

文章编号: 2095-4980(2015)04-0605-05

核脉冲信号数字梯形成形方法

周 伟^{1,2}, 肖永江³, 周建斌², 洪 旭², 赵 祥²

(1. 东华理工大学 教育部核技术应用工程研究中心, 江西 南昌 330013; 2. 成都理工大学 核技术学院, 四川 成都 610059;
3. 萍乡学院 机电系, 江西 萍乡 337055)

摘 要: 介绍了一种核脉冲信号的数字梯形成形算法。利用函数卷积法实现了梯形成形的递推算法。该算法是核信号滤波成形的常用方法, 它的实现提高了系统的时间和能量分辨力。利用 Matlab7.0 软件, 完成了对理想核脉冲信号和实际探测器输出信号的计算机模拟仿真与分析。该算法可以根据实时信号改变参数配置, 优化滤波器并显示成形结果。

关键词: 核脉冲信号; 梯形成形; 函数卷积法; 软件仿真

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0605

Digital trapezoidal shaping algorithm of nuclear pulse signal

ZHOU Wei^{1,2}, XIAO Yongjiang³, ZHOU Jianbin², HONG Xu², ZHAO Xiang²

(1. Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, Ministry of Education, East China Institute of Technology, Jiangxi Nanchang 330013, China; 2. Institute of Nuclear, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;
3. School of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang Institute, Pingxiang Jiangxi 337055, China)

Abstract: A new digital trapezoidal shaping algorithm about nuclear pulse signal is presented. The shaping recursive model is implemented based on function convolution method. The algorithm is a common method for nuclear signal shaping, which can improve time and energy resolution of the whole system. Some simulation experiments and real data tests are carried out to verify the feasibility and superiority of the new algorithm. According to the factors configuration, filter optimization and results display can be accomplished as well.

Key words: nuclear pulse signal; digital trapezoidal shaping; function convolution; software simulation

数字核能谱测量系统是新一代核仪器发展的趋势, 与传统模拟核能谱测量系统相比, 具有更好的稳定性、抗干扰性和保真性。核能谱测量系统研究的重要内容就是核信号处理方法, 为了得到能量和时间分辨力好的核能谱, 就必须对数字核信号进行适当的滤波成形, 尽可能减小电子学噪声、脉冲堆积和弹道亏损等对能量和时间分辨力的影响^[1-3]。其中梯形成形就是一种用于数字化核脉冲信号滤波成形的重要方法^[4-10]。它不仅可替代复杂的模拟滤波成形电路, 提高系统稳定性, 而且还能改善系统灵活性和自适应性, 在数字化多道谱仪研究中得到应用^[11-12]。本文基于函数卷积法设计了一种核脉冲信号数字梯形成形的递推模型, 运用 Matlab 软件对理想核脉冲信号和实际探测器输出信号进行计算机模拟仿真与分析。实验研究表明, 本算法不仅可以提高核能谱测量系统的稳定性, 还具有可以灵活调节参数、方便快捷的优点, 易于满足不同应用的需要。

1 梯形(三角形)成形理论算法

所谓的梯形(三角形)成形就是将前放输出的指数衰减的脉冲信号, 成形为等腰梯形(三角形)脉冲。并且该梯形(三角形)的斜边和平顶宽度均可调整, 当平顶宽度取零时, 梯形就变为三角形。

如图 1 所示, 设成形后的梯形(三角形)上升沿宽度为 t_a , 波形总宽度为 t_c , $t_c = t_a + t_b$, A 为信号脉冲幅度, $u(t)$ 为阶跃函数:

收稿日期: 2014-09-10; 修回日期: 2014-10-30

基金项目: 江西省博士后科研基金资助项目(2014KY03); 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金资助项目(RGET1301)

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

根据函数的表达式, 可知梯形(三角形)的表达式为:

$$V_0 = \sum_{i=1}^4 y_i(t) \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{Atu(t)}{t_a} \\ y_2 = -\frac{A(t-t_a)u(t-t_a)}{t_a} \\ y_3 = -\frac{A(t-t_b)u(t-t_b)}{t_a} \\ y_4 = \frac{A(t-t_c)u(t-t_c)}{t_a} \end{cases} \quad (3)$$

如图 1 所示, D 为梯形(三角形)平顶宽度, $t_b = t_a + D$ 。

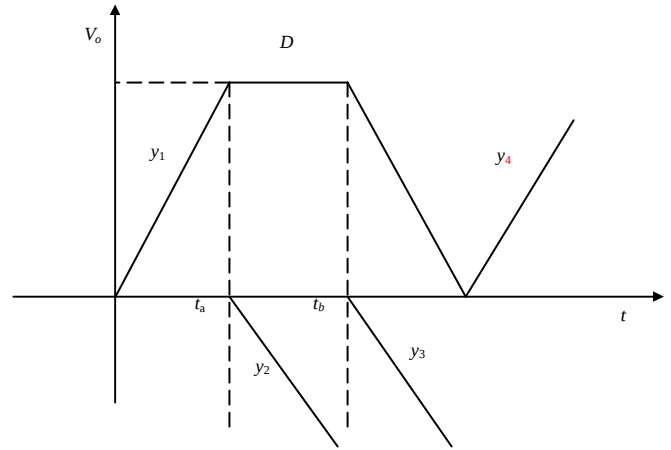


Fig.1 Diagram of trapezoidal(triangular) shaping
图 1 梯形(三角形)脉冲成形示意图

2 梯形(三角形)成形的模型建立

设 M 为指数信号样的延迟时间常数, 设 k 为梯形(三角形)的上升时间, 让梯形(三角形)平顶的延时时间 $m = l - k$ 。根据:

$$s(n) = r(n) + Mp(n) + (k - M)p(n - k) - r(n - l) \quad (4)$$

输入信号的条件响应系统可以写成下面等式:

$$\begin{aligned} s(n) = & \sum_{i=0}^n \left\{ \sum_{j=0}^i [v(j) - v(j - k)] - v(i - k)k \right\} + M \sum_{i=0}^n [v(i) - v(i - l)] + \\ & (k - M) \sum_{i=0}^n [v(i - k) - v(i - l - k)] - \sum_{i=0}^n \left\{ \sum_{j=0}^i [v(j - l) - v(j - k - l)] - v(i - k - l)k \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

设:

$$d^{k,i}(j) = v(j) - v(j - k) - v(j - l) + v(j - k - l) \quad (6)$$

则:

$$s(n) = \sum_{t=0}^n \sum_{j=0}^t d^{k,j}(j) + d^{k,i}(i)M \quad (7)$$

式(7)写成的递推形式如下:

$$s(n) = s(n - 1) + p'(n) + d^{k,l}(n)M, \quad n \geq 0 \quad (8)$$

式中:

$$p'(n) = p'(n - 1) + d^{k,j}(n), \quad n \geq 0 \quad (9)$$

式(6)~式(7)和式(9)即为梯形(三角形)的递推算法模型, 该算法可以使指数的输入信号产生一个递推梯形(三角形), 其中 k 为梯形(三角形)的斜边长度, l 为斜边长度加上上部平顶, M 为输入脉冲的成形时间。当 $k = l$ 时, 产生的是一个三角形, 输出幅度使用下式进行归一:

$$V_{\text{out}}(n) = \frac{S(n)/l}{M} \quad (10)$$

根据式(8)~式(10), 可以利用较少的硬件模块组建一个简单的脉冲处理电路。

3 梯形(三角形)脉冲成形的仿真

利用 Matlab7.0 实现了脉冲梯形(三角形)成形算法的仿真。首先采用理想的负指数信号进行模拟成形。模拟的负指数信号为 $Y(i) = 1000 \times \exp((20 - i)/100)$, 式中 $Y(i)$ 为输出信号, i 为采样时间单元。单个负指数脉冲信号的梯形成形仿真波形图, 结合双输入信号梯形成形仿真共同介绍。

接下来模拟双脉冲的脉冲成形, 如式(11), 成形结果如图 2 所示。

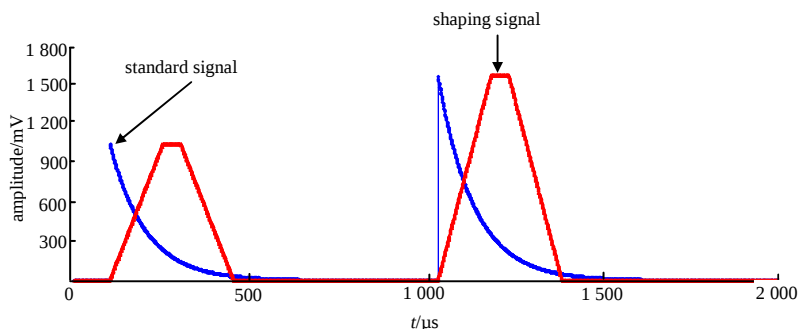


Fig.2 Simulation waveforms of trapezoidal shaping for two pulse signals

图 2 双脉冲信号梯形成形仿真的波形

$$\begin{cases} Y(i) = 200 \times \exp((100 - i)/200) \\ Y(i) = 400 \times \exp((1000 - i)/200) \end{cases} \quad (11)$$

使用式(12), 模拟叠加双脉冲的分离成形图, 如图 3 所示。

$$\begin{cases} Y(i) = 200 \times \exp((100 - i)/200) \\ Y(i) = 400 \times \exp((500 - i)/200) \end{cases} \quad (12)$$

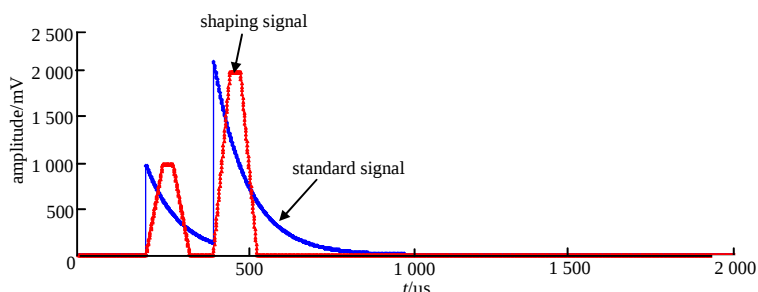


Fig.3 Simulation waveforms of trapezoidal shaping for pulse superposition

图 3 叠加脉冲梯形分离仿真的波形

实测脉冲数据的梯形(三角形)成形结果如图 4 所示。输入信号是利用 Moxtek 公司的 Si-PIN 半导体探测器实测得到, 实际信号宽度约为 $20 \mu\text{s}$ 。

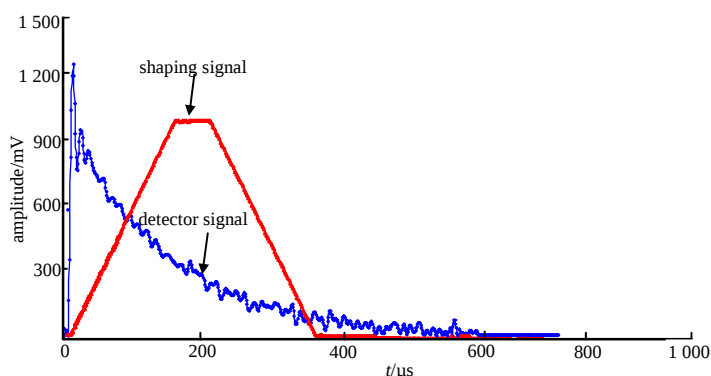


Fig.4 Simulation waveforms of trapezoidal shaping for actual nuclear signal

图 4 实际核脉冲信号梯形成形仿真的波形

采用 3 种梯形(三角形)成形参数进行了脉冲成形后的形状对比(见图 5)。梯形(三角形)成形曲线 3 的成形参数为 $k=50$, $l=80$, $M=138$; 梯形(三角形)成形曲线 1 的成形参数为 $k=100$, $l=150$, $M=138$; 梯形(三角形)成形曲线 2 的成形参数为 $k=150$, $l=200$, $M=138$ 。

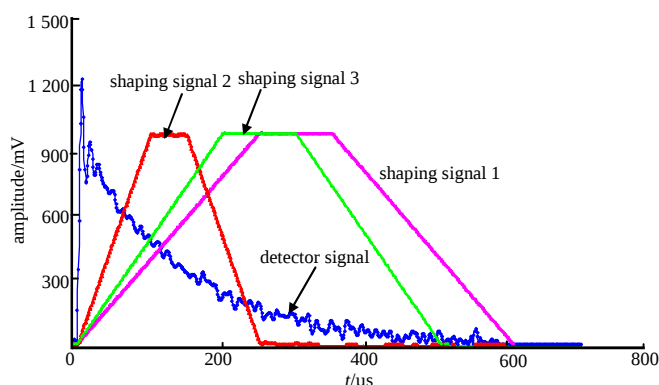


Fig.5 Simulating waveforms of trapezoidal shaping with different factors

图 5 不同成形参数梯形成形仿真的波形

4 结论

使用梯形(三角形)成形滤波算法对核脉冲信号进行处理, 可以提高系统的时间和能量分辨力。通过在 Matlab7.0 软件中对理想核脉冲信号和实际探测器输出信号进行梯形成形, 可观测到成形后曲线下沿很快, 对于提高测量系统的计数率, 降低系统的死时间有一定的意义, 使得数字核能谱测量系统有更好的稳定性、抗干扰性和保真性。

参考文献:

- [1] 王芝英,楼滨乔,朱俊杰,等. 核电子技术原理[M]. 北京:原子能出版社, 1989. (WANG Zhiying, LOU Binqiao, ZHU Junjie, et al. Principle of Nuclear Electronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1989.)
- [2] 王经瑾,范天民,钱永庚. 核电子学[M]. 北京:原子能出版社, 1989. (WANG Jingjin, FAN Tianmin, QIAN Yonggeng. Nuclear Electronics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1989.)
- [3] Radeka V. Trapezoidal filtering of signals from large germanium detectors at high rates[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1972, 99(3):525-539.
- [4] Goulding F S. Pulse-shaping in low-noise nuclear amplifiers: a physical approach to noise analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1972, 100(3):493-504.
- [5] 周清华,张钦玉,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. (ZHOU Qinghua, ZHANG Ruanyu, LI Taihua. Matlab based researching method of trapezoidal shaping filter[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2007, 44(1):111-114.)
- [6] 周建斌,王敏,方方,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. (ZHOU Jianbin, WANG Min, FANG Fang, et al. Key technology research of nuclear signal digital pulse shaping in real time[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(2):352-356.)
- [7] ZHOU Jianbin, ZHOU Wei, HONG Xu. Improvement of digital S-K filter and its application in nuclear signal processing[J]. Nuclear Science and Techniques, 2013, 24(3):060401.
- [8] ZHOU Jianbin, HONG Xu, ZHOU Wei, et al. Study of recursive model for pole-zero cancellation circuit[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25(01):010403.
- [9] 周伟,周建斌,方方,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):188-189. (ZHOU Wei, ZHOU Jianbin, FANG Fang, et al. Simulation of digital Gaussian filtering based on Sallen-Key filter[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(1):188-189.)
- [10] 王敏,周建斌,周伟,等. X 荧光分析仪中数字基线估计的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1):233-236. (WANG Min, ZHOU Jianbin, ZHOU Wei, et al. The study of baseline estimated in digital XRF analyzer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(1):233-236.)