

基于小波变换的双指数信号高斯脉冲成形 算法研究

杨小艳 洪旭 周建斌 廖光辉 曹彧 严大顺
(成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要 高斯脉冲具有信噪比高、弹道亏损小的优点,因此,在核辐射测量系统中常将核辐射探测器输出信号成形为高斯波形。核辐射探测器实际输出的核脉冲信号更接近于双指数信号,因此在小波变换的基础上,利用卷积运算的微分特性,提出了双指数信号高斯脉冲成形算法,并建立了成形系统的冲激响应。采用模拟核脉冲信号,从时域和频域两方面研究了成形参数对成形脉冲形状、滤波特性的影响规律;采用FAST硅漂移探测器(Silicon Drift Detector, SDD)测量标准Mn样品获得实测核脉冲信号,分别进行高斯脉冲成形算法和梯形脉冲成形算法处理,并生成能谱;通过对比5.89 keV特征峰峰面积、能量分辨率,研究两种成形算法在能量分辨率和堆积脉冲分离方面的性能。结果表明:当达峰时间为3.2~6.4 μs 时,两种成形算法所得能谱的能量分辨率最佳,此时,两者之差小于5 eV;在相同达峰时间条件下,高斯脉冲成形算法的堆积脉冲分离能力优于梯形脉冲成形算法。

关键词 小波变换, 高斯脉冲成形, 能量分辨率, 堆积脉冲

中图分类号 TL822+.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050403

Gaussian pulse shaping algorithm for dual exponential signals based on wavelet transform

YANG Xiaoyan HONG Xu ZHOU Jianbin LIAO Guanghui CAO Yu YAN Dashun
(College of Nuclear Technology and Automation Engineer, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract [Background] The Gaussian pulse shaping algorithm has the advantages of high signal-to-noise ratio and low ballistic deficit. Therefore, the radiation detector output signal is often shaped to a Gaussian waveform in the actual nuclear radiation measurement system even if the signal is more likely to be a dual exponential signal. [Purpose] This study aims at gaussian pulse shaping algorithm for dual exponential nuclear signals based on wavelet transform. [Methods] Based on the simulated nuclear pulse signal, the influence of the shaping parameters on the pulse shape and the filtering performance of the shaped pulse was investigated. A FAST-SDD detector was used to acquire the X-ray fluorescence signals emitted by a standard manganese sample. The measured nuclear signals were processed by Gaussian pulse shaping and trapezoidal pulse shaping algorithms respectively before generating energy spectrum. The performance of the two shaping algorithms on filtering and pile-up pulse separation were compared by using the full width at half maximum and the area of the 5.89 keV peak. [Results & Conclusion] The comparison

国家自然科学基金(No.12005026, No.11975060, No.12075038)、四川省自然科学基金项目(No.2023NSFSC1318)资助

第一作者: 杨小艳, 女, 1989年出生, 2012年毕业于成都理工大学, 现为硕士研究生, 主要从事信号采集与数字处理研究

通信作者: 洪旭, E-mail: hongxucdut@163.com

收稿日期: 2022-10-28, 修回日期: 2023-01-09

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12005026, No.11975060, No.12075038), Natural Science Foundation of Sichuan Province (No.2023NSFSC1318)

First author: YANG Xiaoyan, female, born in 1989, graduated from Chengdu University of Technology in 2012, master student, engaged in signal acquisition and digital processing research

Corresponding author: HONG Xu, E-mail: hongxucdut@163.com

Received date: 2022-10-28, revised date: 2023-01-09

results show that the best energy resolutions corresponding to Gaussian and trapezoidal pulse shaping algorithms are achieved when the peaking time ranges from 3.2 μs to 6.4 μs , and the difference between two algorithms is less than 5 eV. Besides, the Gaussian pulse shaping algorithm performs better than trapezoidal pulse shaping algorithm on pile-up pulse separation with the same peaking times.

Key words Wavelet transform, Gaussian pulse shaping, Energy resolution, Pile-up pulse

在实际核辐射测量中,探测器输出信号经过前置放大电路和整形电路后,信号具有较快的上升沿和缓慢的下降沿,即具有双指数形式^[1-2]。数字脉冲成形算法是核辐射测量系统数字化的关键。目前,常用的数字脉冲成形算法包括梯形脉冲成形算法和高斯脉冲成形算法。梯形脉冲成形算法在高计数率和能量分辨率上有良好的综合能力^[3-4]。根据最佳滤波器理论,当成形脉冲的峰顶部分比较平坦时,可以减少探测器电荷收集时间变化对能量分辨率产生的影响;当成形脉冲的宽度尽量窄时,可以减少核脉冲信号堆积^[5]。高斯波形类似无限宽尖顶脉冲,脉冲顶部比较平坦,具有信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)高、弹道亏损小的优点,因此,常将探测器输出信号成形为高斯波形^[6-7]。

许多学者以模拟 Sallen-Key 滤波器为基础,开展数字高斯脉冲成形算法研究。周建斌等^[8-9]采用数值微分方法建立 Sallen-Key 滤波器的数学模型,实现核脉冲信号数字类高斯成形;在此基础上,洪旭等^[10-11]引入了截止频率和品质因子两个参数,提出了双参数类高斯脉冲成形算法,采用模拟核脉冲信号,证明在相同达峰时间条件下类高斯脉冲成形算法较梯形脉冲成形算法具有更好噪声抑制能力,但成形脉冲宽度较梯形脉冲大。葛青等^[12]利用 z 变换方法建立了数字 Sallen-Key 滤波器的冲激响应,再通过卷积运算将双指数信号成形为类高斯信号,进而提出基于双线性变换法的高斯脉冲成形算法。此外,张怀强等^[13-14]以 Si-PIN 探测器和碘化钠探测器实测核脉冲信号研究了类高斯脉冲成形算法的最优成形参数和频率特性,证明在相同达峰时间条件下类高斯脉冲成形算法较梯形脉冲成形算法和三角脉冲成形算法具有更好的能量分辨率。

在模拟核电子学中,CR-(RC)ⁿ滤波器也能够将核脉冲信号成形为类高斯波形。Nakhostin 采用 z 变换方法,建立了 CR-(RC)ⁿ滤波器的递推模型,证明在相同达峰时间条件下 CR-(RC)ⁿ滤波器对并行噪声的抑制能力较梯形脉冲成形算法强^[15]。刘寅宇等^[16-17]在 CR 电路和 RC 电路的数学模型基础上,提出了数字 CR-(RC)ⁿ滤波器,并以 PZC (Pole-zero Cancellation) 滤波器代替 CR 滤波器,建立了数字 CR_{PZC}-RCⁿ滤波器,解决了类高斯脉冲成形后输出信

号存在的下冲问题。同时,洪旭等^[18]提出在 CR-(RC)ⁿ滤波器级联($n+1$)级 PZC 滤波器的方法,解决了类高斯脉冲成形后输出信号存在的拖尾问题。

基于 Sallen-Key 滤波器和 CR-(RC)ⁿ滤波器可实现核脉冲信号类高斯脉冲成形,当 CR-(RC)ⁿ滤波器中 RC 滤波器的级数和 Sallen-Key 滤波器的级数增加时,成形脉冲趋于高斯波形。陈世国等^[19-20]采用小波变换方法,以高斯函数的一阶导数作为小波函数,通过尺度参数推导出小波基函数和尺度基函数,分别与输入信号进行卷积,再对卷积结果进行线性组合,最终实现指数衰减信号高斯脉冲成形。同理,覃章健等^[21]以墨西哥草帽小波信号的一阶导数作为小波函数,将指数衰减信号成形为类似于双极性的高斯信号。此外,Kantor 等^[22-23]提出一种基于傅里叶变换的高斯脉冲成形滤波器,利用成形脉冲宽度有效分辨高计数率下的严重脉冲堆积事件,并对成形脉冲的噪声抑制能力、死时间以及振幅有无偏置进行了分析。

本文将核辐射探测器输出的核脉冲信号等效为双指数信号,以小波变换为基础,利用卷积运算的微分特性,提出了双指数信号高斯脉冲成形算法。

1 高斯脉冲成形原理

高斯函数具有时频局部性和带通性,其各阶导数都是理想的小波函数^[19]。高斯函数的表达式可写为:

$$g(t) = Ae^{-\frac{(t-t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中: A 为高斯函数的幅值; t_{peak} 为高斯函数最大幅值对应时刻; σ 与高斯函数的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)有关,即 $\text{FWHM}=2.35\sigma$ 。

设 $\psi(t) = g'(t)$, $\phi(t) = g''(t)$, 即:

$$\begin{cases} \psi(t) = g'(t) = -\frac{A(t-t_{\text{peak}})}{\sigma^2} e^{-\frac{(t-t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2}} \\ \phi(t) = g''(t) = \left[\frac{A(t-t_{\text{peak}})^2}{\sigma^4} - \frac{A}{\sigma^2} \right] e^{-\frac{(t-t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2}} \end{cases} \quad (2)$$

$\phi(t)$ 的傅里叶变换为:

$$\Phi(\omega) = -\sqrt{2\pi} A\sigma\omega^2 e^{-\left(j\omega t_{\text{peak}} + \frac{\sigma^2\omega^2}{2}\right)} \quad (3)$$

因为：

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Phi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega = \frac{2\pi A^2}{\sigma^2} < \infty \quad (4)$$

所以， $\Phi(\omega)$ 满足小波函数的可容许性条件，则 $\phi(t)$ 可以作为小波母函数。 $\phi(t)$ 的小波基函数为：

$$\phi_s(t) = \frac{1}{s} \phi\left(\frac{t}{s}\right) = \left[\frac{A(t-t_{\text{peak}})^2}{\sigma^4 s^3} - \frac{A}{\sigma^2 s} \right] e^{-\frac{(t-t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2 s^2}} \quad (5)$$

式中： s 为小波变换的尺度因子。

同理， $g_s(t)$ 的小波基函数可写为：

$$g_s(t) = \frac{1}{s} g\left(\frac{t}{s}\right) = \frac{A}{s} e^{-\frac{(t-t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2 s^2}} \quad (6)$$

通过式(6)的一阶导数和二阶导数可写为：

$$\begin{cases} g'_s(t) = -\frac{A(t-t_{\text{peak}})}{\sigma^2 s^3} e^{-\frac{(t-t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2 s^2}} \\ g''_s(t) = \left[\frac{A(t-t_{\text{peak}})^2}{\sigma^4 s^5} - \frac{A}{\sigma^2 s^3} \right] e^{-\frac{(t-t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2 s^2}} \end{cases} \quad (7)$$

由式(5)和式(7)可以得到式(8)：

$$\phi_s(t) = s^2 g''_s(t) \quad (8)$$

设前置放大电路输出的信号为理想的双指数信号，如式(9)所示。

$$f(t) = B(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2})u(t) \quad (9)$$

式中： B 为双指数信号的幅值； τ_1 为双指数信号的下降时间； τ_2 为双指数信号的上升时间。

通过式(9)可以求得 $f(t)$ 的一阶导数和二阶导数，结果如式(10)所示。

$$\begin{cases} f'(t) = B\left(-\frac{1}{\tau_1}e^{-t/\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}e^{-t/\tau_2}\right)u(t) \\ f''(t) = B\left[\frac{1}{\tau_1^2}e^{-t/\tau_1} - \frac{1}{\tau_2^2}e^{-t/\tau_2} + \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1}\right)\delta(t)\right] \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可得到式(11)：

$$f''(t) = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \left[-(\tau_1 + \tau_2)f'(t) - f(t) + B(\tau_1 - \tau_2)\delta(t) \right] \quad (11)$$

$f(t)$ 的小波变换为：

$$\begin{aligned} & f(t) \times \phi_s(t) \\ &= f(t) \times s^2 g''_s(t) = f''(t) \times s^2 g_s(t) \\ &= \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \left[-(\tau_1 + \tau_2)f'(t) - \right. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left. f(t) + B(\tau_1 - \tau_2)\delta(t) \right] \times s^2 g_s(t)$$

其中： $\delta(t)$ 为单位冲激函数。

由式(12)可以得到：

$$g_s(t) = \frac{1}{B(\tau_1 - \tau_2)} \left[\tau_1 \tau_2 f''(t) \times g_s(t) + (\tau_1 + \tau_2)f'(t) \times g_s(t) + f(t) \times g_s(t) \right] \quad (13)$$

由式(13)可以看出，双指数信号及其一阶导数和二阶导数与高斯函数卷积的线性组合即可得到高斯输出。

根据式(9)模拟双指数信号作为输入，并叠加白噪声，使得SNR=50 dB, 60 dB, 70 dB。其中， $B=1$ ， $\tau_1=60T_s$ ， $\tau_2=10T_s$ ，模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)采样周期 $T_s=50$ ns。根据式(6)模拟高斯信号，其中 $A=1$ ， $t_{\text{peak}}=200T_s$ ， $\sigma=20T_s$ ， $s=1$ ；利用式(13)将双指数信号进行高斯脉冲成形处理，结果

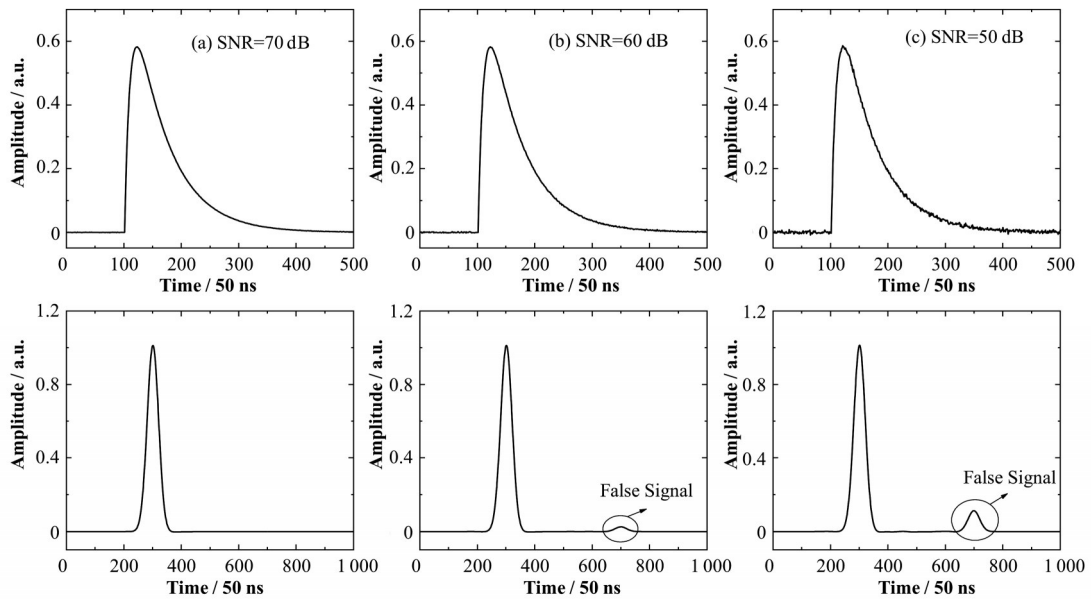


图1 存在假信号的高斯脉冲成形
Fig.1 Gaussian pulse shaping in the presence of false signal

如图1所示。

由图1可以看出,对带噪声的双指数信号进行高斯脉冲成形处理后,输出高斯信号的幅度等于输入信号真实幅度;当SNR=70 dB时成形脉冲中无假信号,当SNR=60 dB时成形脉冲中存在一个假信号,随着信噪比减小,假信号越明显。

式(13)的实质是通过输入信号的一阶导数、二阶导数以及输入信号本身的线性组合将输入信号成形为冲激信号,然后利用冲激信号与高斯信号卷积实现输入信号高斯脉冲成形。但是输入信号中通常具有一定的噪声,将其成形为冲激信号后,信号的信噪比降低,再与高斯信号进行卷积时就会产生假信号。因此,为消除成形脉冲中的假信号,应避免对输入信号进行求导处理。利用卷积运算的微分特性,式(13)可写为式(14)。

$$g_s(t) = \frac{1}{B(\tau_1 - \tau_2)} [\tau_1 \tau_2 f(t) \times g_s''(t) + (\tau_1 + \tau_2) f(t) \times g_s'(t) + f(t) \times g_s(t)] \quad (14)$$

采用图1中SNR=50 dB的双指数信号作为输入,利用式(14)进行高斯脉冲成形处理,结果如图2所示。由图2可以看出,成形脉冲中无假信号。

式(14)所示高斯脉冲成形算法的硬件实现流程如图3所示。首先,在FPGA(Field Programmable Gate Array)中存入离散的高斯信号序列 $g_1[n]$ 以及它对应的一阶导数、二阶导数序列,即 $g_2[n], g_3[n]$;然后,将采集到的离散信号序列分别与 $g_1[n], g_2[n], g_3[n]$ 进行卷积,再进行幅度放大,放大参数分

$$\begin{cases} y(t) = f(t) \times h(t) = \frac{B}{A} g\left(\frac{t}{s}\right) \\ h(t) = \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} \left[\frac{\tau_1 \tau_2 (t - t_{\text{peak}})^2}{\sigma^4 s^4} - \frac{(\tau_1 + \tau_2)(t - t_{\text{peak}}) + \tau_1 \tau_2}{\sigma^2 s^2} + 1 \right] e^{-\frac{(t - t_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2 s^2}} \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)模拟双指数信号高斯脉冲成形系统的冲激响应,结果如图4所示。其中 $\tau_1=60T_s, \tau_2=10T_s, t_{\text{peak}}=200T_s, \sigma=10T_s, s=2, T_s=50\text{ ns}$ 。

式(14)中,当 $\tau_2=0$ 时,可得到指数衰减信号 $f_{\text{exp}}(t)$ 的高斯脉冲成形的卷积形式,即:

$$g_s(t) = \frac{1}{B} \left[f_{\text{exp}}(t) \times g_s'(t) + \frac{1}{\tau_1} f_{\text{exp}}(t) \times g_s(t) \right] \quad (16)$$

式(16)中,当 $\tau_1 \rightarrow \infty$ 时,可得到阶跃信号 $f_{\text{step}}(t)$ 高斯脉冲成形的卷积形式,即:

$$g_s(t) = \frac{f_{\text{step}}(t) \times g_s'(t)}{B} \quad (17)$$

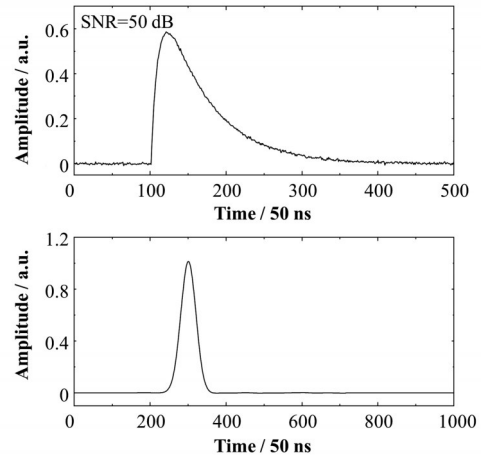


图2 消除假信号后的高斯脉冲成形
Fig.2 Gaussian pulse shaping when false signal is eliminated

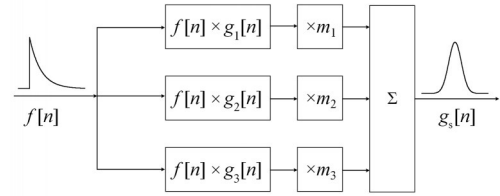


图3 高斯脉冲成形算法实现框图
Fig.3 Block diagram of implementation of Gaussian pulse shaping algorithm

别为 m_1, m_2, m_3 ;最后进入加法器,得到高斯信号。

由式(6)、(7)和(14)可得,双指数信号高斯脉冲成形系统的冲激响应 $h(t)$,如式(15)所示。

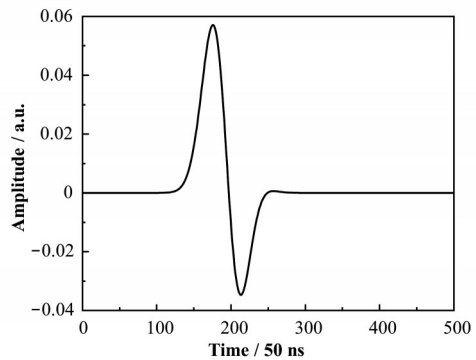


图4 双指数信号高斯脉冲成形系统的冲激响应
Fig.4 Impulse response of Gaussian pulse shaping system for double exponential signal

2 成形参数研究

2.1 时域特性

利用式(9)模拟双指数信号作为输入,其中,

$B=1$, $\tau_1=60T_s$, $\tau_2=10T_s$, $T_s=50$ ns, 信号起始时间为 $100T_s$; 根据式(6)模拟高斯信号, 其中, $A=1$, $\sigma=30T_s$, $s=1$, $t_{\text{peak}}=200T_s, 300T_s, 400T_s$; 利用式(14)对双指数信号进行高斯脉冲成形处理, 结果如图5所示。

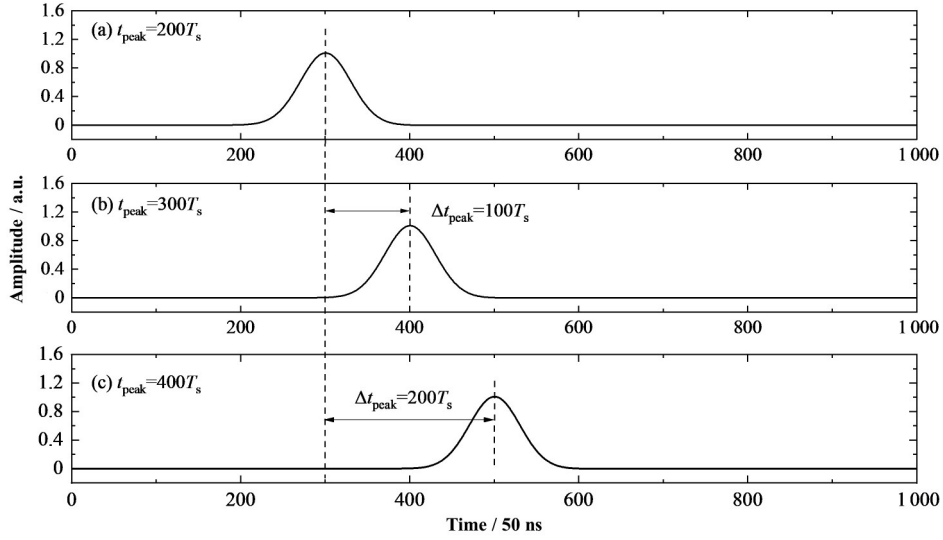


图5 不同 t_{peak} 的高斯脉冲成形
Fig.5 Gaussian pulse shaping with different t_{peak}

由图5可以看出,随着 t_{peak} 增大,成形脉冲峰值延时;成形脉冲峰值对应时间等于输入信号起始时间与 t_{peak} 之和。成形脉冲峰值对应时间与 t_{peak} 具有线性关系,其函数关系式如式(18)所示。

$$Y = t_{\text{peak}} + X \quad (18)$$

式中: Y 为成形脉冲峰值对应时间; X 为输入信号起始时间。

采用图5中相同双指数信号,根据式(6)模拟高斯信号,其中 $A=1$, $s=1$, $t_{\text{peak}}=300T_s$, $T_s=50$ ns, $\sigma=20T_s, 30T_s, 40T_s$; 利用式(14)对双指数信号进行高斯脉冲成形处理,结果如图6所示。

由图6可以看出,随着 σ 增大,成形脉冲宽度增

大,即达峰时间增大,而成形脉冲幅度不变。成形脉冲为高斯脉冲,其表达式与正态分布表达式相同。在误差理论中,对于正态分布的样本数据,根据拉依达准则认为测量值与平均值之差超过 ± 3 倍标准偏差时则应剔除。同理,对于高斯脉冲成形算法,可认为成形脉冲宽度为 6σ , 达峰时间为 3σ 。因此,图6中成形脉冲的达峰时间分别为 $3\mu\text{s}$ 、 $4.5\mu\text{s}$ 、 $6\mu\text{s}$ 。

采用相同双指数信号作为输入,高斯信号中取 $A=1$, $t_{\text{peak}}=300T_s$, $\sigma=20T_s$, $T_s=50$ ns, $s=1, 2, 3$; 利用式(14)进行高斯脉冲成形,结果如图7所示。

由图7可以看出,随着 s 增大,成形脉冲宽度增大,即达峰时间增大,同时成形脉冲幅度减小。 s 作为小波变换的尺度因子,当 $s=1$ 时刚好得到幅度与

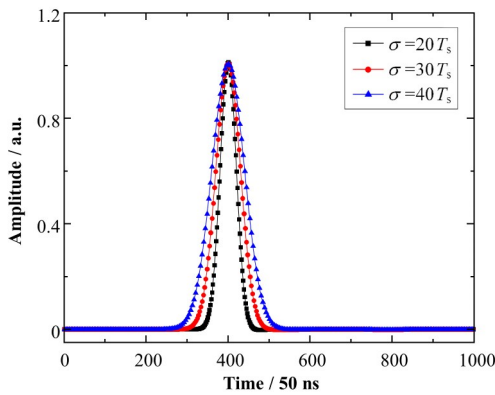


图6 不同 σ 的高斯脉冲成形
Fig.6 Gaussian pulse shaping with different σ

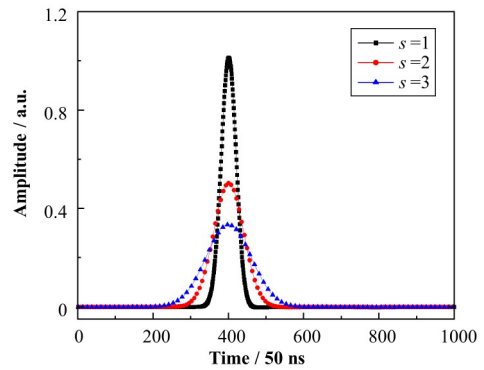


图7 不同 s 的高斯脉冲成形
Fig.7 Gaussian pulse shaping with different s

输入信号相同的输出,所以实际成形时 s 取 1,此时成形脉冲的达峰时间由成形参数 σ 决定。

2.2 频率特性

根据式(9)模拟带噪声的双指数信号,其中, $B=1, \tau_1=60T_s, \tau_2=10T_s, \text{SNR}=50 \text{ dB}$,信号起始时间为 $100T_s, T_s=50 \text{ ns}$;高斯信号中 $A=1, t_{\text{peak}}=200T_s, s=1, \sigma=20T_s, 30T_s, 40T_s$;利用式(14)进行高斯脉冲成形得到高斯信号,然后再对所得高斯信号进行傅里叶变换。结果如图8所示。

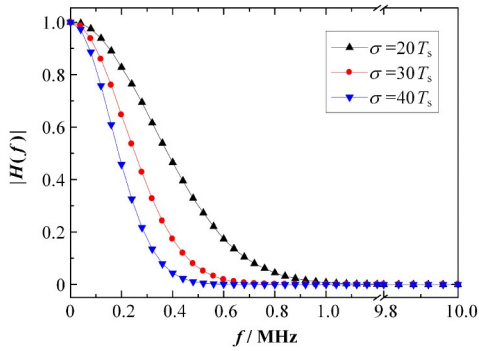


图8 不同 σ 对频率特性的影响

Fig.8 Impact on frequency characteristics corresponding to different σ

由图8可以看出,提出的双指数信号高斯脉冲成形算法的频率特性具有低通滤波器的特性;随着 σ 增大,频谱范围越窄,滤波性能变好。

调整高斯脉冲成形算法中的成形参数,其中, $A=1, t_{\text{peak}}=200T_s, \sigma=20T_s, s=1, 2, 3$,采用与图8相同的双指数信号作为输入,得到的输出信号再进行傅里叶变换,结果如图9所示。

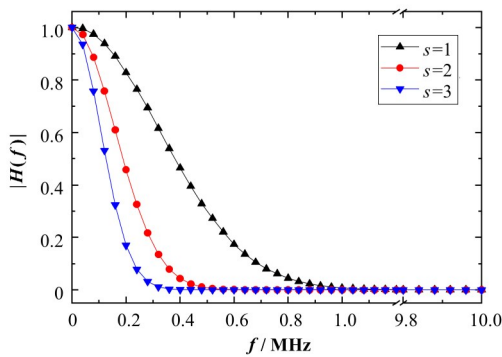


图9 不同 s 对频率特性的影响

Fig.9 Impact on frequency characteristics corresponding to different s

由图9可以看出,随着 s 增大,频谱范围变窄,滤波性能变好。由此可见, σ 和 s 都影响滤波器特性,原因是两者都与成形脉冲宽度有关。由于 s 还与成形脉冲幅度有关,为使成形脉冲幅度与输入信号相同, s 应取 1,此时频率特性仅与 σ 有关。

以带噪声的双指数信号作为输入,分别进行高斯脉冲成形和梯形脉冲成形处理,取相同达峰时间,对比研究两种成形算法的滤波性能。双指数信号梯形脉冲成形算法的时域表达式如式(19)所示^[24]。

$$v_o[n] = 2v_o[n-1] - v_o[n-2] + \{ v_i[n] - v_i[n-n_a] - v_i[n-n_b] + v_i[n-n_c] - (d_1 + d_2) \cdot (v_i[n-1] - v_i[n-n_a-1] - v_i[n-n_b-1] + v_i[n-n_c-1]) + d_1 d_2 \cdot (v_i[n-2] - v_i[n-n_a-2] - v_i[n-n_b-2] + v_i[n-n_c-2]) \} / [n_a(d_1 - d_2)] \quad (19)$$

其中: $n=t/T_s$ (n 取整数); $v_i[n]$ 为输入序列,表示离散的双指数信号; $v_o[n]$ 为输出序列,表示成形后的梯形脉冲; n_a 为梯形脉冲的达峰时间; n_b 为梯形脉冲的达峰时间与平顶宽度之和; n_c 为梯形脉冲的宽度; $d_1=e^{-T_s/\tau_1}; d_2=e^{-T_s/\tau_2}$ 。

设带噪声的双指数信号起始时间为 $100T_s, \text{SNR}=35 \text{ dB}$;高斯脉冲成形算法的成形参数取 $A=1, B=1, \tau_1=60T_s, \tau_2=10T_s, t_{\text{peak}}=100T_s, \sigma=20T_s, s=1$;梯形脉冲成形算法的成形参数取 $n_a=60T_s, n_b=80T_s$ 。其中, $T_s=50 \text{ ns}$ 。两种成形算法所得成形脉冲的达峰时间均为 $3 \mu\text{s}$ 。不同成形算法所得成形脉冲在时域、频域的结果如图10所示。

由图10可以看出,在时域结果中高斯脉冲的基线在 0 附近,而梯形脉冲含有部分噪声;在频域中,高斯脉冲的高频部分较梯形脉冲更光滑,抖动更小。

3 实验测试

为了研究高斯脉冲成形算法对实测核脉冲信号的处理效果,搭建了X射线荧光测量系统实验平台。选用科颐维的KYW2000A型号X光管,W靶,额定管压、管流分别为 50 kV 和 1 mA ^[25]。实验时,设置X光管的管压为 15.7 kV ,管流分别为 $7.8 \mu\text{A}, 39.2 \mu\text{A}, 98.0 \mu\text{A}$ 和 $156.9 \mu\text{A}$,模拟不同计数率环境;X光管出射X射线经组合滤片 ($0.5 \text{ mm Ag}+0.5 \text{ mm Ag}+0.2 \text{ mm Cu}$)后照射标准Mn样品;采用AMPTEK公司的FAST-SDD探测器探测样品产生的 5.89 keV 和 6.49 keV 特征X射线^[26];探测器输出的核脉冲信号采用文献[18]中的采集板收集,其中ADC采样率为 10 MSPS ,即 $T_s=100 \text{ ns}$ 。

3.1 堆积脉冲分离

堆积脉冲分离直接影响信号幅度的有效提取和能谱形状。在核脉冲信号的获取中,需要对堆积脉冲进行识别。选取实测核脉冲信号的一部分进行高

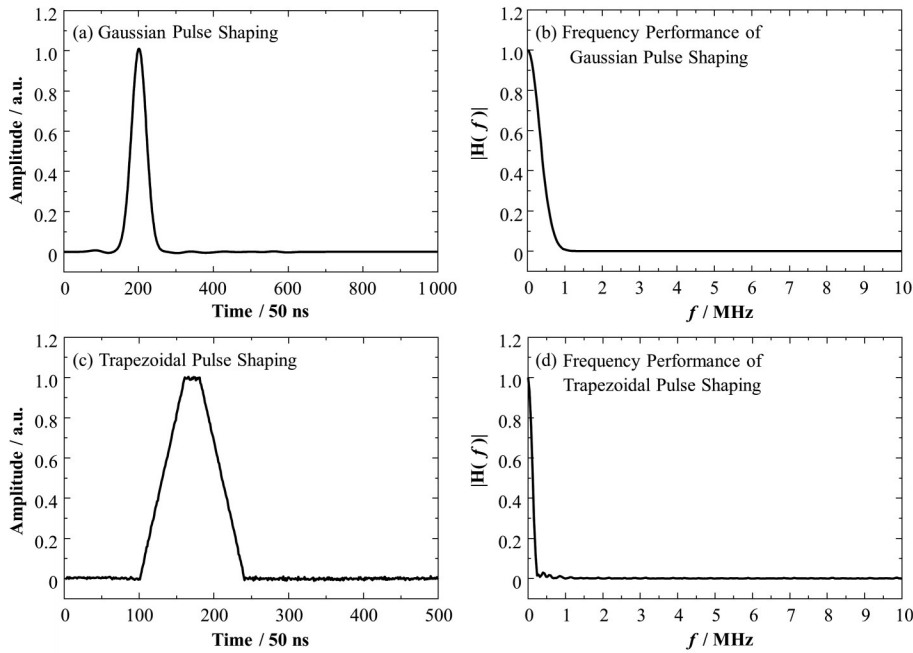


图10 不同成形算法所得成形脉冲在时域、频域的结果
Fig.10 Results of shaped pulses in time domain and frequency domain

斯脉冲成形和梯形脉冲成形的对比,实测核脉冲信号中有3组不同时间间隔的堆积脉冲,如图11所示。其中,第1组堆积脉冲时间间隔小,第2组堆积脉冲时间间隔大,第3组堆积脉冲时间间隔较大。

高斯脉冲成形算法的成形参数取 $\tau_1=26T_s$, $\tau_2=1T_s$, $t_{peak}=19T_s$, $\sigma=16/(3T_s)$, $s=1$; 梯形脉冲成形算法的成形参数取 $n_a=16T_s$, $n_b=16T_s$ 。此时,成形脉冲的达峰时间为 $1.6 \mu s$, 成形结果如图11所示。

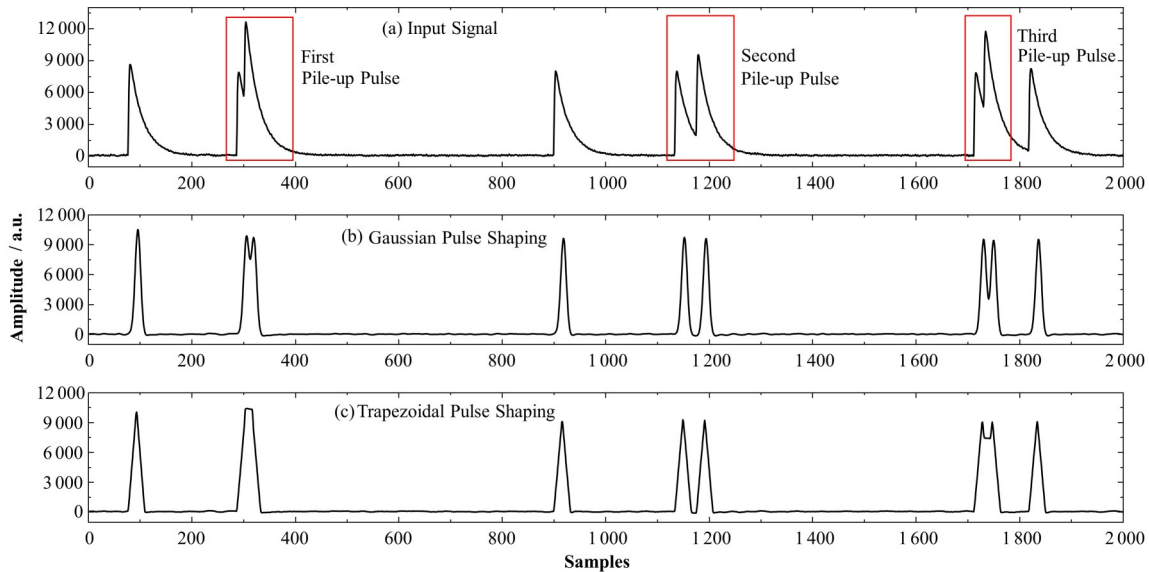


图11 不同成形算法在相同达峰时间条件下的堆积脉冲分离
Fig.11 Pile-up pulse separation performance of different pulse shaping algorithms

由图11可以看出,第1组堆积脉冲经高斯脉冲成形后,成形脉冲宽度更窄,且可判断原始信号为堆积脉冲;但是相同达峰时间条件下,所得梯形脉冲宽度较宽,形成了一个脉冲,若不剔除则会造成能谱中特征峰展宽。第2组堆积脉冲经两种成形算法处理后,均能得到原始信号的真实幅度。在第3组堆积

脉冲处理中,两种成形算法所得成形脉冲仍为堆积脉冲,但所得高斯脉冲宽度更窄,更容易被识别。

3.2 能谱分析

为对比研究高斯脉冲成形算法和梯形脉冲成形算法在能量分辨率、堆积脉冲分离方面的性能,对实

测核脉冲信号分别进行高斯脉冲成形和梯形脉冲成形(此时梯形脉冲的平顶为0)处理,对比相同达峰时间条件下两种成形算法所得能谱的能量分辨率和5.89 keV特征峰峰面积。

选取管流为7.8 μA 时的实测核脉冲信号。高斯脉冲成形算法的成形参数取 $\tau_1=26T_s$, $\tau_2=1T_s$, $t_{\text{peak}}=200T_s$, $\sigma=64/(3T_s)$, $s=1$; 梯形脉冲成形算法的成形参数取 $n_a=64T_s$, $n_b=64T_s$ 。两种成形算法对应能谱如图12所示。其中,高斯脉冲成形算法所得能谱的能量分辨率 $\text{FWHM}=128\text{ eV}@5.89\text{ keV}$, 5.89 keV特征峰峰面积为40 451; 梯形脉冲成形算法所得能谱的能量分辨率 $\text{FWHM}=127\text{ eV}@5.89\text{ keV}$, 5.89 keV特征峰峰面积为39 523。

不同脉冲成形算法在不同管流条件下所得能谱的能量分辨率与达峰时间的关系如图13所示。

由图13可以看出,随着达峰时间增大,两种成形算法的能量分辨率先提高后再损失;当高斯脉冲成形算法和梯形脉冲成形算法所取达峰时间在3.2~6.4 μs 时,所得能谱的能量分辨率均最佳,且两种成形方法对应能量分辨率之差小于5 eV。

统计相同达峰时间,不同管流条件下,两种成形算法所得能谱中的5.89 keV特征峰峰面积与达峰时

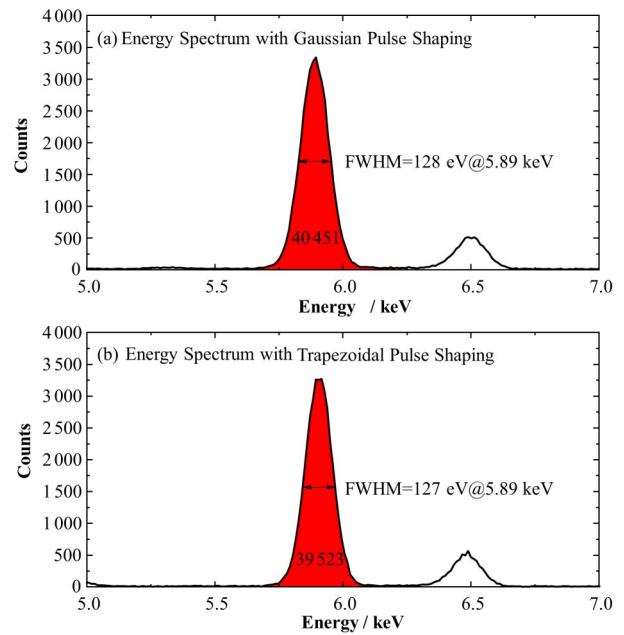


图12 不同脉冲成形算法在相同达峰时间条件下对应能谱图

Fig.12 Energy spectra obtained by different pulse shaping algorithms

间的关系,结果如图14所示。

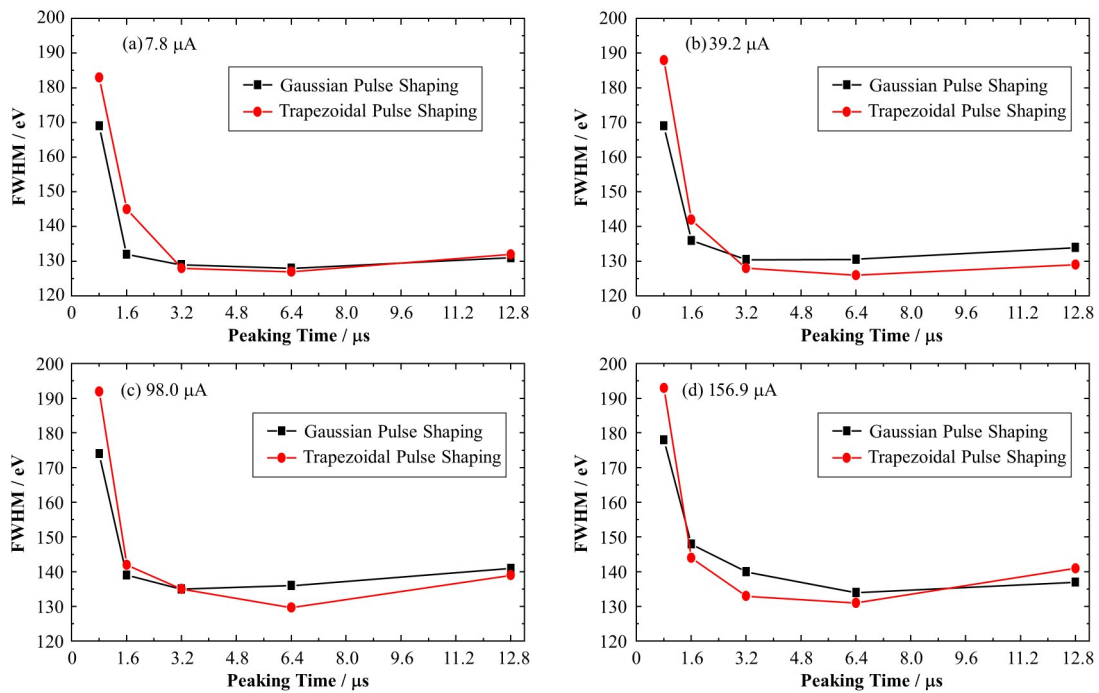


图13 不同管流条件下能量分辨率与达峰时间的关系

Fig.13 Relationship between energy resolution and peaking time under different tube current conditions

由图14可以看出,随着达峰时间增大,两种成形算法所得能谱中5.89 keV特征峰峰面积均下降。这是由于随着达峰时间的增加,成形脉冲宽度增大,堆积脉冲增多。但是采用高斯脉冲成形算法所得能

谱中的5.89 keV特征峰峰面积始终高于梯形脉冲成形算法。因此,在相同达峰时间条件下,高斯脉冲成形算法较梯形脉冲成形算法具有更好的堆积脉冲分离能力。

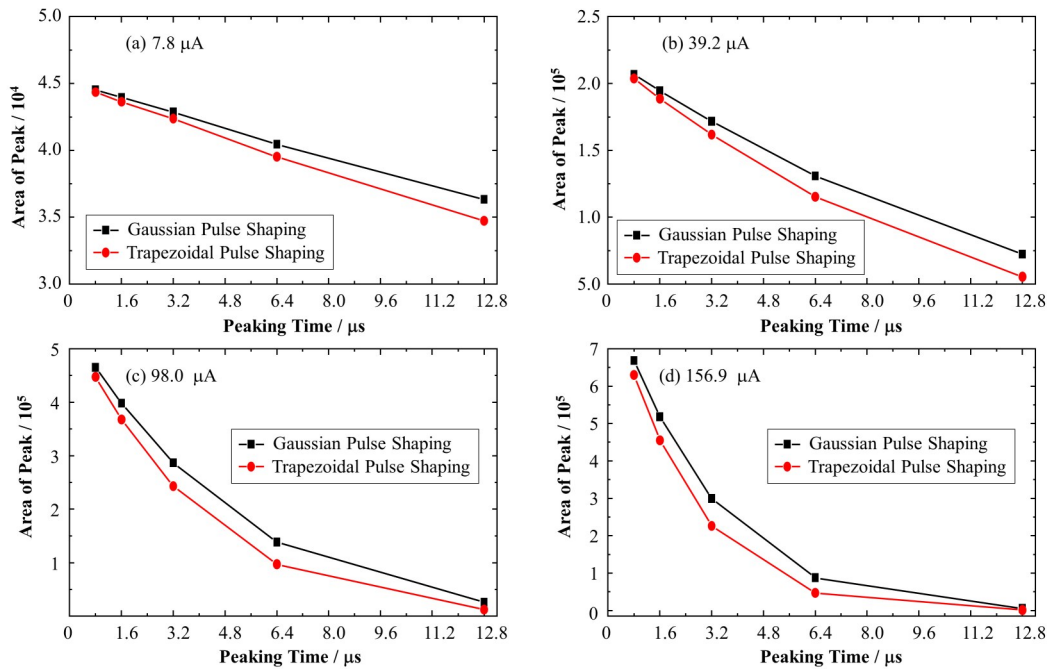


图 14 不同管流条件下 5.89 keV 特征峰峰面积与达峰时间的关系

Fig.14 Relationship between the area of the 5.89 keV peak and peaking time under different tube current conditions

4 结语

以小波变换为基础,利用卷积运算的微分特性,提出了双指数信号高斯脉冲成形算法,解决了成形脉冲中存在假信号的问题。论文采用模拟核脉冲信号研究了高斯脉冲成形算法中成形参数对成形脉冲的时域、频域特性的影响规律;同时,搭建了 X 射线荧光测量系统实验平台,利用实测核脉冲信号对比研究高斯脉冲成形算法和梯形脉冲成形算法在能量分辨率、堆积脉冲分离方面的性能。结果表明:1)高斯脉冲成形算法所得成形脉冲峰值对应时间等于输入信号起始时间与 t_{peak} 之和;2) σ 和 s 都与成形脉冲宽度有关,它们的值越大,成形脉冲宽度越宽,滤波效果越好;成形脉冲的幅度随 s 增加而减小;当 s 取 1,成形脉冲幅度与输入信号幅度相同,此时滤波器的频率特性仅与 σ 有关;3)达峰时间为 3.2~6.4 μs 时,高斯脉冲成形算法与梯形脉冲成形算法所得能谱的能量分辨率最佳,且两者之差小于 5 eV;4)在相同达峰时间条件下,高斯脉冲成形算法在堆积脉冲分离方面均优于梯形脉冲成形算法。

作者贡献说明 杨小艳负责研究的提出和设计、算法的可行性实验验证、文章的起草和最终版本的修订;洪旭负责实验数据的收集和整理、项目的监督和管理;周建斌负责测量系统实验平台的搭建;廖光辉负责测量系统的实验测试;曹或负责实验数据的收集;严大顺负责实验数据的整理、项目的监督。

参考文献

- Yu J, Zhou J B, Tuo X G, *et al.* Sum peak probability estimation in radiation measurement[J]. Measurement, 2021, **174**: 109023. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109023.
- 程隆军, 殷伯华, 孙博彤, 等. X 射线探测器双指数信号时间常数[J]. 核技术, 2021, **44**(9): 090403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090403.
CHENG Longjun, YIN Bohua, SUN Botong, *et al.* Time constant of double exponential signal for X-ray energy spectrum detector[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(9): 090403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090403.
- 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.
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.
- 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.
- 5 王经瑾, 范天民, 钱永康. 核电子学[M]. 北京: 原子能出版社, 1985.
WANG Jingjin, FAN Tianmin, QIAN Yongkang. Nuclear electronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1985.
 - 6 张志勇, 曾卫华, 周舜铭, 等. 核能谱信号放大器脉冲成形电路的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(11): 1300 - 1302. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2011.11.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2011.11.027).
ZHANG Zhiyong, ZENG Weihua, ZHOU Shunming, *et al.* Design of the nuclear pulse shaping circuit in nuclear spectrum signal amplifier[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **31**(11): 1300 - 1302. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2011.11.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2011.11.027).
 - 7 张怀强, 吴和喜, 宁洪涛. 基于 Multisim 的核信号仿真与高斯成形研究[J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(8): 845 - 848. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2015.08.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2015.08.023).
ZHANG Huaiqiang, WU Hexi, NING Hongtao. Research on the simulation and Gaussian shaping of nuclear signal based on multisim software[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, **35**(8): 845 - 848. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2015.08.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2015.08.023).
 - 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.
 - 9 Zhou J B, Zhou W, Hong X. Improvement of digital S-K filter and its application in nuclear signal processing[J]. Nuclear Science and Techniques, 2013, **24**(6): 060401. DOI: [10.13538/j.1001-8042/nst.2013.06.020](https://doi.org/10.13538/j.1001-8042/nst.2013.06.020).
 - 10 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110403).
 - 11 李乐赛, 周建斌, 洪旭, 等. 迭代法解析核信号成形电路数字解[J]. 核技术, 2021, **44**(8): 080401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080401).
LI Lesai, ZHOU Jianbin, HONG Xu, *et al.* Iteration method for digital solution of nuclear signal forming circuit[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(8): 080401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080401).
 - 12 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](https://doi.org/10.13538/j.1001-8042/nst.26.010402).
 - 13 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).
 - 14 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).
 - 15 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).
 - 16 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.060403).
 - 17 Liu Y Y, Zhang J L, Liu L F, *et al.* Implementation of real-time digital CR-RC^m shaping filter on FPGA for gamma-ray spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **906**: 1 - 9. DOI: [10.1016/j.nima.2018.05.020](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.05.020).
 - 18 Hong X, Wang H P, Zhou J B, *et al.* Peak tailing cancellation techniques for digital CR- (RC)ⁿ filter[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **167**(3): 109471. DOI: [10.1016/j.apradiso.2020.109471](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109471).
 - 19 陈世国, 吉世印, 刘万松. 基于小波分析的指数衰减信号高斯脉冲成形[J]. 物理学报, 2008, **57**(5): 2882 - 2887. DOI: [10.3321/j.issn:1000-3290.2008.05.041](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3290.2008.05.041).
CHEN Shiguo, JI Shiyin, LIU Wansong. Gaussian pulse shaping of exponential decay signal based on wavelet analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2008, **57**(5): 2882 - 2887. DOI: [10.3321/j.issn:1000-3290.2008.05.041](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3290.2008.05.041).
 - 20 陈世国, 吉世印, 刘万松, 等. 基于小波分析的高斯脉冲成形的递归实现[J]. 物理学报, 2009, **58**(5): 3041 - 3046. DOI: [10.3321/j.issn:1000-3290.2009.05.027](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3290.2009.05.027).
CHEN Shiguo, JI Shiyin, LIU Wansong, *et al.* Recursive

- implementation of Gaussian pulse shaping based on wavelet analysis[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3041 - 3046. DOI: [10.3321/j.issn:1000-3290.2009.05.027](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3290.2009.05.027).
- 21 Qin Z J, Chen C, Luo J S, *et al.* A pulse-shape discrimination method for improving gamma-ray spectrometry based on a new digital shaping filter[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, **145**: 193 - 201. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2017.10.023](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.10.023).
- 22 Kantor M Y, Sidorov A V. True Gaussian shaping for high count rate measurements of pulse amplitudes[EB/OL]. 2018: arXiv: 1809.02211. <https://arxiv.org/abs/1809.02211>.
- 23 Kantor M Y, Sidorov A V. Detection of true Gaussian shaped pulses at high count rates[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, **15**(6): P06015. DOI: [10.1088/1748-0221/15/06/p06015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/p06015).
- 24 孙超, 饶开友, 郭景富, 等. 数字化多道中双指数脉冲梯形成形算法研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2017, **37**(7): 752 - 756. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2017.07.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2017.07.021).
- SUN Chao, RAO Kaiyou, GUO Jingfu, *et al.* Study of trapezoidal shaping algorithm based on double exponential pulse in digital multichannel pulse analyzer [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2017, **37** (7): 752 - 756. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2017.07.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2017.07.021).
- 25 KYW2000A 技术参数 [ED/OL]. [2022-10-11] <https://www.keyiwei.com/chanpinxilie/kyw2000abuxiugangxilie.html>.
- Technical specifications of KYW2000A[ED/OL]. [2022-10-11] <https://www.keyiwei.com/chanpinxilie/kyw2000abuxiugangxilie.html>.
- 26 FAST-SDD detector specifications[ED/OL]. [2022-10-11] <https://www.amptek.com/products/x-ray-detectors/fastssdd-x-ray-detectors-for-xrf-eds/fastssdd-silicon-drift-detector>.