

卷积型类高斯成形滤波算法研究及应用

王怀平^{1,2,3} 周建斌¹ 庾先国¹ 王明¹ 汪雪元^{1,2} 冯林³

1(成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

2(东华理工大学 核技术应用教育部工程研究中心 南昌 330013)

3(东华理工大学 机械与电子工程学院 南昌 330013)

摘要 高斯信号具有对称性和完备性,因此高斯滤波方法在核信号处理以及辐射能谱分析时得到大量使用。目前构造实时处理核脉冲信号的真高斯成形滤波器尚有难度,实际常用数字类高斯成形算法主要是基于模拟核电子学中 Sallen-Key 滤波器和 CR-(RC)ⁿ 滤波器的电路微分方程推导而得到,其输出的类高斯脉冲信号对称性较差、单级使用时存在下冲等问题。本文提出一种卷积型类高斯成形滤波算法,它以梯形脉冲信号为基础,经过第一次卷积实现双极性脉冲成形,再次卷积进行累加求和从而得到左右对称的类高斯脉冲,利用 Z 变换方法推导出该算法的数字递推公式。通过仿真模拟研究了算法的有效性和成形参数对幅频特性的影响规律,成形参数 n_1 和 n_2 取值增大时,滤波器通频带减小,低频成分幅度相对增加,高频噪声抑制作用增强,但也导致成形脉冲变宽,增加了脉冲堆积概率。最后,利用搭建的 X 射线荧光测量系统实验平台获取实测核脉冲数据,分别应用类高斯成形算法和梯形成形算法进行离线处理,实验结果表明:该类高斯成形算法具有更好的堆积脉冲分离能力,在相同的 X 光管管压和管流条件下,设置相同的达峰时间,两者所得能谱的能量分辨率基本相当,但是类高斯成形的能谱具有更高的特征峰面积和总计数。

关键词 数字脉冲处理, 类高斯成形, 梯形成形, 能量分辨率

中图分类号 TL822⁺.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010403

Research and application of convolutional quasi-Gaussian pulse shaping filter algorithm

WANG Huaiping^{1,2,3} ZHOU Jianbin¹ TUO Xianguo¹ WANG Ming¹ WANG Xueyuan^{1,2} FENG Lin³

1(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

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

3(School of Mechanical and Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract [Background] Gaussian signals have symmetry and completeness, hence, the Gaussian filtering method is widely used in nuclear signal processing and radiation energy spectrum analysis. The mathematical description of Gaussian signals is relatively complex, which makes it difficult to construct digital Gaussian pulse shaping filters for nuclear pulse signal real-time processing. The commonly used digital quasi-Gaussian shaping algorithm in radiation measurement systems is derived from the differential equations of Sallen-Key and CR-(RC)ⁿ filters in analog nuclear electronics. However, its output shaping pulse signals have poor symmetry and problems such as undershoot occur

国家自然科学基金(No.11975060)、江西省重点研发计划项目(No.20203BBE53030)资助

第一作者: 王怀平, 男, 1974 年出生, 2009 年于东华理工大学获硕士学位, 现为博士研究生, 研究领域为核电子学与核辐射探测技术

通信作者: 周建斌, E-mail: zjb@cdut.edu.cn

收稿日期: 2023-06-19, 修回日期: 2023-07-26

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11975060), Key Research and Development Project of Jiangxi Province (No. 20203BBE53030)

First author: WANG Huaiping, male, born in 1974, graduated from East China University of Technology with a master's degree in 2009, doctoral student, focusing on nuclear electronics and nuclear detection technology

Corresponding author: ZHOU Jianbin, E-mail: zjb@cdut.edu.cn

Received date: 2023-06-19, revised date: 2023-07-26

when used in a single stage. **[Purpose]** This study aims to explore the convolutional quasi-Gaussian pulse shaping filter algorithm and apply it to the processing of X-ray fluorescence measurement system experimental platform to obtain measured nuclear pulse data. **[Methods]** Firstly, a convolutional quasi-Gaussian pulse shaping algorithm was implemented based on trapezoidal pulse signals, and bipolar pulse shaping was achieved after the initial convolution. Then, the second convolution was accumulated and summed to obtain left and right symmetric quasi-Gaussian shaping pulses. The digital recursive formula of the quasi-Gaussian pulse shaping algorithm was obtained using the Z-transform method, and the effectiveness of the algorithm and the influence of shaping parameters on the amplitude frequency characteristics were studied through simulation. Finally, quasi-gaussian shaping algorithm and trapezoidal shaping algorithm were applied separately to the offline process of measured nuclear pulse data from the X-ray fluorescence measurement system experimental platform. **[Results]** The quasi-Gaussian pulse shaping filter has better high-frequency noise suppression performance compared to trapezoidal pulse shaping filters. With the increase of the values of shaping parameters n_a and n_c , the filter passband decreases whilst the low-frequency amplitude relatively increases, and the high-frequency noise suppression effect is enhanced. However, this also leads to shaping pulse broadening and increases the probability of pulse pile-up. **[Conclusions]** The experimental results demonstrate that the quasi-Gaussian pulse shaping algorithm has better pile-up pulse separation ability. Under identical X-ray tube voltage and current conditions and peaking time, the energy resolution of the energy spectra obtained by both algorithms is fundamentally equivalent. However, the energy spectrum with quasi-Gaussian pulse shaping has a higher characteristic peak area.

Key words Digital pulse processing, Quasi-Gaussian pulse shaping, Trapezoidal pulse shaping, Energy resolution

随着高性能模数转换 (Analog to Digital Converter, ADC) 芯片和可编程硬件逻辑器件的快速发展及应用, 辐射探测与能谱测量中数字核脉冲实时处理方法研究取得显著进展。成形滤波器是用于处理探测器-前置放大器系统输出核脉冲信号的核电子学模块, 它通过将输入的核脉冲信号成形为某种特殊形状 (如类高斯、梯形等) 脉冲, 达到抑制电子学噪声干扰、消除弹道亏损以及减少脉冲堆积等目的, 从而提高辐射探测系统的能量分辨率或脉冲计数率^[1]。相较于传统模拟成形滤波电路, 数字核脉冲信号处理具有算法设计灵活、参数调节方便、精度高、稳定性好等特点, 当辐射探测系统采用高速 ADC 芯片获取数字化核脉冲信号时, 采用高性能可编程硬件逻辑器件 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 实现数字脉冲处理算法, 可以满足核脉冲或者核数据的实时处理需要^[2]。因此, 处理核脉冲的数字成形滤波算法既要考虑系统功能需求, 也应考虑算法结构是否易于可编程硬件逻辑器件实现。Jordanov 等^[3-4]利用卷积方法得到快速数字合成梯形 (三角形) 成形递推算法以及 cusp-like 成形算法, 算法结构简单、参数容易调整、适于实时处理。Imperiale 等^[5]通过对成形滤波器传递函数进行 Z 变换分别得到阶跃脉冲、单指数以及双指数脉冲信号梯形成形数字递推公式。Wang 等^[6]在分析传统模拟极零相消电路功能基础上, 构建具有等效功能的数字极零相消模型, 并设计出两种梯形 (三角形) 成

形滤波算法, 既能满足辐射测量系统极零相消需要, 又能实现核脉冲信号成形滤波功能。Nakhostin^[7]基于模拟 CR-(RC)ⁿ 准高斯滤波器传递函数的 Z 变换推导出 1~4 阶 CR-(RC)ⁿ 数字递推算法, 相较于梯形成形滤波器该算法在抑制并行噪声方面性能更优。Song 等^[8]对模拟 Sallen-Key 滤波器进行分析, 建立了该电路的全参数 (Kirchhoff's Current Law) KCL 方程, 并通过对所得电路微分方程求解, 推导出一种最优准高斯脉冲成形算法, 该算法所需参数容易计算, 成形脉冲没有反冲。此外, Zhao 等^[9]还研究了 Sine 成形滤波算法。陈世国^[10]通过分析计算三角形、梯形和高斯脉冲成形方法的性能参数, 得出三角形成形噪声抑制性能最好, 梯形成形弹道亏损抑制性能最好, 而高斯成形综合性能最好。

由于高斯信号的对称性和完备性, 高斯滤波方法在核信号及核数据的分析与处理中被大量使用, 然而, 高斯函数的复杂性使得构造真高斯成形数字递推算法相对困难^[11]。因此, 数字高斯成形算法常采用对模拟高斯成形滤波电路 (如 Sallen-Key、CR-(RC)ⁿ) 建立的微分方程数值模型推导而得到, 电路等效模型局限和元器件参数约束等导致成形脉冲并不具备对称性, Sallen-Key 数字高斯成形后脉冲存在比较严重的拖尾, 单级使用时还会出现反冲等问题^[12-13]。本文提出一种类高斯成形数字卷积实现方法, 它以梯形脉冲信号为基础, 通过第一次卷积运算实现双极性脉冲成形, 再次卷积进行累积求和从而

得到左右对称的类高斯成形脉冲,采用Z变换方法推导出该类高斯成形算法的数字递推公式,利用MATLAB仿真模拟验证了算法的有效性和可靠性,并对其幅频特性进行了详细分析,最后将该算法应用于搭建的X射线荧光测量系统实验平台,进一步验证了算法的主要性能。该类高斯成形算法结构简单,易于可编程硬件逻辑器件实现。

1 卷积型类高斯成形滤波器实现原理

首先,构造如下单位冲激响应传递函数 $h_1(t)$,以实现脉冲信号的双极性变换:

$$h_1(t) = \delta(t) - \delta(t - t_c) \quad (1)$$

式中: $\delta(t)$ 为单位冲激函数; t_c 为脉冲信号截断宽度。

辐射探测器-前置放大器系统的输出信号通常为具有快速上升沿和缓慢下降沿的双指数衰减脉冲信号,其理想化的数学模型可采用式(2)进行描述:

$$x(t) = A \cdot (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \cdot u(t) \quad (2)$$

式中: A 为双指数衰减信号的幅值; τ_1 和 τ_2 为双指数衰减信号的两个时间常数; $u(t)$ 为单位阶跃函数。当满足 $\tau_1 \gg \tau_2$ 条件时,该模型可进一步简化为单指数衰减信号模型,即:

$$x(t) = A \cdot e^{-t/\tau} \cdot u(t) \quad (3)$$

以式(3)所描述的单指数衰减脉冲作为输入信号,经式(1)所描述的系统处理后,可得到双极性变换输出信号 $y_1(t)$,即:

$$y_1(t) = x(t) * h_1(t) = x(t) - x(t - t_c) \quad (4)$$

式(4)所描述的单指数衰减脉冲卷积双极性成形仿真模拟如图1所示。

其次,信号的积分运算,可采用信号与单位阶跃函数的卷积来实现^[4],其方法如下:

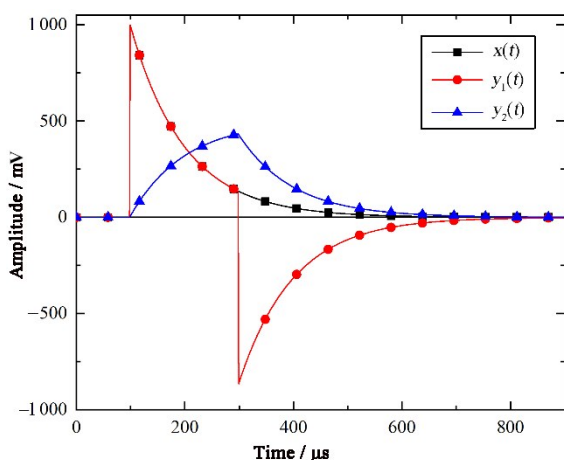


图1 单指数衰减脉冲信号卷积双极性成形仿真模拟
Fig.1 Convolutional bipolar pulse shaping simulation for uni-exponential decay pulse signal

$$h_2(t) = u(t) \quad (5)$$

$$y_2(t) = k \cdot y_1(t) * h_2(t) = k \cdot \int_{-\infty}^t y_1(\tau) d\tau \quad (6)$$

式中:参数 k 为比例系数。选取 $k=1/t_c$,式(6)所描述的系统输出信号 $y_2(t)$ 的仿真模拟如图1所示。当输入信号 $x(t)$ 为具有左右对称的梯形脉冲时,合理设置参数 t_c 取值,经式(1)所描述的系统处理后得到具有对称零面积的双极性梯形脉冲信号输出 $y_1(t)$,然后利用式(6)所描述的系统对 $y_1(t)$ 进行卷积运算(即累加求和),可成形输出为左右对称的准高斯脉冲信号 $y_2(t)$ 。

2 卷积型类高斯成形数字递推算法

基于梯形脉冲变换的数字类高斯成形算法实现原理如图2所示。首先,辐射探测器-前置放大器系统输出的核脉冲信号经由高速ADC实现快速采样及数字化处理后得到核脉冲序列 $V_i(n)$;其次,核脉冲序列 $V_i(n)$ 与数字系统 $h_1(n)$ 卷积成形为梯形脉冲序列 $V_{o1}(n)$;然后,梯形脉冲序列 $V_{o1}(n)$ 经过数字系统 $h_2(n)$ 处理后成形为具有对称零面积的双极性脉冲序列 $V_{o2}(n)$;最后是脉冲序列 $V_{o2}(n)$ 与数字系统 $h_2(n)$ 卷积实现累加求和,输出信号 $V_o(n)$ 为具有左右对称的类高斯成形脉冲序列。

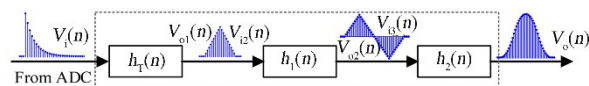


图2 卷积型类高斯成形数字递推算法实现原理框图
Fig.2 Digital recursive algorithm implementation principle block diagram for convolutional quasi-Gaussian pulse shaping filter

图2所描述类高斯成形数字递推算法推导如下。输入核脉冲信号采用理想的单指数衰减函数表示:

$$V_i(t) = V_{\max} \cdot e^{-t/\tau} \cdot u(t) \quad (7)$$

式中: V_{\max} 为核脉冲幅度; τ 为衰减时间常数。经高速ADC数字化处理得到其脉冲序列 $V_i(n)$,即:

$$V_i(n) = V_{\max} \cdot e^{-n \cdot T_s/\tau} \cdot u(n) \quad (8)$$

式中: T_s 为ADC采样周期。式(7)的Z变换表达式如下:

$$V_i(z) = V_{\max} \cdot \frac{1}{1 - d \cdot z^{-1}} \quad (9)$$

其中: $d = e^{-T_s/\tau}$ 。

在连续时域内,如图3所示梯形脉冲信号的数学函数表达式可写为^[5]:

$$V_1(t) = \frac{V_{\max}}{t_a} \cdot t \cdot u(t) \quad (10)$$

$$V_2(t) = -V_1(t - t_a) \quad (11)$$

$$V_3(t) = -V_1(t - t_b) \quad (12)$$

$$V_4(t) = V_1(t - t_c) \quad (13)$$

$$V_{i2}(t) = \sum_{k=1}^4 V_k(t) \quad (14)$$

式(14)所描述的梯形脉冲信号类高斯成形过程可表示为:

$$V_o(t) = V_{i2}(t) * h_1(t) * h_2(t) = \int_{-\infty}^t [V_{i2}(\tau) - V_{i2}(\tau - t_c)] d\tau \quad (15)$$

式(15)离散化后进行Z变换得:

$$V_o(z) = \frac{V_{\max} \cdot z^{-1} \cdot (1 + z^{-1}) \cdot (1 - z^{-n_a}) \cdot (1 - z^{-n_b}) \cdot (1 - z^{-n_c})}{2 \cdot n_a \cdot (1 - z^{-1})^3} \quad (16)$$

式中: $n_a = t_a/T_s$, $n_b = t_b/T_s$, $n_c = t_c/T_s$, V_{\max} 为梯形脉冲幅度。

$$H_G(z) = \frac{V_o(z)}{V_i(z)} = \frac{(1 - d \cdot z^{-1}) \cdot z^{-1} \cdot (1 + z^{-1}) \cdot (1 - z^{-n_a}) \cdot (1 - z^{-n_b}) \cdot (1 - z^{-n_c})}{2 \cdot n_a \cdot (1 - z^{-1})^3} \quad (17)$$

为了降低系统设计的复杂度,因此选择级联结构来实现,式(17)可表示为:

$$H_G(z) = H_1(z) \cdot H_2(z) \cdot H_3(z) \cdot H_4(z) \cdot H_5(z) \cdot H_6(z) \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} H_1(z) = 1 - z^{-n_c} \\ H_2(z) = \frac{z^{-1}}{2 \cdot n_a (1 - z^{-1})} \\ H_3(z) = \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \\ H_4(z) = \frac{1 - d \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \\ H_5(z) = 1 - z^{-n_b} \\ H_6(z) = 1 - z^{-n_a} \end{cases} \quad (19)$$

$H_1(z)$ 、 $H_5(z)$ 及 $H_6(z)$ 相当于微分运算, $H_2(z)$ 、

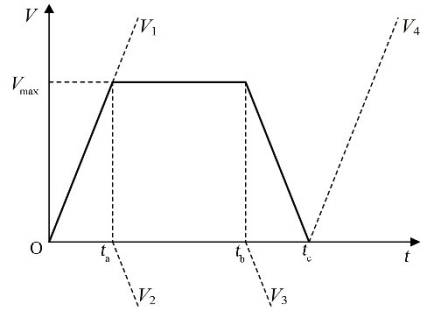


图3 梯形脉冲信号
Fig.3 Trapezoidal pulse signal

当输入信号 $V_i(t)$ 为式(7)表示的单指数衰减脉冲时,数字类高斯成形系统传递函数的Z变换表达式如下:

$H_3(z)$ 及 $H_4(z)$ 相当于积分运算。对于线性移不变系统,交换子系统的级联顺序并不会影响最终的输出,因此将微分 H_1 放在第一级可防止溢出,微分 H_6 放在最后一级有利于减小误差^[15-16]。

对式(19)进行逆Z变换,可得到单指数衰减脉冲信号成形为类高斯脉冲信号的数字递推公式如下:

$$\begin{cases} V_1(n) = V_i(n) - V_i(n - n_c) \\ V_2(n) = V_2(n - 1) + \frac{1}{2 \cdot n_a} V_1(n - 1) \\ V_3(n) = V_3(n - 1) + V_2(n) + V_2(n - 1) \\ V_4(n) = V_4(n - 1) + V_3(n) - d \cdot V_3(n - 1) \\ V_5(n) = V_4(n) - V_4(n - n_b) \\ V_o(n) = V_5(n) - V_5(n - n_a) \end{cases} \quad (20)$$

该卷积型数字类高斯成形滤波器的实现逻辑框

图如图4所示。

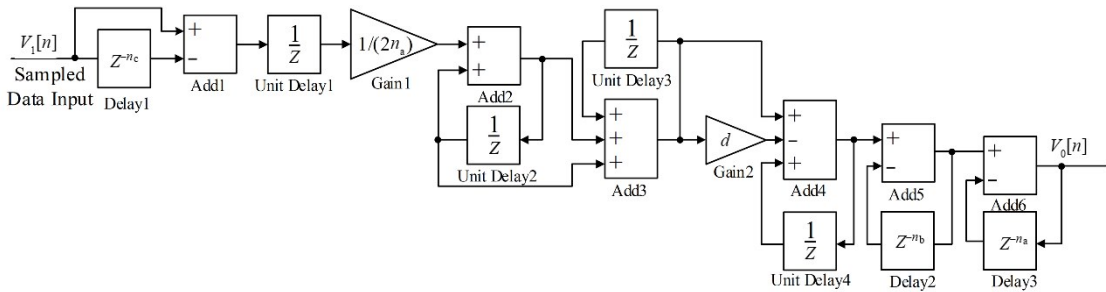


图4 卷积型数字类高斯成形滤波器逻辑框图

Fig.4 Logical block diagram for convolutional digital quasi-Gaussian pulse shaping filter

利用MATLAB仿真模拟来验证该算法的有效性和可靠性。设置输入信号为单指数衰减脉冲,即

$V_i(t) = V_{\max} \cdot \exp(-t/\tau) \cdot u(t)$, 其中 $V_{\max} = 1\ 000\ \text{mV}$ 、 $\tau = 3.2\ \mu\text{s}$ 、 $T_s = 50\ \text{ns}$, 分别利用该类高斯成形算法和梯形

成形算法进行数字核脉冲处理,选择相同成形时间(即达峰时间):类高斯成形算法的成形参数设置为 $n_a=16$ 、 $n_b=16$ 、 $n_c=32$,成形后输出类高斯脉冲宽度为64个点;梯形成形算法成形参数设置为 $n_a=20$ 、 $n_b=44$,成形后输出梯形脉冲宽度也同为64个点,其成形仿真模拟如图5所示,图中黑色实线为输入单指数衰减脉冲、蓝色实线为梯形成形脉冲、红色实线为类高斯成形脉冲。仿真模拟研究发现:式(20)数字递推算法如果运算顺序安排不当,将会导致输出信号发散溢出,因此需将微分运算放在第一级;梯形成形算法参数设置要求 $n_c=n_a+n_b$,且 $n_b \geq n_a$;该类高斯成形算法是以梯形脉冲为基础的,成形参数设置要求 $n_c \geq n_a+n_b$,且 $n_b \geq n_a$,当 $n_c=n_a+n_b$ 时,类高斯成形脉冲没有平顶,而当 $n_c > n_a+n_b$ 时,梯形脉冲经过第一次卷积成形得到的双极性脉冲,在正负极性两个脉冲中间会输出一个零幅值间隙(gap),其输出为有平顶的类高斯脉冲信号。另外,式(20)成形输出类高斯脉冲信号的幅度除以成形参数 n_b 可得到与输入信号的幅度严格相等。

图5的仿真模拟还给出了在相同成形脉冲宽度条件下两种成形算法对堆积脉冲的分离能力。堆积脉冲①两个脉冲的峰间距 t_b 大于或等于成形脉冲宽度 t_w (即 $t_b \geq t_w$),梯形成形或者类高斯成形后可以得到两个完全独立成形脉冲,并能恢复堆积脉冲的初始幅度;堆积脉冲②为两个脉冲峰间距 $t_w/2 < t_b < t_w$,类高斯成形算法在接近 $t_w/2$ 时依然具有较好的堆积脉冲分离能力,且能恢复堆积脉冲初始幅度,而梯形

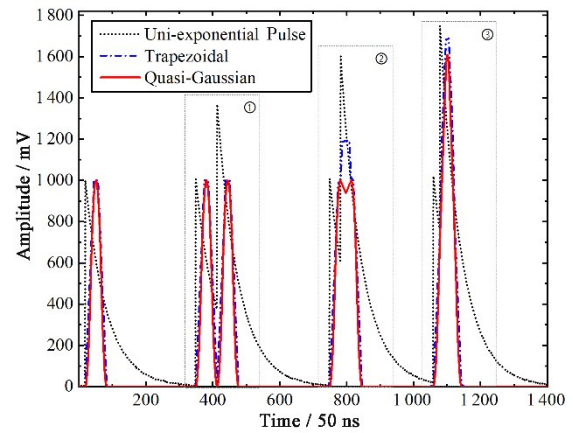


图5 脉冲成形宽度相同时类高斯成形算法与梯形成形算法仿真模拟

Fig.5 Quasi-Gaussian and trapezoidal pulse shaping algorithms simulation with identical shaping pulse width

成形算法已无法实现堆积脉冲分离;堆积脉冲③为两个脉冲峰间距 $t_b \leq t_w/2$,此时类高斯成形算法和梯形成形算法均已无法实现堆积脉冲分离,输出为大于成形脉冲宽度的畸形脉冲。

3 卷积型类高斯成形滤波器的幅频特性

类高斯成形算法在设计时注重于脉冲信号的时域特征,但对信号成形处理从频域来看还起到了滤波作用^[17-18],根据类高斯成形滤波器和梯形成形滤波器的传递函数,设置与图5相同的成形参数,两者幅频特性对比如图6(a)所示,类高斯成形滤波器具有更快的阻带衰减速度。

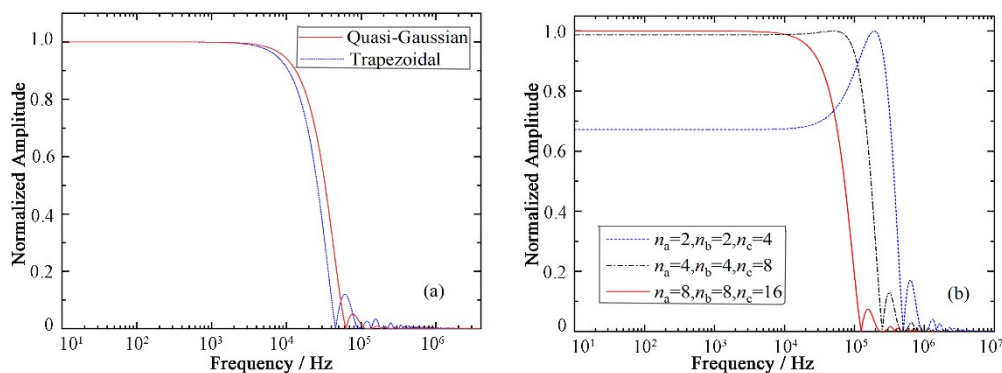


图6 类高斯成形算法的幅频特性

(a) 达峰时间相同时类高斯成形与梯形成形的幅频特性对比,(b) 不同成形参数类高斯成形的幅频特性

Fig.6 Amplitude-frequency characteristics of quasi-Gaussian pulse shaping algorithm (a) Amplitude-frequency characteristics comparison between quasi-Gaussian and trapezoidal pulse shaping algorithms with identical peaking times, (b) Amplitude-frequency characteristics of quasi-Gaussian pulse shaping algorithms with different shaping parameters

成形参数取值不同时类高斯成形滤波器幅频特性如图6(b)所示, n_a 取值增大时,通频带减小,低频成分幅度相对增加,高频噪声抑制作用增强; n_c 取值

如果大于 n_a 和 n_b 之和,输出为有平顶的类高斯脉冲,从幅频特性来看, n_c 取值增大,通频带减小,低频成分幅度相对增加,但也增加了高频阻带振荡衰减时

间。值得注意的是成形参数 n_a 和 n_c 取值增大时,将导致类高斯脉冲变宽,增加了脉冲堆积概率。

4 实验应用及测试

实验选用科颐维 KYW2000A 型 X 光管(额定管压和额定管流分别为 50 kV、1 mA,风冷制冷方式)和 Ag 靶搭建的 X 射线荧光测量系统,设置 X 光管管压和管流分别为 18.8 kV、78.4 μ A, X 光管出射的 X 射线经过 12.5 μ m 的 Be 窗滤片后照射标准 Mn 样品,辐射探测器选用 Amptek 的 Fast SDD 探测器(型号为 XR-100SDD),数据获取采用自制 20 MSPS 14 bit ADC 数据采集板。利用 MATLAB 对获取到的核脉冲数据进行离线处理,实测核脉冲信号类高斯成形(成形参数设置 $n_a=16$ 、 $n_b=16$ 、 $n_c=32$,成形脉冲宽度为 3.2 μ s)、梯形成形(成形参数设置 $n_a=20$ 、 $n_b=44$,成形脉冲宽度为 3.2 μ s),结果如图 7 所示。由图 7 可见,成形得到的独立类高斯脉冲信号具有非常好的左右对称性;在相同达峰时间条件下,类高斯成形算法具有更好的堆积脉冲分离与初始幅度恢复能力。

在上述实验条件下,设置 600 s 测量时间,探测器输出脉冲的计数率为 20.39 $k \cdot s^{-1}$,所获取的原始脉冲数据经 MATLAB 离线处理后,原始脉冲幅度谱、原始脉冲采用梯形成形算法以及类高斯成形算法处理后得到的能谱如图 8 所示,其能量分辨率半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)分别为

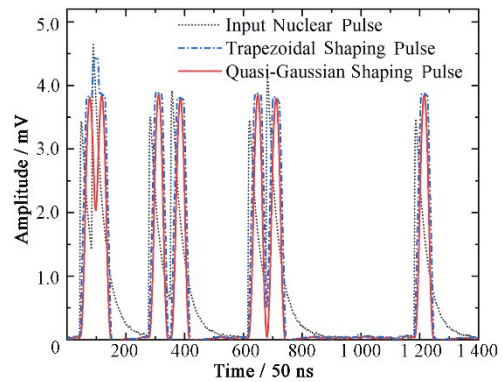


图 7 实测核脉冲信号及其类高斯、梯形成形
Fig.7 Measured nuclear pulse signal and quasi-Gaussian and trapezoidal pulse shaping

184 eV@5.89 keV、132 eV@5.89 keV 和 130 eV@5.89 keV,导致能量分辨率差异的主要原因是:原始脉冲幅度谱在获取脉冲幅度时没有消除弹道亏损以及进行脉冲堆积判弃,因此造成特征峰(5.89 keV)处的脉冲幅度统计涨落增大,而且堆积脉冲导致本底增加,其能量分辨率较差;梯形成形和类高斯成形都具有恢复脉冲幅值的能力,在一定条件下还可实现脉冲堆积的分离,所以它们的能量分辨率要优于原始脉冲幅度谱,两者能量分辨率相当,相较而言,类高斯成形所获能谱的特征峰具有更高的峰面积和总计数,其原因在于类高斯成形具有更好的脉冲堆积分离能力。

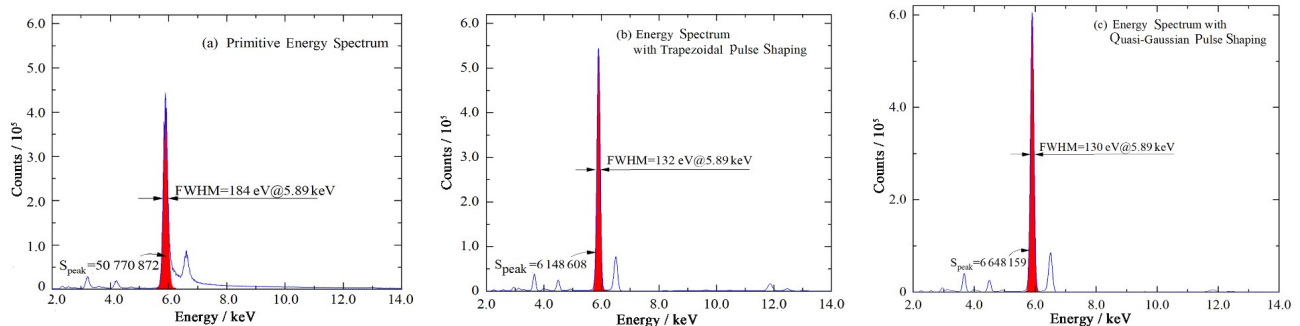


图 8 标准 Mn 样品 X 荧光分析实验所得原始脉冲幅度谱(a)、梯形成形(b)及类高斯成形(c)处理能谱
Fig.8 Primitive energy spectrum (a), energy spectrum with trapezoidal pulse shaping (b) and quasi-Gaussian pulse shaping (c) from X-ray fluorescence analysis experiments of standard Mn sample

设置 X 射线光管管压和管流分别为 18.8 kV、78.4 μ A,获取的原始脉冲离线数据采用梯形成形和类高斯成形处理后所得能谱 5.89 keV 特征峰能量分辨率(FWHM)与达峰时间关系如图 9(a)所示,随着达峰时间增大,两种成形算法所得能谱的能量分辨率先提高后损失,达峰时间为 6.4 μ s 时,获得最佳能量分辨率。

设置 X 射线光管管压为 18.8 kV,达峰时间为

3.2 μ s,测量时间为 20 s,采用梯形成形和类高斯成形处理后所得能谱 5.89 keV 特征峰能量分辨率与 X 射线光管管流的关系如图 9(b)所示。在给定的 X 射线荧光分析测量系统条件下,设置相同的 X 射线光管管压,可认为 X 射线光管电流与探测器的脉冲计数率之间存在正相关性。因此,图 9(b)也可看作能量分辨率与探测器入射计数率之间的关系。可见,随着 X 射线光管电流的增大(探测器对应入射计

数率增大),将导致两者能量分辨率相应变差,其原因主要是X射线光管电流增大引起核脉冲信号堆积

概率提高。

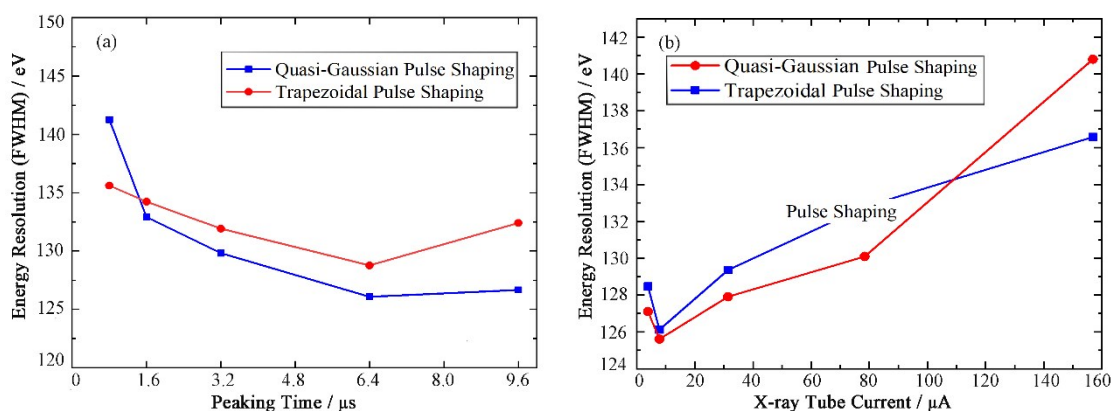


图9 能量分辨率与达峰时间的关系(a)和能量分辨率与X射线光管电流的关系(b)
Fig.9 Relationship between energy resolution and peaking time (a) and the relationship between energy resolution and X-ray tube current (b)

5 结语

本文提出一种卷积型类高斯滤波成形算法,它以梯形脉冲信号为基础,通过第一次卷积实现双极性脉冲成形,再次卷积累加求和得到左右对称类高斯脉冲信号输出,利用Z变换方法推导了该算法的数字递推公式,算法模型易于可编程硬件逻辑器件实现,适用于辐射测量实时核脉冲信号处理。采用MATLAB仿真模拟验证了该算法的有效性和可靠性,并研究了该类高斯成形滤波器的幅频特性:

1)在相同达峰时间条件下,该类高斯成形算法比梯形成形算法具有更快的阻带衰减速度;

2)类高斯成形算法参数取值要求 $n_b \geq n_a$ 且 $n_c \geq n_a + n_b$,当 $n_c = n_a + n_b$ 时,输出为无平顶的类高斯脉冲,当 $n_c > n_a + n_b$ 时,输出为有平顶的类高斯脉冲,参数 n_a 和 n_c 增大时,通频带变小,低频成分幅度相对增加,成形脉冲变宽,增加了脉冲堆积概率。分别将该类高斯成形算法和梯形成形算法应用于X射线荧光分析测量实验,对获取到的核脉冲信号进行离线处理,进一步验证了算法的有效性和堆积脉冲分离能力,该类高斯成形算法输出类高斯脉冲信号具有很好的左右对称性而且无下冲现象,达峰时间相同时,比梯形成形算法具有更好的堆积脉冲分离能力;

3)在给定的X射线光管管压和管流实验条件下,原始核脉冲信号存在较严重脉冲堆积,设置相同达峰时间,梯形成形和类高斯成形处理后所得能谱能量分辨率相当,但后者具有更高的峰面积和总计数;

4)X射线光管管压和管流一定时,两种成形算法所得能谱的能量分辨率均呈现先提高后损失

趋势;

5)X射线光管管压和达峰时间一定时,两种成形算法所得能谱的能量分辨率随着X射线光管电流增大(对应探测器入射计数率)而相应变差。

作者贡献声明 王怀平、周建斌负责文章初稿写作、算法设计及有效性实验验证;周建斌负责文章的审阅与修订;虞先国负责文章的审阅与修订;王明负责测量系统实验平台的搭建、实验测试、实验数据的收集和整理;汪雪元参与实验应用及测试工作的讨论,提出建议;冯林主要负责文章的公式校对和辅助编辑工作。

参考文献

- Knoll G F. Radiation detection and measurement[M]. 4th Ed. John Wiley & Sons, 2010: 625 - 647.
- Simões J B, Correia C M B A. Pulse processing architectures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, **422**(1 - 3): 405 - 410. DOI: [10.1016/S0168-9002\(98\)00992-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00992-9).
- Jordanov V T, Knoll G F. Digital synthesis of pulse shapes in real time for high resolution radiation spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1994, **345**(2): 337 - 345. DOI: [10.1016/0168-9002\(94\)91011-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91011-1).
- Jordanov V T, Knoll G F, Huber A C, *et al.* Digital techniques for real-time pulse shaping in radiation

- measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1994, **353**(1 - 3): 261 - 264. DOI: [10.1016/0168-9002\(94\)91652-7](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91652-7).
- 5 Imperiale C, Imperiale A. On nuclear spectrometry pulses digital shaping and processing[J]. Measurement, 2001, **30**(1): 49 - 73. DOI: [10.1016/S0263-2241\(00\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(00)00057-9).
- 6 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).
- 7 Nakhostin M. Recursive algorithms for real-time digital CR-(RC)ⁿ pulse shaping[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, **58**(5): 2378 - 2381. DOI: [10.1109/TNS.2011.2164556](https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2164556).
- 8 Song W G, Zhang L J, Wang G Y, *et al.* Optimized digital Sallen-Key shaping algorithm for radiation detector signal processing[J]. Nuclear Technology, 2021, **207**(2): 292 - 298. DOI: [10.1080/00295450.2020.1747838](https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1747838).
- 9 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).
- 10 陈世国. 数字核仪器系统中高斯成形滤波的设计与实现[D]. 成都: 四川大学, 2005.
CHEN Shiguo. Design and implementation of Gaussian shaping filter in digital nuclear instrument system[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- 11 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).
- 12 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): 151. DOI: [10.1007/s41365-019-0679-y](https://doi.org/10.1007/s41365-019-0679-y).
- 13 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](https://doi.org/10.1007/s41365-019-0638-7).
- 14 Jordanov V T. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing. Part 1: unfolding[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, **805**: 63 - 71. DOI: [10.1016/j.nima.2015.07.040](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.040).
- 15 黄宇雁, 宫辉, 李荐民. 高计数率下的实时梯形成形算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, **57**(5): 521 - 524. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.22.031](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.22.031).
HUANG Yuyan, GONG Hui, LI Jianmin. Real time trapezoidal shaping algorithm at high count rates[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, **57**(5): 521 - 524. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.22.031](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.22.031).
- 16 周建斌, 周伟, 王敏. 核信号数字分析与处理[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2017.
ZHOU Jianbin, ZHOU Wei, WANG Min. Digital analysis and processing of nuclear signal[M]. Beijing: Nuclear Energy Publication of China, 2017.
- 17 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070402).
- 18 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).