

基于余弦函数的核脉冲信号数字成形方法研究

魏勇^{1,2} 张怀强^{1,2} 钱云琛¹ 陈壑¹

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 核脉冲信号的数字余弦函数(cos)成形,因成形简单、可操作性强和灵活性高等优势被用于核脉冲信号的数字成形处理中。本文从单指数衰减脉冲信号和cos脉冲信号的数学模型出发,推导了对称cos成形、零面积cos成形与对称零面积cos成形三种成形方法在Z域中的传递函数和级联公式,分析了成形参数对数字cos成形结果的影响。针对仿真核信号和实际采样核信号,分别实现了三种数字cos成形;基于现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)系统,实现了核信号的数字cos成形、幅度提取、能谱构建等功能。通过对¹³⁷Cs(NaI(Tl)探测器)γ能谱的测试,结果表明三种数字cos成形方法在能量分辨率和计数方面均表现良好,且对称零面积cos成形性能指标更为优异,具有较大的应用前景。

关键词 数字cos成形, 数字核脉冲信号, 能量分辨率

中图分类号 TL822

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100402

Digital shaping methods for nuclear pulse signal based on cosine function

WEI Yong^{1,2} ZHANG Huaiqiang^{1,2} QIAN Yunchen¹ CHEN He¹

1(Engineering Research Center of Nuclear Techniques 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] Cosine function shaping (or cos shaping) is used to digitally shape nuclear pulse signals, as the shaping method is simple and has high operability and flexibility. [Purpose] This study aims to explore different cosine shaping methods of nuclear pulse signals, and evaluate their effect. [Methods] Firstly, based on the single exponential decay signal and cosine pulse signal, transfer functions and cascade formulas of three different cosine shaping methods in the Z-domain were derived. The influence of the parameter selection on the shaping effect in the cosine shaping algorithm was analyzed. Then, the cosine shaping methods were developed for the simulated nuclear signals and the actual sampled nuclear signals, and the cosine shaping, amplitude extraction, and energy spectrum construction of the digital nuclear signals were implemented in the field programmable gate array (FPGA) system. Finally, the gamma (γ) energy spectrum of ¹³⁷Cs (NaI(Tl) detector) was evaluated using the different cosine

国家自然科学基金(No.12275050)、江西省高层次高技能领军人才培养工程项目资助

第一作者: 魏勇, 男, 1999年出生, 2021年毕业于东华理工大学核科学与工程学院, 现为硕士研究生, 主要从事核探测技术与核仪器研究

通信作者: 张怀强, E-mail: zhanghq821@163.com

收稿日期: 2023-03-22, 修回日期: 2023-05-12

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12275050), High-level and High-skilled Leading Talent Training Project of Jiangxi Province

First author: WEI Yong, male, born in 1999, graduated from School of Nuclear Science and Engineering of East China University of Technology in 2021, master student, focusing on nuclear detection technology and nuclear instruments

Corresponding author: ZHANG Huaiqiang, E-mail: zhanghq821@163.com

Received date: 2023-03-22, revised date: 2023-05-12

shaping methods. **[Results]** The results of γ energy spectrum from ^{137}Cs (NaI(Tl) detector) demonstrate the satisfactory performance of all three digital cosine shaping algorithms in terms of energy resolution and counting. The symmetric zero-area cosine shaping performance index is improved relative to conventional methods. **[Conclusions]** The three kinds of digital cosine shaping methods all achieve accurate cosine shaping for simulated and real nuclear signals. The three cosine shaping methods proposed in this study may be applied to shape functions in other research areas.

Key words Digital cosine shaping, Digital nuclear pulse signal, Energy resolution

在数字核谱仪系统中,核脉冲信号的数字滤波成形技术一直作为热点研究问题^[1],为了提高系统的信噪比,满足后续能谱测量要求,常对核脉冲信号进行数字高斯、梯形(三角形)成形处理^[2];文献[3-4]推导了数字高斯成形在时域中的递推关系及Z域中的传递函数,分析了高斯成形在频域中的滤波性能和幅频响应特性;文献[5]利用 Multisim 和 MATLAB 设计了高斯成形电路,实现了实际核信号的数字化高斯成形处理;文献[6]分析了不同参数对 CR-(RC)^m 成形效果的影响,并基于计数率和能量分辨率给出了最佳成形参数;文献[7-8]推导了数字 Sallen-Key(SK)成形的递推数值模型,讨论了电阻和电容对滤波器品质因数、截止频率和幅频响应的影响,提出了数字 SK 成形的最优化参数选取原则;文献[9]将 CR-(RC)^m 和 SK 成形优势互补,提出了 CR-SK 混合滤波器,有效实现了核脉冲信号的数字高斯成形;文献[10]建立并简化了核信号脉冲的数学模型,并在现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)中实现梯形成形算法;文献[11-12]搭建了核脉冲信号梯形成形平台,探讨了数字成形参数选取方法;文献[13]利用梯形顶部的梯度,引入了参数校正方法,优化了梯形成形结果。除了上述常用数字成形方法外,文献[14-15]推导了尖顶成形的数字递推算式,对核信号实现了数字尖顶成形;文献[16]实现了核信号的尖顶成形、堆积识别与分离、幅度提取,对衰减系数、成形宽度等参数进行了选择和优化;文献[17]提出了 sin 函数成形算法,其在抑制噪声、抗弹道亏损、减少堆积、恢复基线和提高能量分辨率方面有着较大的优势;文献[18]提出了基于多级级联卷积的数字高斯脉冲成形算法,该算法可在高计数率下获得高能量分辨率;文献[19]构建了极零相消电路的修正级联等效模型,推导了时域下的数字极零相消递推算式,基于该算法设计并实现了可有效抑制高频噪声的梯形(三角形)成形滤波器。基于此,本文提出了数字 cos 成形方法,详细推导了三种 cos 成形的传递函数和数字递推算式,实现了仿真核信号和实际采样核信号的数字 cos 成形,基于 FPGA 系统开展 cos 成形的

级联结构分析,对核数字信号进行了 cos 成形处理与分析。

1 cos 成形原理

1.1 对称 cos 成形

在理想条件下,探测器输出的核脉冲信号经过前置放大器处理后可视为图1(a)所示的单指数衰减脉冲 $V_m(t)$,其时域中的表达式如式(1)所示。

$$V_m(t) = \frac{Q}{C} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

式中: Q 为探测器产生的总电荷; C 和 R 分别为前置放大器的反馈电容和反馈电阻,衰减常数 $\tau=RC$ 。

理想余弦函数曲线如图1(b)所示,其函数表达式如式(2)所示。

$$V(t) = V_m \cos\left(\frac{\pi}{n_s} t\right) u(t) \quad (2)$$

图1(c)中的实线 $V_1(t)$ 和虚线 $V_2(t)$ 表达式如式(3)所示。

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_m \cos\left[\frac{\pi}{n_s}(t - 0.5t_s)\right] u(t) \\ V_2(t) &= V_1(t - t_s) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t_s 为 cos 成形脉冲的宽度; V_m 为 cos 成形脉冲的最大幅度, $V_m=Q/C$; $u(t)$ 为单位阶跃信号。

图1(d)为理想 cos 成形脉冲信号,其时域中的表达式如式(4)所示。

$$V_{\cos}(t) = V_1(t) + V_2(t) \quad (4)$$

对式(1)和式(4)进行Z变换可得核脉冲信号和 cos 脉冲信号在Z域中的表达式,分别如式(5)和式(6)所示。

$$V_m(z) = V_m \frac{z}{z - a} \quad (5)$$

$$V_{\cos}(z) = V_m \frac{bz(1 + z^{-n_s})}{1 - cz + z^2} \quad (6)$$

其中: $a=\exp(-T/\tau)$, $b=\sin(\pi/n_s)$, $c=2\cos(\pi/n_s)$, $n_s=t_s/T$, T 为模数变换器(Analog-to-digital Converter, ADC)的采样周期。

由式(5)和(6)可得,对称 cos 成形的传递函数 $H_{\cos}(z)$,如式(7)所示。

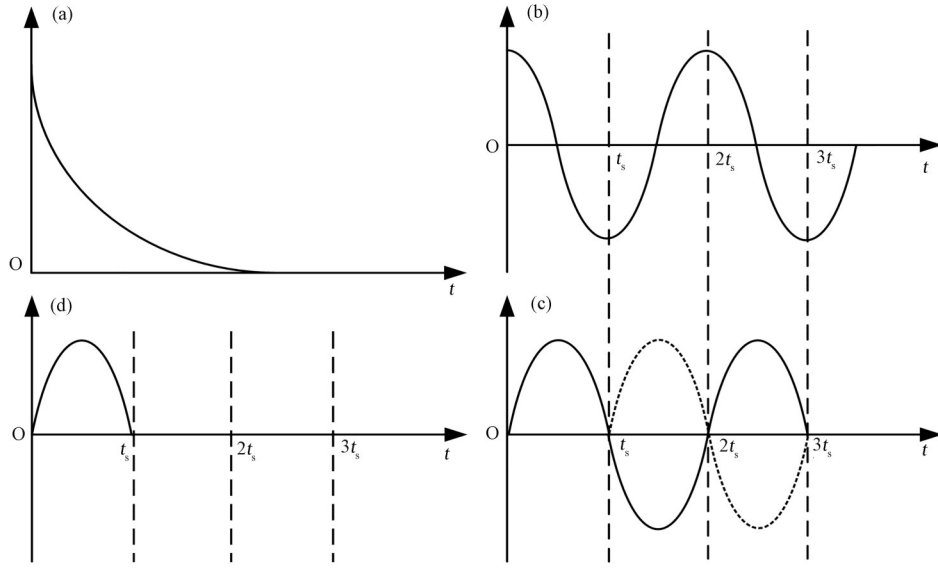


图1 核脉冲信号(a), cos 信号(b~c)和 cos 成形信号(d)
 Fig.1 (a) A nuclear pulse signal, (b~c) cosine signal, and (d) cosine-shaped signals

$$H_{\cos}(z) = \frac{bz^{-1}(1+z^{-n_s})(1-az^{-1})}{1-cz^{-1}+z^{-2}} \quad (7)$$

根据式(7)可得,对称 cos 成形算法的级联结构如图2所示。

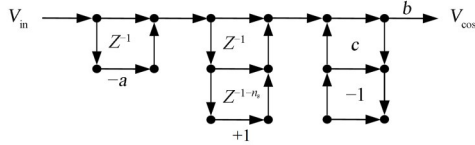


图2 对称 cos 成形算法级联结构

Fig.2 Cascade structure of symmetric cos-shaping algorithm

由图2可知,对称 cos 成形算法的级联结构为4级,其具体级联公式如式(8)所示。

$$\begin{aligned} p(n) &= V_{\text{in}}(n) - a \cdot V_{\text{in}}(n-1) \\ q(n) &= p(n-1) + p(n-n_s-1) \\ h(n) &= q(n) + c \cdot h(n-1) - h(n-2) \\ V_{\cos}(n) &= b \cdot h(n) \end{aligned} \quad (8)$$

1.2 零面积 cos 成形

将对称 cos 成形脉冲进行平移和反转等变换后,可得零面积 cos 成形算法,其变换过程如图3所示。

由图3可知,零面积 cos 成形算法的级联结构为5级,其具体级联公式如式(9)所示。

$$\begin{aligned} p(n) &= V_{\text{in}}(n) - a \cdot V_{\text{in}}(n-1) \\ q(n) &= p(n-1) + p(n-n_s-1) \\ h(n) &= q(n) + c \cdot h(n-1) - h(n-2) \\ V_{\cos}(n) &= b \cdot h(n) \\ V_{Z-\cos}(n) &= V_{\cos}(n) - V_{\cos}(n-n_s) \end{aligned} \quad (9)$$

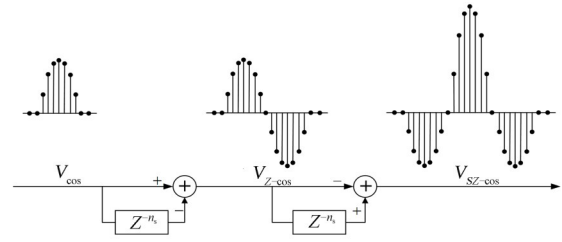


图3 不同 cos 成形算法的变换过程

Fig.3 Transformation process of different cos-shaping algorithms

1.3 对称零面积 cos 成形

将零面积 cos 成形脉冲进行平移和反转等变换后,可得对称零面积 cos 成形算法,其变换过程如图3所示。由图3可知,对称零面积 cos 成形算法的级联结构为6级,其具体级联公式如式(10)所示。

$$\begin{aligned} p(n) &= V_{\text{in}}(n) - a \cdot V_{\text{in}}(n-1) \\ q(n) &= p(n-1) + p(n-n_s-1) \\ h(n) &= q(n) + c \cdot h(n-1) - h(n-2) \\ V_{\cos}(n) &= b \cdot h(n) \\ V_{Z-\cos}(n) &= V_{\cos}(n) - V_{\cos}(n-n_s) \\ V_{SZ-\cos}(n) &= V_{Z-\cos}(n) - V_{Z-\cos}(n-n_s) \end{aligned} \quad (10)$$

2 cos 成形算法实现

2.1 成形参数对数字 cos 成形的影响

为了探究 cos 成形算法中衰减常数 τ 和成形宽度 n_s 对核脉冲信号数字 cos 成形结果的影响,对仿真

核脉冲信号,在不同参数下,采用式(8)所示的算法进行数字 cos 成形,成形结果如图4所示,其中仿真核脉冲信号的衰减常数为40。

由图4(a)可知,衰减常数 τ 的大小直接影响着核脉冲信号数字 cos 成形的结果。当衰减常数 τ 大于仿真核脉冲信号的衰减常数时,cos 脉冲的尾端出现下冲;当衰减常数 τ 小于仿真核脉冲信号的衰减常数时,cos 脉冲的尾端则被抬高。

由图4(b)可知,成形宽度 n_s 的大小影响着 cos 成形脉冲的宽度, n_s 越大,cos 成形脉冲的宽度越大,峰位同时右移。

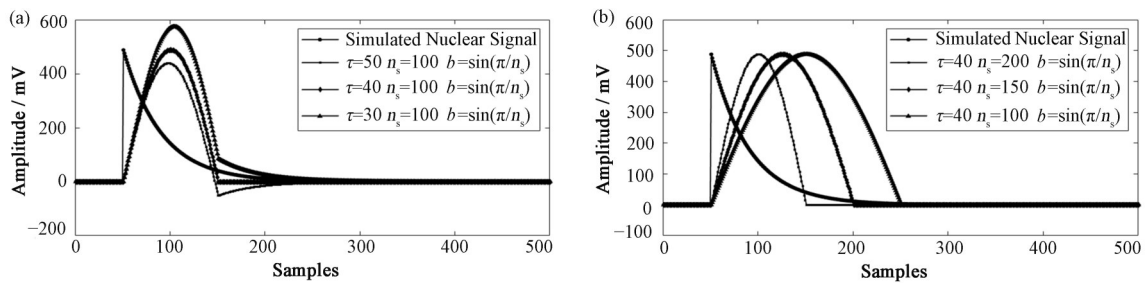


图4 不同参数下的仿真核信号 cos 成形 (a) 衰减常数不同, (b) 成形宽度不同
Fig.4 cos-shaping simulated nuclear signal with different parameters (a) Different decay constants, (b) Different shaping width

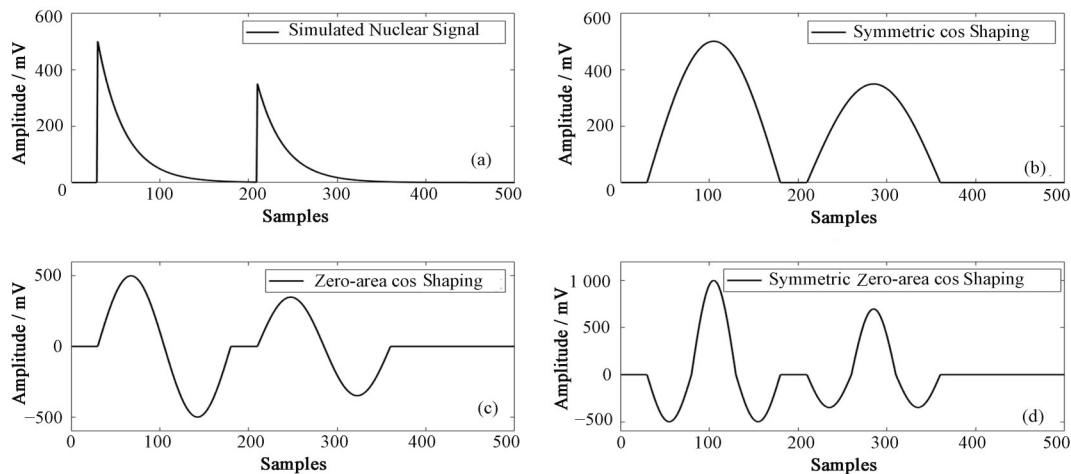


图5 仿真核信号的不同 cos 成形方法示意图
Fig.5 Diagram of different cos-shaping methods performed on simulated nuclear signal

采用美国 Moxtek 公司的 XPIN-XT 型 Si-PIN 探测器测量 ^{55}Fe , ADC 采样率为 40 MHz 时,获取的核脉冲信号如图8(a)所示,三种数字 cos 成形的结果如图8(b~d)所示,其中成形宽度 n_s 为150。

由图8可知, Si-PIN 探测器输出信号基线有所上移,经过零面积 cos 成形和对称零面积 cos 成形后信号整体有所下降,说明上述两种 cos 成形具有一定的基线恢复作用。

2.2 核脉冲信号的数字 cos 成形

对仿真核脉冲信号采用式(8)、(9)与(10)所示的公式实现数字 cos 成形,具体成形结果如图5所示。添加标准差为10的高斯白噪声后,具体成形结果如图6所示,其中成形宽度 n_s 为150。由图5和图6可知,三种 cos 成形均具有较好的滤波成形效果。

采用日本滨松公司的 CH249 型 NaI 探测器测量 ^{137}Cs 的 γ 射线,高压设定为+560 V, ADC 采样率为 40 MHz 时,获取的核脉冲信号如图7(a)所示,三种数字 cos 成形的结果如图7(b~d)所示,其中成形宽度 n_s 为150。

2.3 基于 FPGA 的数字 cos 成形

选取三种 cos 成形算法的数字递推式,采用级联方式在 FPGA 中实现三种 cos 数字成形,具体级联结构如图9所示。

由于 cos 成形算法中的参数 a 、 b 和 c 均为小数,本文选择将参数 a 、 b 和 c 由浮点数转化为定点数再进行乘除法运算。基于式(8~10)所示的三种 cos 成形算法,采用 Signal Tap 获取输入输出波形,结果如

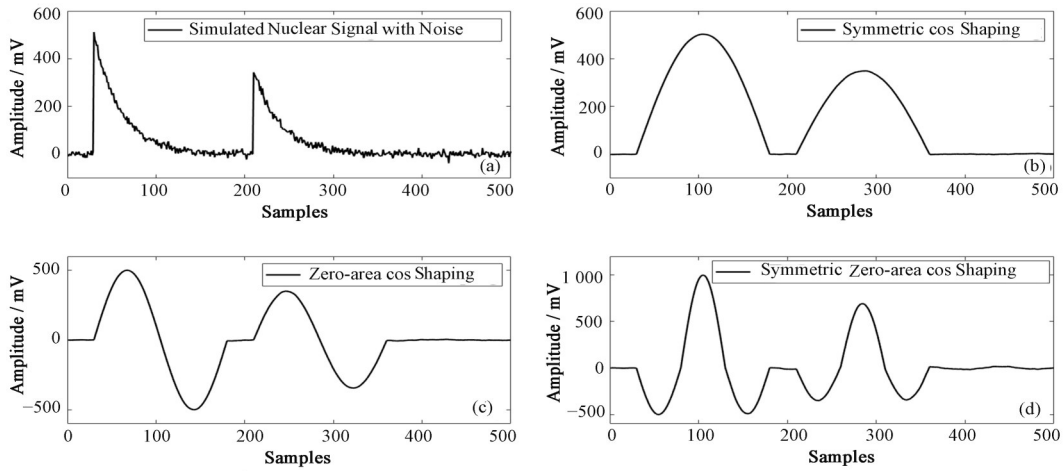


图6 带噪声的仿真核信号的不同 cos 成形方法示意图
 Fig.6 Diagram of different cos-shaping methods performed on simulated nuclear signal with noise

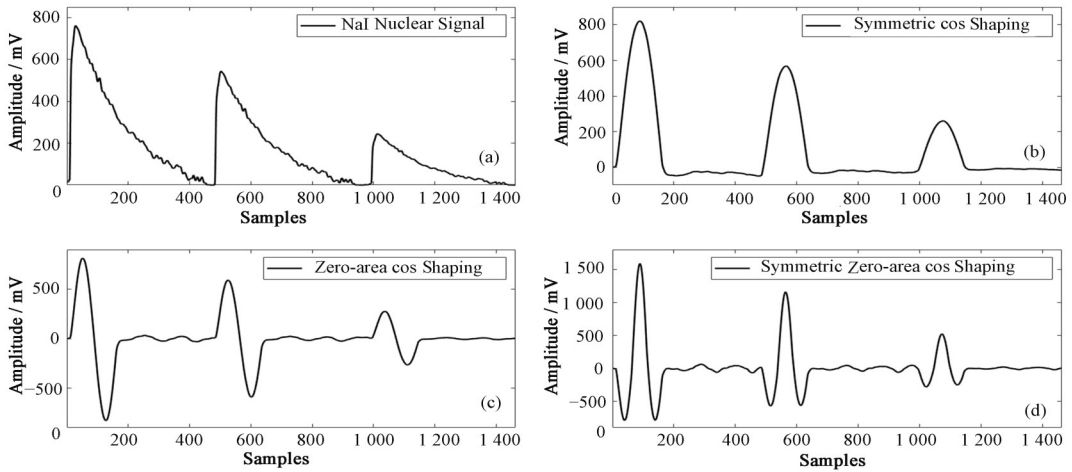


图7 NaI探测器信号的不同 cos 成形方法示意图
 Fig.7 Diagram of different cos-shaping methods performed on NaI nuclear detector signal

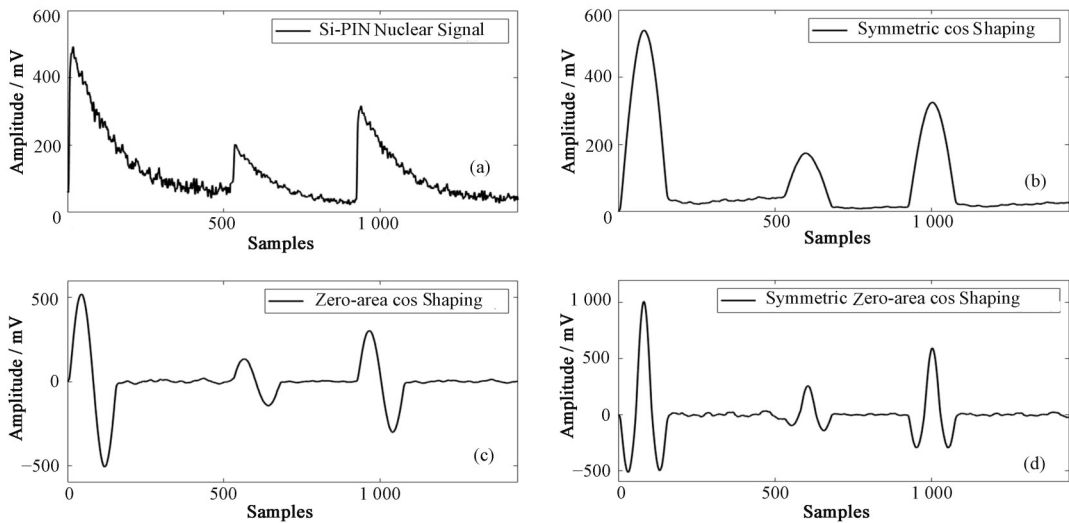


图8 Si-PIN探测器信号的不同 cos 成形方法示意图
 Fig.8 Diagram of different cos-shaping methods performed on Si-PIN detector signal

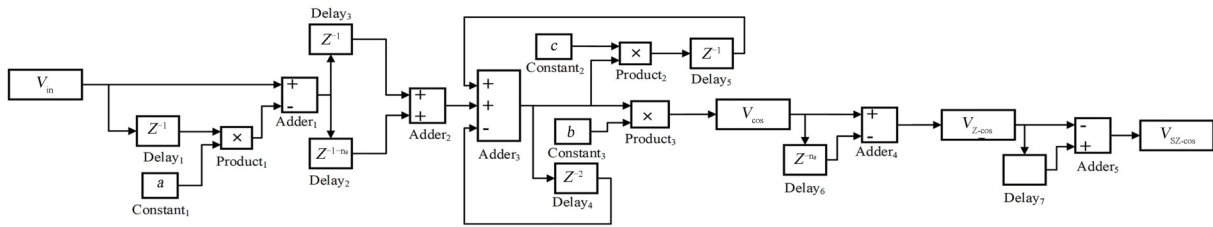


图9 cos成形级联结构示意图
Fig.9 Structure diagram of cascade structure of cos shaping

图10所示。

从图10可以看出,三种cos成形算法均可以有

效地将输入的指数衰减信号成形为cos脉冲信号,且成形效果良好。

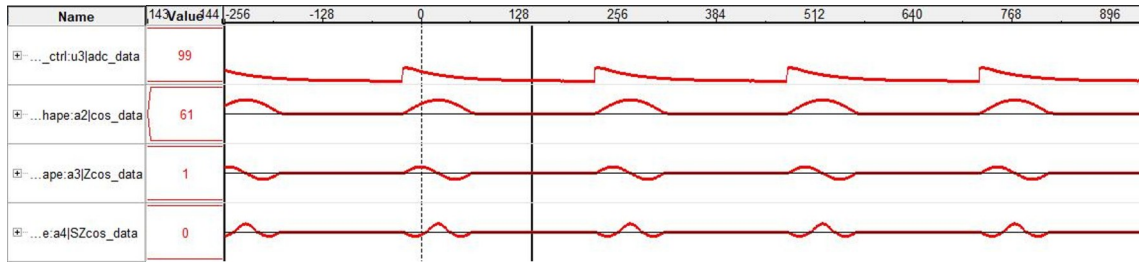


图10 数字cos成形的Signal Tap波形
Fig.10 Signal Tap waveform of digital cos shaping

3 实际测试

系统选用高灵敏低钾 NaI (TI) 探测器 ($\varnothing 75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$), ADC 采样率为 20 MHz, 采用三种 cos 成形算法对核脉冲信号进行处理(其中对称零面积 cos 成形先将脉冲幅度衰减为原来的 1/2, 再进行幅度提取), 最终获得 ^{137}Cs 的 γ 能谱。为了更清晰地显示能谱峰位信息, 选取 530~790 keV 能量区间的能谱(图 11)。对不同 cos 成形算法下 ^{137}Cs 的 γ 能谱进行能量分辨率与计数性能测试, 得到的结果如表 1 所示。

由表 1 可知, cos 成形的能量分辨率为 7.36%, 零面积 cos 成形的能量分辨率为 7.14%, 对称零面积 cos 成形的能量分辨率为 6.95%; cos 成形的计数为 9 267, 零面积 cos 成形的计数为 9 787, 对称零面积 cos 成形的计数为 10 240。结果表明: cos 成形、零面积 cos 成形和对称零面积 cos 成形在能量分辨率和

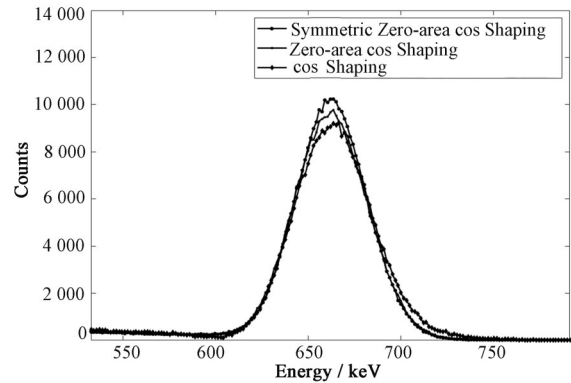


图11 不同cos成形方法的 ^{137}Cs γ 能谱
Fig.11 ^{137}Cs gamma energy spectra with different cos-shaping methods

计数方面均表现良好, 且对称零面积 cos 成形在三者中效果最好。

表1 不同cos成形方法的能量分辨率与计数
Table1 Energy resolution and count values for the different cos-shaping methods

成形类型 Shaping type	能量分辨率 ^{137}Cs 662 keV Energy resolution ^{137}Cs 662 keV	计数 Counts
cos成形 cos shaping	7.36%	9 267
零面积 cos 成形 Zero-area cos shaping	7.14%	9 787
对称零面积 cos 成形 Symmetric zero-area cos shaping	6.95%	10 240

4 结语

本文推导了数字 cos 成形的传递函数和级联公式, 探究了 cos 成形算法中的成形参数对成形效果的影响: 衰减常数 τ 决定 cos 脉冲的形状, 成形宽度 n_s 与 cos 脉冲宽度正相关。采用三种 cos 成形算法, 对仿真核信号和实际采样核信号实现了数字 cos 成形, 成形效果良好, 三种 cos 成形均具有一定噪声抑制能力, 零面积 cos 成形和对称零面积 cos 成形具有一定基线恢复能力。使用 NaI(Tl) 探测器对 ^{137}Cs 的 γ 能谱进行测量, 三种 cos 成形在能量分辨率和计数方面均表现良好, 且对称零面积 cos 成形较其余两种表现更为优异, 具有较大的应用前景。

作者贡献声明 魏勇负责设计和测试算法, 起草文章初稿及修订文章最终版本; 张怀强负责全程指导, 审阅修改文章内容, 提供项目资助; 钱云琛负责收集和整理资料, 修订文章; 陈壑负责校对文章, 分析总结。

参考文献

- 卢炜煌. 核脉冲信号数字成形方法与性能分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
LU Weihuang. Research and performance analysis of digital shaping of nuclear pulse signals[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- Zhang H Q, Shi H T, Li Z D, *et al.* Digitalization of inverting filter shaping circuit for nuclear pulse signals[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(9): 86. DOI: 10.1007/s41365-020-00799-2.
- 张怀强, 颜苗苗, 刘进洋. 核脉冲信号滤波成形电路的数字化研究[J]. 核技术, 2019, **42**(7): 070402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070402.
ZHANG Huaiqiang, YAN Miaomiao, LIU Jinyang. Digitalization of filter shaping circuit for nuclear pulse signal[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(7): 070402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070402.
- 李卓岱, 张怀强, 刘进洋, 等. 数字核脉冲信号高斯成形方法实现与对比分析[J]. 核技术, 2019, **42**(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060403.
LI Zhuodai, ZHANG Huaiqiang, LIU Jinyang, *et al.* Implementation and analysis of Gaussian shaping method for digital nuclear pulse signal[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060403.
- 卢炜煌, 张怀强, 李卓岱. 基于 Multisim/MATLAB 的核脉冲信号高斯成形[J]. 核电子学与探测技术, 2020, **40**(4): 604 - 609. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2020.04.015.
LU Weihuang, ZHANG Huaiqiang, LI Zhuodai. Gaussian forming of nuclear pulse signal based on Multisim/MATLAB[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2020, **40**(4): 604 - 609. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2020.04.015.
- Zhang H Q, Li Z D, Tang B, *et al.* Optimal parameter choice of CR-RC^m digital filter in nuclear pulse processing [J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(7): 108. DOI: 10.1007/s41365-019-0638-7.
- Zhang H Q, Tang B, Wu H X, *et al.* Study of Sallen-Key digital filters in nuclear pulse signal processing[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(10): 145. DOI: 10.1007/s41365-019-0679-y.
- 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.
- 张庆, 徐辉. 基于 Multisim 的高斯滤波器仿真与改进[J]. 能源研究与管理, 2020(2): 53 - 57. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2020.02.011.
ZHANG Qing, XU Hui. Simulation and improvement of Gaussian filter based on Multisim[J]. Energy Research and Management, 2020(2): 53 - 57. DOI: 10.16056/j.2096-7705.2020.02.011.
- 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.
- 任印权, 何剑锋, 周世融, 等. 核信号高斯与梯形数字成形方法仿真及其评价[J]. 核电子学与探测技术, 2018, **38**(1): 105 - 110. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2018.01.021.
REN Yinquan, HE Jianfeng, ZHOU Shirong, *et al.* The simulation and evaluation for method of Gaussian and trapezoidal digital shaping of nuclear signal[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2018, **38**(1): 105 - 110. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2018.01.021.
- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.7538/yzk.2014.48.02.0352).
- 13 Song W G, Zhang L J, Wang G Y. A method to restrain parameter drift in trapezoidal pulse shaping[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, **67**(7): 1710 - 1714. DOI: [10.1109/TNS.2020.2995901](https://doi.org/10.1109/TNS.2020.2995901).
- 14 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).
- 15 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).
- 16 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).
- 17 Zhao C Y, Xiong H, Liu Y Y, *et al.* A new digital filter based on sinusoidal function for gamma spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **944**: 162582. DOI: [10.1016/j.nima.2019.162582](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162582).
- 18 Wang M, Zhou J B, Ouyang X P, *et al.* Gaussian shaper for nuclear pulses based on multilevel cascade convolution[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(12): 160. DOI: [10.1007/s41365-022-01145-4](https://doi.org/10.1007/s41365-022-01145-4).
- 19 Wang H P, Zhou J B, Ouyang X P, *et al.* Application of pole-zero cancellation circuit in nuclear signal filtering and shaping algorithm[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(8): 86. DOI: [10.1007/s41365-021-00916-9](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00916-9).