

基于双指数拟合的核信号堆积脉冲重构方法

周厚泓, 刘 易, 李 超

成都理工大学核技术及自动化工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年12月13日; 录用日期: 2023年12月25日; 发布日期: 2024年1月31日

摘 要

高计数率下核脉冲信号容易发生堆积, 将堆积脉冲直接舍弃的方法会导致能谱计数率的下降。本文用硅漂移探测器对X光管激发的铜合金样品进行测量, 采用14位20 MHz的ADC采样获取数据, 在Matlab上对输出信号进行冲激成形以识别堆积脉冲, 应用双指数表达式对堆积脉冲进行重构并进行幅值提取计入能谱中。结果表明, 与传统的直接舍弃堆积脉冲相比, 该方法提高了能谱计数, 提升率约为21.37%。

关键词

双指数信号, 冲激成形, 梯形成形, 堆积脉冲识别, 脉冲重构

Nuclear Pile-Up Pulse Reconstruction Method Based on Double-Exponential Fitting

Houhong Zhou, Yi Liu, Chao Li

The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Dec. 13th, 2023; accepted: Dec. 25th, 2023; published: Jan. 31st, 2024

Abstract

Nuclear pulse tend to pile up at high count rate. The traditional method is to discard the pile-up pulse, which will decrease the energy spectrum count rate. In this paper, silicon drift detector is used to measure the copper alloy excited by X-ray tube, 14-bit 20 MHz ADC is used to obtain the data, impulse pulse-shaping is performed on Matlab to identify the pile-up pulse of the output signal, and the pile-up pulse is reconstructed by double-exponential expression and the amplitude is extracted and included in the energy spectrum. The results show that, compared with directly rejecting the pile-up pulse, this method improves the energy spectrum count by 21.37%.

Keywords

Double-Exponential Signal, Impulse Shaping, Trapezoidal Shaping, Pile-Up Pulse Discrimination, Pulse Reconstruction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers 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

1. 引言

硅漂移探测器(Silicon Drift Detector, SDD)是由高阻硅制成的 X 射线探测器,相比于 Si-PIN 等探测器, SDD 器件采用侧向耗尽结构设计,电荷输运电场与探测器耗尽电场相对独立,电荷收集极电容与探测器面积无关,使收集极电容非常小,因而具备优异的能量分辨率和计数率性能[1]。

由于探测器输出的核脉冲具有一定的宽度与较长的下降沿,一个脉冲信号宽度内可能相继探测到多次核事件,这会导致信号堆积,引起脉冲幅度的畸变,影响到脉冲信号幅度的有效提取,进而影响到核谱仪的能量分辨率[2] [3]。堆积脉冲分离常用的方法是将具有长拖尾的双指数信号通过卷积成形为具有一定宽度的信号,减小或者消除前一个脉冲拖尾对后一个脉冲幅值的影响。例如高斯成形、梯形成形(三角成形)、尖顶成形等方法[4] [5] [6] [7] [8],成形之后可对脉冲直接进行幅值提取,其中梯形成形算法具有处理过程简单,成形速度快,成形后梯形脉冲宽度窄,顶部平坦,成形参数可调,线性良好等特点被广泛应用[9],但是对于成形之后仍然堆积的脉冲信号,上述的成形方法无法对其进行分离,因此需要使用其他方法对该种堆积脉冲进行处理。

本文使用 Matlab 对 ADC 采集的硅漂移探测器输出信号数据进行处理,采用冲激成形识别堆积脉冲、梯形成形进行幅值提取,应用核信号的双指数模型对堆积脉冲进行分离并重构,以提高能谱的计数率和分辨率。

2. 探测器输出信号

硅漂移探测器(SDD)的输出信号近似为脉冲信号或单时间常数的指数衰减信号[10]。随着数字系统的发展,高速 ADC 的应用降低了半导体探测器系统中的噪声,提高了采样精度。因此核脉冲的上升时间可以被精确地探测和描述, SDD 的输出信号应该近似为具有一定上升沿的双指数信号[11]。

双指数信号数学表达式:

$$V(t) = \begin{cases} A \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, A 为脉冲振幅, τ_1 和 τ_2 分别为信号的慢时间常数和快时间常数。

3. 双指数梯形成形算法

双指数梯形成形算法[12]是一种将 ADC 采集得到的双指数脉冲信号转换成梯形脉冲信号的算法,原理如图 1 所示。理想的梯形脉冲输出信号表达为:

$$V_{tr}(t) = \left(\frac{A}{t_r} \right) \cdot [t \cdot u(t) - (t - t_r) \cdot u(t - t_r) - (t - t_t) \cdot u(t - t_t) + (t - t_d) \cdot u(t - t_d)] \quad (2)$$

$V_{tr}(t)$ 为等腰梯形脉冲; $u(t)$ 为单位阶跃函数; t_r 为梯形脉冲上升结束点; t_t 为梯形脉冲平顶结束点; t_d 为梯形脉冲下降结束点。

探测器输出信号为双指数信号, 其表达式为:

$$V_i(n) = A \cdot \left(e^{-\frac{nT_s}{\tau_1}} - e^{-\frac{nT_s}{\tau_2}} \right) \quad (3)$$

式中, A 为脉冲振幅, τ_1 和 τ_2 分别为脉冲的下降部分和上升部分, T_s 为 ADC 的采样周期, n 为采样点序列。

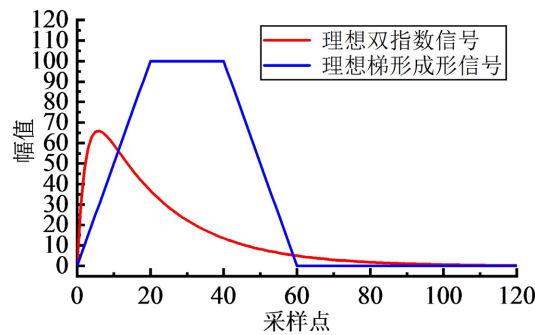


Figure 1. Ideal double-exponential signal and ideal trapezoid shaping signal

图 1. 理想双指数信号与理想梯形成形信号

分别将 V_i , V_{tr} 离散后进行 Z 变换得到:

$$V_i(z) = n_r \cdot (\alpha - \beta) \cdot (1 - z^{-1})^2 \quad (4)$$

$$V_{tr}(z) = (1 - z^{-n_r} - z^{-n_t} + z^{-n_d}) \cdot (1 - \alpha \cdot z^{-1}) \cdot (1 - \beta \cdot z^{-1}) \quad (5)$$

式中 $n_r = \frac{t_r}{T_s}$ 决定梯形脉冲上升边长度; $n_t = \frac{t_t}{T_s}$ 决定梯形脉冲平顶宽度; $n_d = \frac{t_d}{T_s}$ 决定梯形脉冲下降长度;

$$\alpha = e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}, \quad \beta = e^{-\frac{T_s}{\tau_2}}.$$

将上式相除后再作 Z 反变换即可得出双指数梯形成形算法时域递推式:

$$\begin{aligned} V_o(n) = & 2 \cdot V_o(n-1) - V_o(n-2) + [V_i(n) - V_i(n-n_r) - V_i(n-n_t) + V_i(n-n_d)] \\ & - (\alpha + \beta) \cdot (V_i(n-1) - V_i(n-n_r-1) - V_i(n-n_t-1) + V_i(n-n_d-1)) \\ & + \alpha \cdot \beta \cdot (V_i(n-2) - V_i(n-n_r-2) - V_i(n-n_t-2) + V_i(n-n_d-2)) \Big/ [n_r \cdot (\alpha - \beta)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $V_i(n)$ 输入双指数脉冲序列; n 为采样序列号; V 为输出梯形成形后的序列。

4. 堆积脉冲识别与重建

本文用 AmpTek 公司生产的型号为 XR-100SDD 半导体探测器对铜(Cu)标准样品进行测量, 采用型号为 KYW2000A-Ag X 光管作为激发源, 光管电压设为 20 kV, 光管电流设置为 78.4 uA, 测量时间为 100 s,

采用 14 位 20 MHz 的 ADC 对输出信号进行采集, 输出核信号最大幅度为 16,384, 时间分辨率为 50 ns, 将所得的数据导入到 Matlab 中进行处理, 对多个非堆积脉冲的时间常数进行拟合求平均值, 求得双指数信号的快慢衰减时间常数 $\tau_1 = 974.595 \text{ ns}$, $\tau_2 = 121.755 \text{ ns}$ 。采用梯形成形算法对输出信号进行成形并提取幅值, 梯形信号的上升时间设置为 1.25 μs , 平顶时间设置为 0.5 μs , 脉冲宽度为 3 μs , 采用冲激成形对脉冲堆积进行判断并记录堆积脉冲位置, 最后对堆积脉冲应用双指数信号模型进行重构, 将堆积脉冲重新进行幅值提取后计入到能谱中, 具体过程如下所示。

4.1. 堆积脉冲识别

对双指数输出信号进行冲激成形来识别核脉冲信号的起点, 冲激成形算法[13][14]是一种将双指数信号转换成冲激信号的算法, 其原理如图 2 所示。理想的冲激信号表达式为:

$$V_o(t) = A \cdot \delta(t), t \geq 0 \quad (7)$$

对式(1)与式(7)进行 Z 变换后, 两式相除, 再进行 Z 逆变换可得冲激成形的递推表达式:

$$V_o(n-1) = \frac{V_i(n) - (\alpha - \beta) \cdot V_i(n-1) + \alpha \cdot \beta \cdot V_i(n-2)}{(\alpha + \beta)} \quad (8)$$

其中 V_i 为双指数信号输入, V_o 为冲激成形输出, $\alpha = e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}$, $\beta = e^{-\frac{T_s}{\tau_2}}$ 。

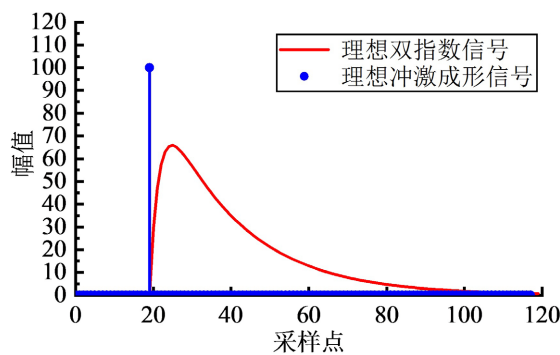


Figure 2. Ideal double-exponential signal and ideal impulse shaping signal

图 2. 理想双指数信号与理想冲激成形信号

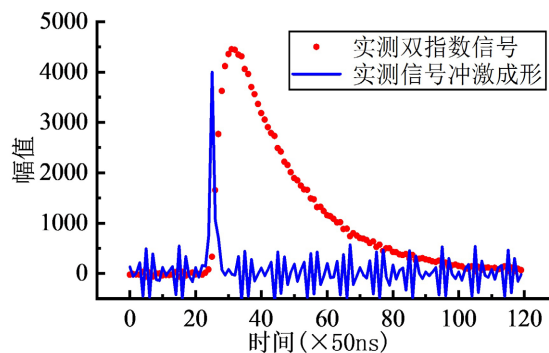


Figure 3. Measured double-exponential signal and impulse shaping signal

图 3. 实测双指数信号与冲激成形信号

实测信号的冲激成形如图 3 所示。在信号非堆积的情况下，梯形脉冲峰值宽度内，只能检测到一个冲激成形的信号；若在梯形峰值宽度内检测到多个冲激信号，则表明发生了脉冲堆积事件，冲激成形的位置即为脉冲发生堆积的位置，如图 4 所示。

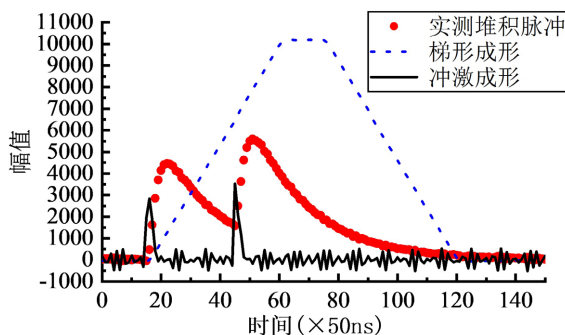


Figure 4. Pile-up pulse discrimination
图 4. 堆积脉冲判断

4.2. 堆积脉冲重构

以两个脉冲堆积的情况为例，堆积脉冲的重构过程如下：

- 1) 冲激成形识别到堆积脉冲后，判断两个脉冲之间的间隔，若堆积发生在上升沿，则舍弃该脉冲；若堆积发生在下降沿，则对脉冲进行重构；
- 2) 应用式(1)对第一个脉冲进行拟合得到一个完整的脉冲数据；
- 3) 用堆积的脉冲数据减去拟合的第一个脉冲数据，得到第二个脉冲数据，从而重构堆积脉冲。

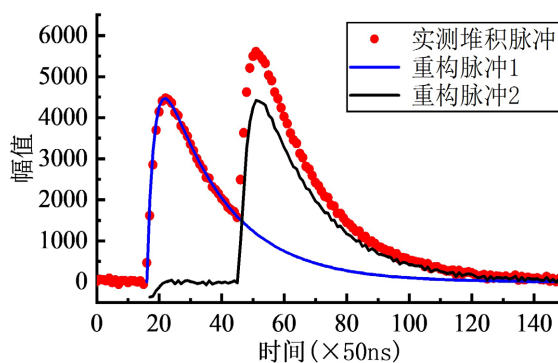


Figure 5. Pile-up pulse reconstruction
图 5. 堆积脉冲重构

脉冲重构结果如图 5 所示，图中红色为实测的堆积脉冲信号，蓝色为第一个原始脉冲重构之后的信号，黑色为堆积脉冲数据减去重构脉冲数据的信号。从图中可以看出，该方法可以较好地还原第一个原始脉冲的形状和幅值，并且也还原了第二个脉冲信号的幅值。对脉冲进行处理之后，进行幅值提取，再进行成谱。图 6 分别为堆积脉冲丢弃与重构之后的能谱图。非重构情况下一旦脉冲被识别为堆积脉冲，该脉冲将被直接丢弃。在本文中，对被丢弃的脉冲使用双指数模型进行重构并将重构后的幅值进行记录，计入到能谱计数中。相比于直接丢弃堆积脉冲，重构堆积脉冲后的整体能谱计数将有所提高，提升率约为 21.37%。

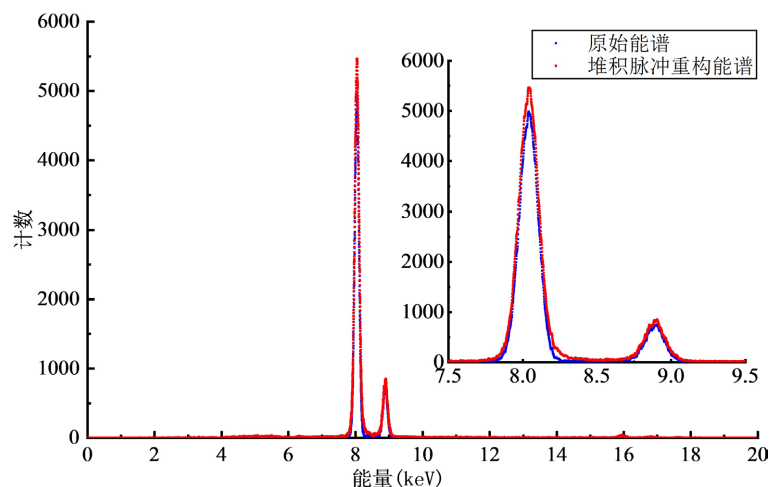


Figure 6. Energy spectrum before and after pile-up pulse reconstruction
图 6. 堆积脉冲重构前后能谱图

5. 总结

本文根据 SDD 半导体探测器的双指数输出信号模型，在 Matlab 上对 ADC 采集到的数据进行处理，对信号进行梯形成形幅值提取、冲激成形识别堆积脉冲，应用双指数信号模型对被丢弃的堆积脉冲进行重构。结果显示，冲激成形能够准确识别堆积脉冲的位置，重构之后的脉冲信号能够较好的还原前一个脉冲的形状与幅值，并且对第二个脉冲信号的幅值也能较好地还原；与传统的直接舍弃堆积脉冲相比，该方法提高了脉冲计数率。当脉冲未发生堆积时，无需对脉冲进行重构；当脉冲发生前沿堆积时，舍弃该脉冲；当脉冲发尾堆积时，对脉冲进行重构。经过计算，该方法使得能谱计数率提高了 21.37%，可以用于堆积脉冲的处理。

基金项目

国家自然科学基金(12075038)。

参考文献

- [1] 宋文刚, 张立军, 张晶, 王冠鹰. 硅漂移探测器数字脉冲处理技术[J]. 物理学报, 2022, 71(1): 80-88.
- [2] Lee, M., Lee, D., Ko, E., *et al.* (2019) Pulse Pileup Correction Method for Gamma-Ray Spectroscopy in High Radiation Fields. *Nuclear Engineering and Technology*, **52**, 1029-1035. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.003>
- [3] 张怀强, 吴和喜, 汤彬, 等. 数字核谱仪系统中脉冲堆积识别方法的研究[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2012, 35(3): 281-284. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3504.2012.03.013>
- [4] 周伟, 周建斌. 基于双参数模型核脉冲信号数字高斯成形技术[J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 318-321.
- [5] Zhou, J.-B., Liu, Y., Xu, H., *et al.* (2015) Trapezoidal Pulse Shaping for Pile-Up Pulse Identification in X-Ray Spectrometry. *Chinese Physics C*, **39**, 112-117. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/39/6/068201>
- [6] Xu, H., Ma, Y.-J., Zhou, J.-B., *et al.* (2015) New Methods to Remove Baseline Drift in Trapezoidal Pulse Shaping. *Nuclear Science and Techniques*, **26**, 60-64. <https://doi.org/10.13538/j.1001-8042/nst.26.050402>
- [7] 洪旭, 倪师军, 周建斌, 等. 梯形成形算法中成形参数与成形脉冲波形关系研究[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(2): 150-153, 158. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2016.02.008>
- [8] 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): 59-65.
- [9] 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.
- [10] Jordanov, V.T. (2015) Unfolding-Synthesis Technique for Digital Pulse Processing. Part 1: Unfolding. *Nuclear Instru-*

-
- ments & Methods in Physics Research*, **805**, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.040>
- [11] Wang, X.Y., Zhou, J.B., Wang, M., *et al.* (2022) Signal Modeling and Impulse Response Shaping for Semiconductor Detectors. *Nuclear Science and Techniques*, **33**, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s41365-022-01027-9>
- [12] 曾家骏, 何剑锋, 袁兆林, 等. 数字多道中双指数脉冲梯形成形算法的实现与测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 129-135.
- [13] Liu, Y., Wang, M., Wan, W., Zhou, J., Hong, X., Liu, F. and Yu, J. (2020) Counting-Loss Correction Method Based on Dual-Exponential Impulse Shaping. *Journal of Synchrotron Radiation*, **27**, 1609-1613. <https://doi.org/10.1107/S1600577520010954>
- [14] 汪雪元, 周建斌, 何剑锋, 等. 核脉冲信号冲激成形的导数求解方法[J]. 核技术, 2022, 45(7): 67-74.