

基于 MATLAB 的核脉冲信号数字成形实现 与性能分析

张怀强^{1,2} 卢炜煌² 汤彬^{1,2}

1 (东华理工大学 核技术应用教育部工程研究中心 南昌 330013)

2 (东华理工大学 核科学与工程学院 南昌 330013)

摘要 数字核谱仪系统中数字成形方法与成形参数的选取影响着脉冲信号的噪声抑制、堆积识别、幅度提取,进而直接影响系统的能量分辨率与最大脉冲计数率等主要性能指标。研发一套基于 MATLAB 的数字核信号处理平台,可分别实现仿真核信号,采样核信号在不同数字成形方法、不同成形参数下的高斯成形、梯形成形与三角成形输出的同时,可构建具有多套数字成形算法验证平台。通过对 ^{137}Cs (NaI 探测器) 的 γ 能谱与 Fe 源 (Si-PIN 探测器) 的 X 荧光能谱测试可得: 数字高斯成形表现出更好的能量分辨率特性; 三角成形表现出更好的最大脉冲计数率特性; 梯形成形表现出更好的综合特性。采用梯形成形对 ^{137}Cs 能谱和高斯成形对 Fe 的特征 X 射线能谱测试可知: 随着成形参数的增加, 能量分辨率越好, 最大脉冲计数率越低。

关键词 核脉冲信号, 数字成形, MATLAB, 能量分辨率

中图分类号 TL817

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100401

Digital shaping and performance analysis of nuclear pulse signal based on MATLAB

ZHANG Huaiqiang^{1,2} LU Weihuang² TANG Bin^{1,2}

1 (Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, East China University of Technology, Ministry of Education, Nanchang 330013, China)

2 (School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract [Background] The noise suppression, pile-up identification and amplitude extraction of the pulse signal are affected by the choice of digital shaping method and parameters in the digital nuclear spectrometer system, which directly affect the system's energy resolution and maximum pulse count rate. [Purpose] We developed a digital signal processing platform based on MATLAB to build multiple digital shaping algorithm verification platforms and implement nuclear pulse signal processing. [Methods] The simulation nuclear signals and the sampled signals can be achieved separately to Gaussian, trapezoidal and triangular shapes in different digital shaping methods and different shaping parameters, and then completed pile-up identification, baseline estimation and amplitude extraction. [Results] The γ -ray energy spectrum of ^{137}Cs (NaI detector) and X-ray energy spectrum of Fe source (Si-PIN detector) are obtained respectively in different digital shaping methods and different shaping parameters. [Conclusion] The digital gaussian shaping shows better energy resolution characteristics, triangular shaping shows better maximum pulse count rate characteristics, and trapezoidal shaping shows better overall characteristics. Trapezoidal shaping is used to

国家自然科学基金(No.11665001)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项(No.2017YFF0106503)、国家留学基金委(No.201708360170)、江西省“百人远航工程”项目、核技术应用教育部工程研究中心开放基金项目(No.HJSJYB2014-03)资助

第一作者: 张怀强, 男, 1981 年出生, 2011 年于成都理工大学获博士学位, 副教授, 从事核探测技术与核仪器研究

收稿日期: 2018-05-14, 修回日期: 2018-06-14

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11665001), National Key R & D Project (No.2017YFF0106503), China Scholarship Council (No.201708360170), One Hundred People Sail in Jiangxi Province, Open-ended Foundation from the Chinese Engineering Research Center (No.HJSJYB2014-03)

First author: ZHANG Huaiqiang, male, born in 1981, graduated from Chengdu University of Technology with a doctoral degree in 2011, associate professor, focusing on nuclear detection technology and nuclear instruments

Received date: 2018-05-14, revised date: 2018-06-14

obtain the ^{137}Cs energy spectrum and the Gaussian shaping is used to obtain the Fe energy spectrum, which shows that as the shaping parameters increase, the energy resolution is better and the maximum pulse count rate is lower.

Key words Nuclear pulse signal, Digital shaping, MATLAB, Energy resolution

数字核谱仪系统是以高速、高分辨率的模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)对核信号进行采集,应用高速、高性能数字信号处理器 FPGA(Field- Programmable Gate Array)、DSP(Digital Signal Processing)等对脉冲幅度进行有效分析和提取为特点,其中核脉冲信号数字成形方法与技术一直是热点研究问题。例如清华大学工程物理系的研究人员在最优化数字滤波器的设计、梯形成形等方面进行了相关的研究^[1-4];四川大学物理科学与技术学院的研究人员针对核能谱获取系统中梯形成形、高斯成形等方面有相关文献报告^[5-7];成都理工大学的研究人员对核脉冲信号数字滤波成形技术进行了较深入研究,主要针对高斯滤波成形不同实现方法进行分析与研究^[8-19],国内的其他大学与科研机构在核脉冲信号的数字成形处理方法与技术方面均开展了相应的研究^[20-21]。但在核脉冲信号的数字成形处理中,数字成形方案(梯形成形、高斯成形、三角成形)与成形参数的选取直接影响着系统的噪声抑制、脉冲堆积识别与幅度提取,进而影响系统的能量分辨率、最大脉冲通过率等主要性能指标,调研现有的文献均未对数字成形方案与参数的最优化选取进行系统的分析与研究。

1 核脉冲信号数字成形原理

核脉冲信号数字成形方案包括高斯形、梯形与三角形,其中实现高斯成形常采用数字 Sallen-Key 方法,实现三角成形、梯形成形常采用传输函数法。

1.1 数字 Sallen-Key 高斯成形原理

Sallen-Key 滤波器作为一种二阶有源积分滤波电路,在核脉冲信号的滤波成形处理中可以在较少的级数下,有效地实现负指数信号到高斯信号的变

换,其电路原理图如图 1 所示。

根据基尔霍夫电流定律,建立的 Sallen-Key 滤波器电流等式如式(1)所示^[12]。

$$\begin{cases} V_n = V_p \\ \frac{V_i - V_R}{R_1} = \frac{d(V_R - V_o)}{dt} \cdot C_2 + \frac{V_R - V_p}{R_2} \\ \frac{V_R - V_p}{R_2} = \frac{dV_p}{dt} \cdot C_1 \\ V_n = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot V_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_R 、 V_n 、 V_p 、 V_i 与 V_o 分别为对应节点的电压,令 $R_1=R_2=R_3=R$, $C_1=C_2=C$, $k=RC/dt$, 对式(1)进行高斯成形数值模型推导可得式(2)。

$$V_o[n] = \frac{(k^2 + k) \cdot V_o[n-1] - k^2 V_o[n-2] + 2V_i[n]}{k^2 + k + 1} \quad (2)$$

1.2 传输函数法的梯形成形原理

设幅度为 A , 时间常数为 τ 的单指数函数形式 $V_i(t) = Ae^{-t/\tau}$, 其 z 变换为: $V_i(z) = Az / (z - e^{-T_s/\tau})$, 令 $a = e^{-T_s/\tau}$ (T_s 为采样周期), 则梯形成形的传输函数如式(3)所示^[20]。

$$H(z) = \frac{V_o(z)}{V_i(z)} = \frac{z^{-1}(1 - az^{-1})(1 - z^{-n_a} - z^{-n_b} + z^{-n_c})}{n_a(1 - z^{-1})^2} \quad (3)$$

式中: $n_a=t_a/T_s$, $n_b=t_b/T_s$, $n_c=t_c/T_s$; t_a 为梯形上升沿时间; D 为梯形平顶宽度; $t_b=t_a+D$, $t_c=t_a+t_b$ 为波形总宽度。当 $D=0$ 时, 梯形成形则为三角成形。

2 数字成形方法实现

针对前述的核脉冲信号数字成形算法与模型, 基于 MATLAB 研发一套数字成形处理与性能分析测试平台, 其设计结构框图如图 2 所示。测试平台信号来源主要包括: 系统内部仿真不同探测器输出的脉冲信号; 来自于高速 ADC 采样获取的不同探测器系统输出的真实核信号。仿真与采集的数据存

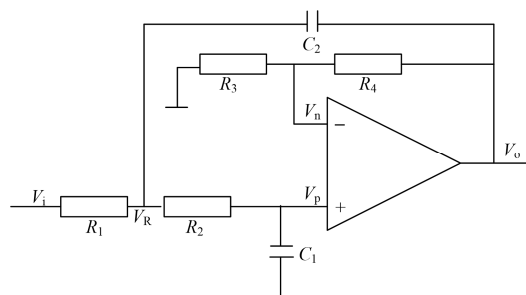


图 1 Sallen-Key 滤波器电路原理图
Fig.1 Scheme of Sallen-Key filter circuit

储到计算机，以离线的方式完成核脉冲信号的数字成形处理，同时可构建具有多套数字成形算法验证平台。数字成形处理后的信号进一步通过堆积识别、基线恢复与幅度提取处理后，分别对不同数字成形

方法、不同数字成形参数下获取能谱的能量分辨率与最大脉冲通过率指标进行测试，来分析评价数字成形的性能。

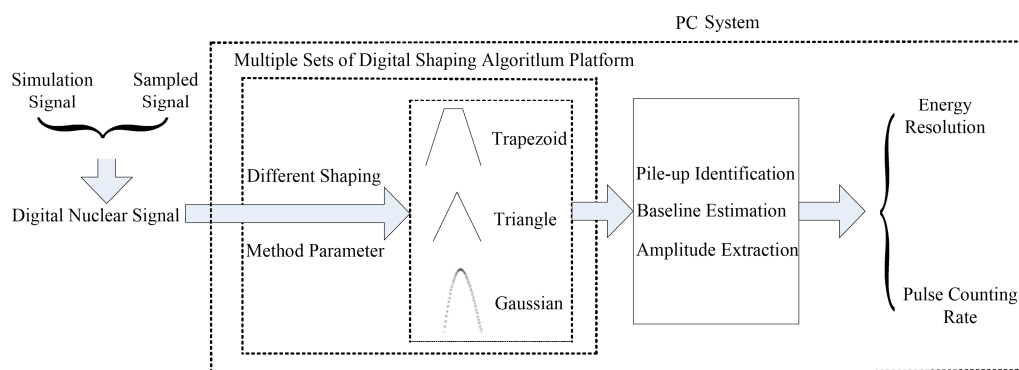


图2 数字成形实现与性能分析测试平台

Fig.2 Test platform of digital shaping implementation and performance analysis

2.1 仿真核信号的数字成形实现

仿真理想单指数衰减核信号，采用前面所述的

数字 Sallen-Key 与传输函数法分别实现高斯、梯形与三角成形输出，具体如图 3 所示。

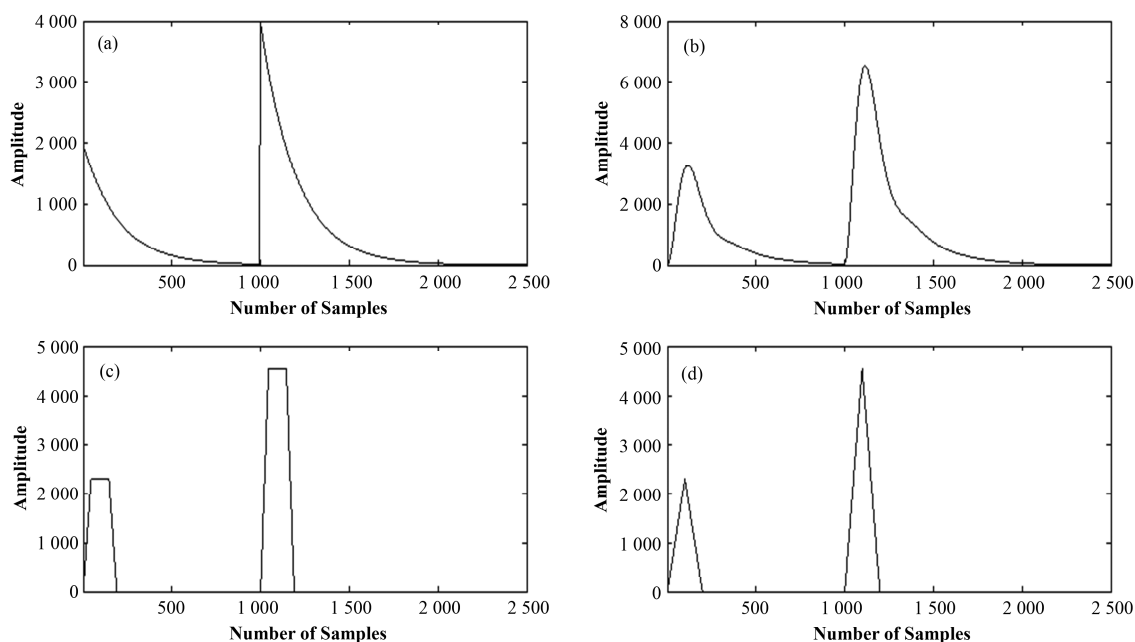


图3 仿真核信号数字成形输出

(a) 仿真核信号, (b) 高斯成形, (c) 梯形成形, (d) 三角成形

Fig.3 Digital shaping of simulated nuclear signal

(a) Simulated nuclear signal, (b) Gauss shaping, (c) Trapezoidal shaping, (d) Triangular shaping

2.2 实际采样核信号的数字成形实现

为进一步验证数字成形方法的可行性，同时为了后续能谱数据获取，系统采用美国 NI 公司的 USB-5133 采集卡（两通道，8 位，采样速率高达

10^8 s^{-1} ）对 NaI 探测器输出的信号在 20 MHz 采样率下，采取触发采样方式，获取的部分数据如图 4(a) 所示，其中有部分脉冲发生堆积，具体的高斯、梯形与三角成形输出如图 4(b)–(d) 所示。

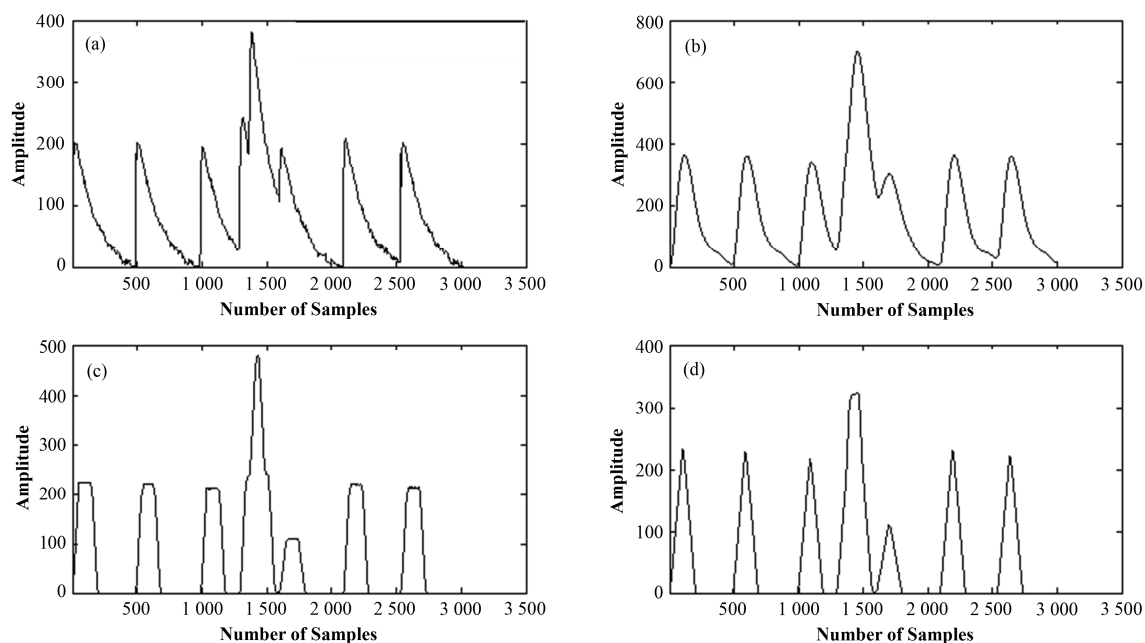


图4 实际采样核信号数字成形输出
(a) 实际核信号, (b) 高斯成形, (c) 梯形成形, (d) 三角成形

Fig.4 Digital shaping of actual sampled nuclear signal
(a) Actual nuclear signal, (b) Gauss shaping, (c) Trapezoidal shaping, (d) Triangular shaping

3 系统测试

基于不同的探测器系统输出的核脉冲信号, 采用数据采集卡获取核信号, 传送到基于 MATLAB 研发的数字成形处理与性能分析测试平台, 分别采取数字高斯成形、梯形成形、三角成形处理后, 采用作者前期研究成果中所用的脉冲堆积识别、基线恢复与幅度提取的方法^[22], 分析不同数字成形方法、不同成形参数下, 对获取能谱的能量分辨率、最大脉冲通过率性能进行对比研究, 进而分析数字成形方法的性能。

3.1 γ 能谱数据获取与分析

系统选用 CH249-02 型 NaI 探测器 (日本滨松公司) 测量 ^{137}Cs 的 γ 能谱, 高压设定为 +550 V, ADC 采样频率为 20 MHz 时, 堆积的脉冲在后续幅度提取过程中, 进行了剔除, 经研发平台处理后, 不同数字成形方法, 同一成形参数下 (16 μs) 获取的能谱如图 5 所示。

从图 5 可知, 同一批核脉冲信号采样数据, 相同的数字成形参数下, 分别采用高斯成形、梯形成形、三角成形处理后, 获取的 ^{137}Cs 能谱, 其能量分辨率与最大脉冲计数分别为 7.0% 247、7.1% 253、7.2% 262。

以梯形成形为例, 同一批核脉冲信号采样数据, 分别采用 4 μs 、8 μs 、16 μs 下获取的能谱见图 6。

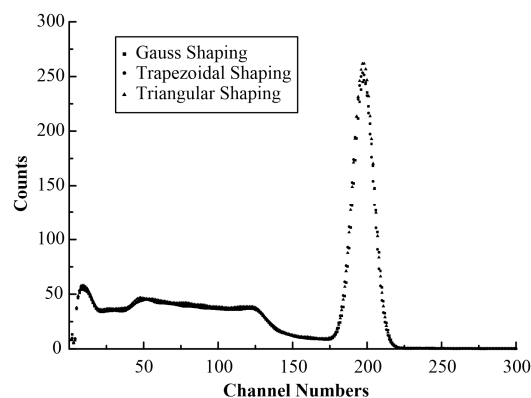


图5 不同成形方法同一成形参数下 ^{137}Cs 能谱
Fig.5 ^{137}Cs energy spectrum of same shaping parameters and different shaping methods

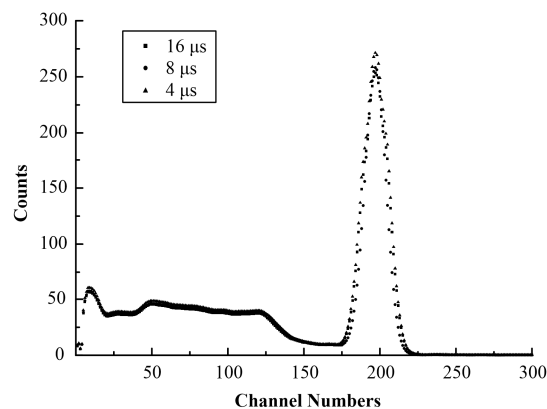


图6 梯形成形在不同参数下获取 ^{137}Cs 能谱
Fig.6 ^{137}Cs energy spectrum of trapezoidal shaping under different parameters

由图 6, 同一批核脉冲信号采样数据, 在梯形成形的参数分别为 $4\ \mu\text{s}$ 、 $8\ \mu\text{s}$ 、 $16\ \mu\text{s}$ 时获取的 ^{137}Cs 能谱, 其能量分辨率与最大脉冲计数分别为 7.3% 271、7.2% 258、7.0% 253。

3.2 X 荧光能谱数据获取与分析

系统选用 XPIN-XT 型 Si-PIN 探测器 (美国 Moxtek 公司) 与 MAGNUM 系列的 50 kV 的 X 光管作为激发源, 测量某钢尺, 光管电压为 20 kV, 电流为 $2\ \mu\text{A}$, 在 ADC 采样频率为 20 MHz 时获取的部分核脉冲如图 7 所示。

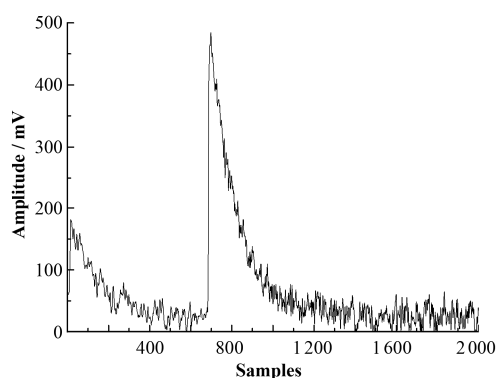


图 7 Si-PIN 探测器输出信号采样
Fig.7 Output signal sampling of Si-PIN detector

对 Si-PIN 探测器系统输出核脉冲信号进行采样, 同一批数据采取不同数字成形方法, 同一成形参数下 ($16\ \mu\text{s}$) 获取的能谱如图 8 所示。

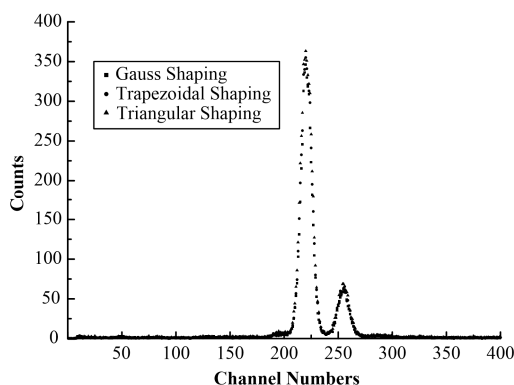


图 8 不同成形方法同一成形参数下 Fe 能谱
Fig.8 Fe energy spectrum of same shaping parameters and different shaping methods

从图 8 可知, 在同一批核脉冲信号采样数据和相同的数字成形参数下, 分别采用高斯成形、梯形成形、三角成形处理后, 获取 Fe 的特征 X 射线能谱, 其能量分辨率与最大脉冲计数分别为 178 eV 346、180 eV 353、184 eV 363。

以高斯成形为例, 同一批核脉冲信号采样数据,

分别采用 $4\ \mu\text{s}$ 、 $8\ \mu\text{s}$ 、 $16\ \mu\text{s}$ 、 $24\ \mu\text{s}$ 下获取的能谱如图 9 所示。

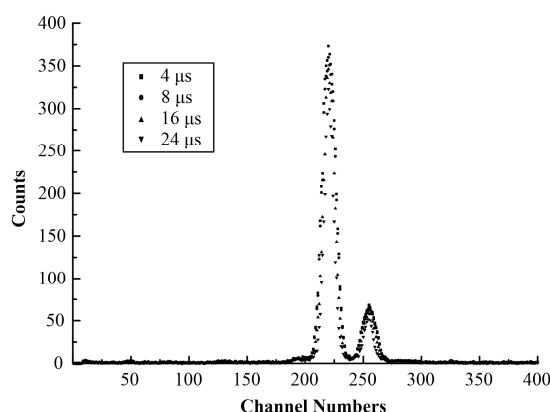


图 9 高斯成形在不同参数下获取 Fe 能谱
Fig.9 Fe energy spectrum of gauss shaping under different parameters

从图 9 可知, 同一批核脉冲信号采样数据, 高斯成形的参数分别为 $4\ \mu\text{s}$ 、 $8\ \mu\text{s}$ 、 $16\ \mu\text{s}$ 、 $24\ \mu\text{s}$ 下, 获取 Fe 的特征 X 射线能谱, 其能量分辨率与最大脉冲计数分别为 186 eV 373、182 eV 360、178 eV 346、176 eV 322。

4 结语

研发一套基于 MATLAB 的数字成形处理与性能分析测试平台, 分别实现仿真核信号、实际采样核信号的数字高斯成形、梯形成形与三角成形处理, 构建具有多套数字成形处理算法验证平台的同时, 经过堆积识别、基线恢复和幅度提取处理后, 获取 NaI 探测器 ^{137}Cs 的 γ 能谱, Si-PIN 探测器的 Fe 的特征 X 射线能谱, 通过测试可得:

1) 采取不同的数字成形方法, 同一成形参数下, 数字高斯成形表现出更好的能量分辨率特性, 三角成形表现出更好的最大脉冲计数率特性, 而梯形成形表现出更好的综合性能。

2) 采取同一成形方法, 不同的成形参数, 随着成形参数的增加, 噪声抑制性能越好, 脉冲堆积几率越大, 使得能量分辨率性能越好, 最大脉冲计数率越小。

3) 不同的数字成形方法、不同的成形参数对数字化核能谱获取系统的其他性能指标的影响, 将在后续工作中进行研究。

参考文献

- 肖无云, 魏义祥, 艾宪芸. 数字化多道脉冲幅度分析中的梯形成形算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 810-812. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2005.06.025.

- XIAO Wuyun, WEI Yixiang, AI Xianyun. Trapezoidal shaping algorithm for digital multi-channel pulse height analysis trapezoidal shaping algorithm for digital multi-channel pulse height analysis[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, **45**(6): 810–812. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2005.06.025.
- 2 文向阳, 魏义祥, 肖无云. 任意噪声和约束下的最佳数字滤波器设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(9): 1597–1600. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2006.09.026.
- WEN Xiangyang, WEI Yixiang, XIAO Wuyun. Optimum digital filter synthesis with arbitrary constraints and noise[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, **46**(9): 1597–1600. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2006.09.026.
- 3 Xiao W Y, Wei Y X, Ai X Y, *et al.* System simulation of digital pulse spectrometer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005, **A555**: 231–235. DOI: 10.1016/j.nima.2005.09.027.
- 4 Wen X Y, Wei Y X. Constrained digital matched filter method for optimum filter synthesis[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006, **A560**: 346–351. DOI: 10.1016/j.nima.2005.12.199.
- 5 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. DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2007.01.024.
- ZHOU Qinghua, ZHANG Ruanyu, LI Taihua. Matlab-based researching method of trapezoidal shaping filter[J]. Journal of Sichuan University (Science and Technology), 2007, **44**(1): 111–114. DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2007.01.024.
- 6 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.
- 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.
- 7 刘寅宇, 张京隆, 周荣, 等. CR-RC^m 滤波器数字化研究[J]. 核技术, 2017, **40**(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.060403.
- LIU Yinyu, ZHANG Jinglong, ZHOU Rong, *et al.* Digitalization of CR-RC^m filter[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.060403.
- 8 Zhou J B, Zhou W, Lei J R, *et al.* Study of time-domain digital pulse shaping algorithms for nuclear signals[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, **23**(3): 150–155. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.23.150-155.
- 9 周伟, 周建斌, 雷家荣, 等. 基于 Sallen-Key 滤波器的数字高斯成形方法的仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, **25**(1): 195–196. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2013.01.021.
- ZHOU Wei, ZHOU Jianbin, LEI Jiarong, *et al.* Simulation of digital Gaussian filtering based on Sallen-Key filter[J]. Journal of System Simulation, 2013, **25**(1): 195–196. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2013.01.021.
- 10 周建斌, 王敏, 周伟, 等. 实时核信号数字化脉冲成形关键技术研究[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(2): 352–356. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.02.0352.
- ZHOU Jianbin, WANG Min, ZHOU Wei, *et al.* Key technology research of nuclear signal digitized pulse shaping in real time[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(2): 352–356. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.02.0352.
- 11 葛青, 葛良全, 吴建平, 等. 基于采样定理的核信号数字高斯滤波成形研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(10): 1201–1203. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.10.011.
- GE Qing, GE Liangquan, WU Jianping, *et al.* Research on digital Gaussian shaping filter for nuclear signals based on sampling theorem[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(10): 1201–1203. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.10.011.
- 12 洪旭, 倪师军, 周建斌, 等. 数字高斯脉冲成形算法仿真研究[J]. 核技术, 2016, **39**(11): 110403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110403.
- HONG Xu, NI Shijun, ZHOU Jianbin, *et al.* Simulation study on Gaussian pulse shaping algorithm[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(11): 110403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110403.
- 13 凡小红, 庾先国, 王磊, 等. 核脉冲信号数字化梯形滤波仿真与测试[J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(4): 373–377. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.04.014.
- FAN Xiaohong, TUO Xianguo, WANG Lei, *et al.* Nuclear pulse signal simulation and testing based on digital trapezoidal shaping filter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, **35**(4): 373–377. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.04.014.
- 14 Zhou J B, Hong X, Wang R B, *et al.* Study of recursive model for pole-zero cancellation circuit[J]. Nuclear

- Science and Techniques, 2014, **25**(1): 010403. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.010403.
- 15 Hong X, Ma Y J, Zhou J B, *et al.* New methods to remove baseline drift in trapezoidal pulse shaping[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, **26**(5): 050402. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.050402.
- 16 Ge Q, Ge L Q, Yuan H W, *et al.* A new digital Gaussian pulse shaping algorithm based on bilinear transformation[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, **26**(1): 010402. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.010402.
- 17 Zeng G Q, Yang J, Hua T Y, *et al.* Baseline restoration technique based on symmetrical zero-area trapezoidal pulse shaper[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2017, **A858**: 57–61. DOI: 10.1016/j.nima.2017.03.049.
- 18 Zeng G Q, Yang J, Yu M F, *et al.* Digital pulse deconvolution method for current tails of NaI(Tl) detectors[J]. Chinese Physics C, 2017, **41**(1): 016102. DOI: 10.1088/1674-1137/41/1/016102.
- 19 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.
- 20 Zhang H Q, Ge L Q, Tang B, *et al.* Optimal choice of trapezoidal shaping parameters in digital nuclear spectrometer system[J]. Nuclear Science and Techniques, 2013, **24**(6): 060602. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.2013.06.011.
- 21 张怀强, 李丽, 吴和喜, 等. 基于 LabVIEW 的数字核信号滤波成形方法的设与实现[J]. 核技术, 2013, **36**(2): 020202.
ZHANG Huaiqiang, LI Li, WU Hexi, *et al.* Design and realization of digital nuclear signal filter shape based on LabVIEW[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(2): 020202.
- 22 张怀强. 数字核谱仪系统中关键技术的研究[D]. 四川: 成都理工大学, 2011.
ZHANG Huaiqiang. Study on key technologies of digital nuclear spectrometer system[D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2011.