭, 杨体波, 廖光辉, 欧阳周璇. 尖峰脉冲成形算法改进与性能分析[J]. *核技术*, 2021, 44(1): 59-65.

Appendix 1. Abstract and Keywords in Chinese

几种常见脉冲成形算法的研究和比较

摘要: 能量分辨率是衡量核仪器性能的重要指标, 而核脉冲信号的噪声、弹道亏损及堆积是影响能量分辨率的重要因素。在数字化核能谱测量系统中, 通常采用数字成形算法对核脉冲信号进行处理, 进而提高测量系统的能量分辨率。本文通过尖峰脉冲成形、对称零面积梯形成形和对称零面积正弦成形的理论公式对其进行算法仿真, 并用科颐维 KYW2000A 型 X 光管对 Mn 样品激发, FAST-SDD 采集核信号, 研究不同达峰时间条件下不同成形法对能量分辨率的影响。结果表明: 三种成形法中尖峰成形在相同参数条件下, 能量分辨率相对最高, 峰面积计数最多。在达峰时间和平顶时间增加时, 其他两种成形法能量分辨率先变高再变低, 受脉冲堆积影响较大; 三种成形法随达峰时间增加、平顶时间增加, 对应特征峰面积计数都逐渐减小。

关键词: 能量分辨率, 核信号, 梯形成形, 峰面积