

doi: 10.11720/wtyht.2015.2.17

周伟,周建斌.基于双参数模型的核脉冲信号数字高斯成形技术[J].物探与化探,2015,39(2):318-321.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.17>
Zhou W,Zhou J B.Study of nuclear pulse signal digital Gaussian shaping based on dual-factor model[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2015,39(2):318-321.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.2.17>

基于双参数模型核脉冲信号数字高斯成形技术

周伟^{1,2,3},周建斌³

(1. 东华理工大学 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室,江西 南昌 330013;2. 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;3. 成都理工大学 核技术学院,四川 成都 610059)

摘 要: 阐述了一种基于脉宽和幅度双参数的新型核脉冲信号数字高斯成形模型的研究方法。以 Sallen-Key 滤波器(以下简称 S-K 滤波器)为基础,运用基尔霍夫电流定律建立输入信号 V_i 和输出信号 V_o 之间的数学关系方程。方程解算过程中,引入脉宽和幅度双因子进行参数替代,并运用数值微分算法迭代得到一个核脉冲信号数字高斯成形的数值递推模型。通过标准指数衰减信号和实际核信号仿真验证了该模型的正确性,也进行了成形参数的确定。最后,实测⁵⁵Fe 核素标准谱线的结果显示在能量色散 X 荧光分析系统中应用数字高斯成形技术,提升了系统能量分辨率和计数通过率等性能指标,收到了良好效果。

关键词: 核信号;S-K 滤波器;数字高斯成形;双参数模型;数值微分算法

中图分类号: P631.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)02-0318-04

核分析技术具有高精度、高灵敏度、微量等特点,能够提供其他检测手段所不能提供的信息,为多种学科的基础研究提供了灵敏而精确的实验方法和分析手段。相应的,核仪器的发展也一直受到人们广泛关注^[1-3]。20 世纪 90 年代以来,随着电子技术的高速发展及其在核仪器中的应用,数字化已成为核仪器发展的主要方向。核仪器数字化的关键技术是数字脉冲成形技术,已成为近年来核信号处理最为活跃的研究领域。核仪器中半导体探测器和电荷灵敏前置放大器系统的输出信号可描述为基于一个时间常数的指数衰减信号。通常,该信号不能满足后续信号处理模块在信号噪声比和能量分辨率等方面的要求。为此,必须对指数衰减信号进行脉冲成形处理。高斯波形的脉冲信号在信号噪声比、能量分辨率和弹道亏损等方面具有良好的综合表现。因此,核脉冲信号成形通常以高斯波形信号为目标^[4-13]。

在核脉冲信号高斯成形的研究过程中,国内研究人员通常首先利用数学理论计算建立高斯成形的

数学模型,然后通过计算机软件仿真的形式给出最终测试结果,而很少有实际应用的报道。陈世国^[14-15]等以小波分析技术为基础,通过分析指数衰减信号高斯脉冲成形的理论,选择合适的小波基函数和尺度基函数,在不同尺度参数的情况下模拟了标准指数信号的高斯成形,并分时实现了单个辐射粒子的数字高斯成形。李东仓^[16-17]等以 S-K 滤波器为理论基础,利用传递函数的规律建立高斯成形模型,并通过 PSIM 软件仿真验证了该数学模型。在笔者的前期研究工作中,初步探讨了数字高斯成形算法的数值递推模型,也进行了部分测试工作^[18-20]。分析成形模型和试验结果,在前期模型中只设计了一个成形参数 k 调节输出信号

$$y_n = \frac{(k + 2k^2)y_{n-1} - k^2y_{n-2} - 2x_n}{1 + k + k^2},$$

导致调整 k 时输出信号的幅度和脉宽会同时变化,很难兼顾控制。笔者拟引入幅度因子和脉宽因子的双参数模型,对输出信号的幅度和脉宽进行独立控制。使得数字高斯成形输出的脉冲信号在幅度和宽

收稿日期:2014-07-17

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目课题(2012AA06180403);放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金(RGET1301)

度都能满足实际应用的需要,进而进一步提升整体系统综合性能指标。

1 S-K 滤波器介绍

S-K 滤波器是一种信号处理中常用的有源滤波电路。该电路有高通和低通 2 种形式^[16],由于采用了部分正反馈控制,具有较大的品质因数,将其应用于核脉冲信号的滤波成形,可以在较少的级数下得到高斯波形。图 1 是 S-K 滤波器电路原理。

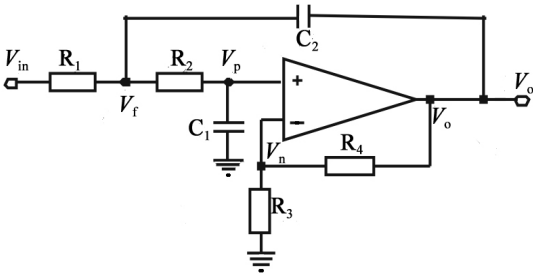


图 1 S-K 滤波器电路原理

2 双参数高斯成形模型的数值微分分析

图 1 中标记 4 个节点(节点 1~4),分别标识对应的电压 V_f , V_p , V_n 和 V_o 。根据 KCL 定律(Kirchhoff current law),建立 4 个传递公式:

$$\frac{V_{in} - V_f}{R_1} = \frac{V_f - V_p}{R_2} + C_2 \frac{d(V_f - V_o)}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{V_f - V_p}{R_2} = C_1 \frac{dV_p}{dt}, \quad (2)$$

$$V_n = V_o \frac{R_3}{R_3 + R_4}, \quad (3)$$

$$V_n = V_p. \quad (4)$$

上述式取 $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, 令 $a=\frac{R_3+R_4}{R_3}$, 则得到

$$aV_n = V_o. \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)、(2)和(4)得到

$$aV_{in} = (RC)^2 \frac{d(dV_o/dt)}{dt} + RC(3-a) \frac{dV_o}{dt} + V_o,$$

将上式变换为

$$(RC)^2 y'' + RC(3-a) y' + y = ax,$$

再采用微分数值法将其变换为

$$\begin{aligned} & (RC)^2 \frac{\frac{y_{n+1} - y_n}{\Delta t} - \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t}}{\Delta t} + \\ & RC(3-a) \frac{y_{n+1} - y_n}{\Delta t} + y_{n+1} = ax \end{aligned}$$

合并整理后,得

$$\begin{aligned} & \left[\left(1 + \frac{RC(3-a)}{\Delta t} + \left(\frac{RC}{\Delta t} \right)^2 \right) y_{n+1} = \right. \\ & \left. \left[\frac{RC(3-a)}{\Delta t} + 2 \left(\frac{RC}{\Delta t} \right)^2 \right] y_n - \left[\left(\frac{RC}{\Delta t} \right)^2 \right] y_{n+1} + ax, \right. \end{aligned} \quad (6)$$

令 $\left(\frac{RC}{\Delta t} \right)^2 = k$, 将式(6)变换为

$$\begin{aligned} & (1 + k(3-a) + k^2) y_{n+1} = \\ & (k(3-a) + 2k^2) y_n - k^2 y_{n-1} + ax, \end{aligned}$$

据此可以得到

$$\begin{cases} y_n = \frac{(2k^2 + (3-a)k) y_{n-1} - k^2 y_{n-2} + ax_n}{k^2 + (3-a)k + 1}, & n \leq 0 \\ y_n = 0, & n \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

综上所述,核脉冲信号的数字高斯成形后的输出信号可以通过式(7)递推调用实现。其中, k 、 a 表示高斯成形输出信号的调整参数,调整 k 、 a 可以分别调整输出高斯波形的脉冲宽度和脉冲幅度,因此,把 k 定义为脉宽因子,把 a 定义为幅度因子。

3 模型的仿真验证

VBA(visual basic for applications)是 Visual basic 的一种宏语言,常用以拓展 Windows 应用程序的功能,特别是 Office 软件。利用 VBA 技术增加常用软件的应用功能,使其具备数据运算和图形绘制的能力。笔者构建了基于 VBA 技术的数字成形理论算法的软件测试平台,编写相应数值递推模型算法的程序代码,完成了标准信号、实测信号和成形输出信号的软件仿真测试。

3.1 仿真产生标准指数衰减信号

在核能谱分析仪中,如果辐射粒子在探测器中产生的电荷被瞬时收集,则探测器和电阻反馈型电荷灵敏前置放大器的输出可描述为指数衰减信号,探测器和脉冲复位型电荷灵敏前置放大器系统输出的阶跃信号,也可以认为是衰减常数为无穷大的指数衰减信号^[2-3]。因此,指数衰减信号是脉冲成形单元处理的主要信号形式。标准指数衰减信号描述为

$$y = Ae^{-x/\tau}$$

式中, A 为信号幅度, τ 为信号衰减常数。在 VBA 仿真平台中编写相应的程序代码,可以仿真产生不同要求的指数衰减信号。

3.2 标准指数衰减信号的数字高斯成形仿真

同样基于 VBA 仿真平台,以公式(7)为数学模型,编写相应的程序代码,可以实现标准指数衰减信号的双参数高斯成形的仿真。仿真测试中,选取一组 $A=1000$, $\tau=30$ 的指数衰减信号作为输入量。图

2 是标准指数衰减信号不同成形参数下高斯成形的仿真波形。

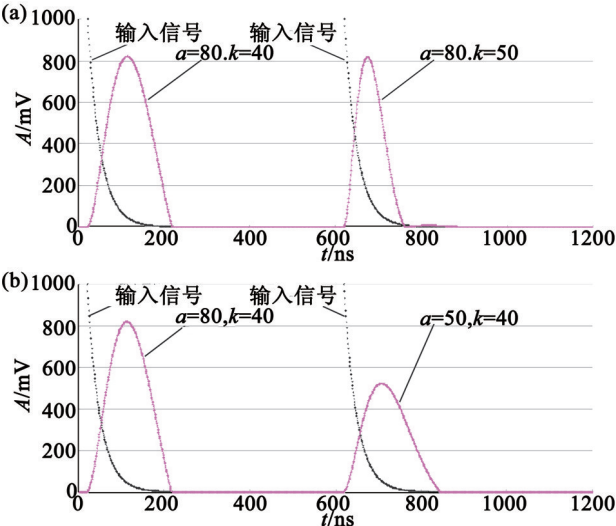


图 2 标准指数衰减信号不同成形参数下高斯成形的仿真波形

3.3 实际核信号的数字高斯成形仿真

标准指数衰减信号的仿真测试后,双参数高斯成形模型还需进行实际核信号的验证。首先,构建基于“ADC+FPGA”技术的硬件平台,实时获取高速核信号;其次,在 Excel 软件平台中将采集的核信号成图;最后,基于 VBA 软件平台,编写相应的程序代码,完成对实际核信号的数字高斯成形。图 3 是实测⁵⁵Fe 核素信号不同成形参数下高斯成形的仿真波形。硬件平台中,采用了 Si-PIN 半导体探测器 XR-100CR。

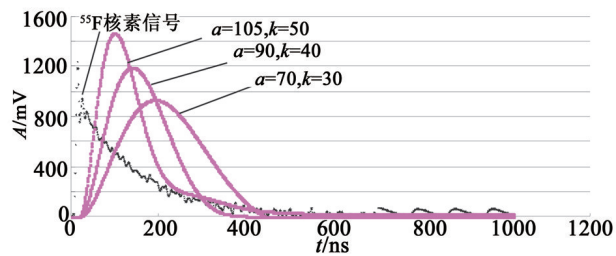


图 3 ⁵⁵Fe 核素信号不同成形参数下高斯成形的仿真波形

经过仿真测试,双参数模型能够较好的实现标准指数衰减信号和实际核信号的数字高斯成形。并且,调整模型中的参数 a 和 k 使得成形后输出信号在幅度和脉宽上实现了独立控制,增强了模型的灵活性和实用性。

4 系统测试

4.1 数字高斯成形模型的硬件实现

整个数字核能谱系统由探测器、前置放大器、主放大器、高速 ADC、FPGA 处理和接口单元等模块组成(图 4)。

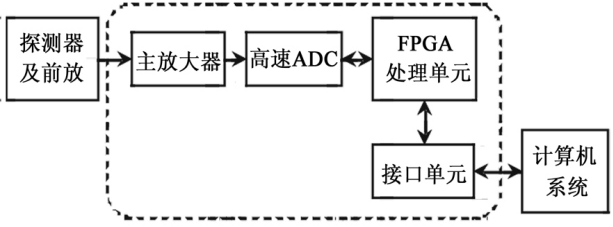


图 4 核能谱系统硬件结构

系统硬件设计核心之一是在 FPGA 处理模块内部实现核脉冲信号数字化处理。图 5 虚线框内是 FPGA 内部实现的功能结构。首先,ADC 控制模块将读入 ADC 器件转换的结果;然后,再由成形模块完成对 ADC 结果进行高斯成形;最后,再进行多道脉冲幅度分析。

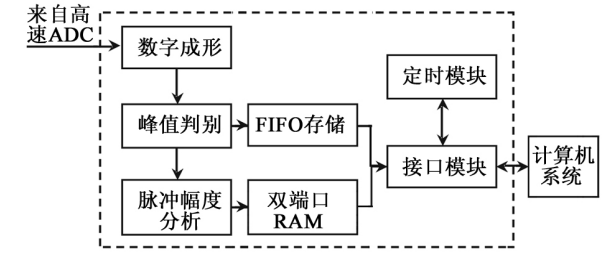


图 5 FPGA 内部功能结构

4.2 实际谱线测试

在完成线形放大、核脉冲信号数字处理、数据通信和上位机分析软件等能谱系统软、硬件设计后,实际测试了⁵⁵Fe 核素的标准谱线(图 6)。经过分析计算,能量分辨率 FWHM=160 eV,与国外数字化 X 荧光谱仪测量结果相近(该探测器标称能量分辨率为 155 eV)。

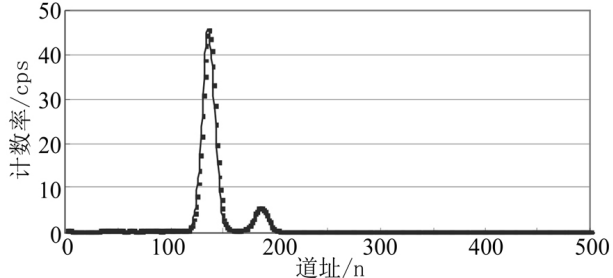


图 6 实测⁵⁵Fe 核素谱线

实际应用中还加入了一定的脉冲宽度选择逻辑,可以很好地抑制干扰等。对比传统的模拟式 MCA,系统可用的有效测量道提高到 4~1 023(对于 1 024 道的分析系统),取消了上下阈甄别电路,脉冲成形时间也缩短到 5~6 μ s。

5 结论

以 S-K 滤波器为理论基础,运用二阶微分方程微分数值法,笔者提出了一种新型基于脉宽和幅度

双参数的核脉冲信号数字高斯成形模型,通过计算机仿真和实际测试都证明了该成形模型的正确性。将该模型成功地应用到 X 荧光分析仪中,取得了良好的应用效果。整个系统开发过程中,数字高斯成形模型的建立与求解和 FPGA 内部成形模型的实现是开发的关键。同时,也得益于计算机的仿真功能带来的便利,确定了成形参数。

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.

[2] 王经瑾,范天民,钱永庚.核电子学[M].北京:原子能出版社,1989.

[3] 复旦大学,清华大学,北京大学.原子核物理实验方法(上)[M].北京:原子能出版社,1981.

[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] Koeman H. Filtering of signals obtained from semiconductor radiation detectors [M]. Philips Research Lab Endogen, The Netherlands(1973).

[6] Koeman H. Principle of operation and properties of a transversal digital filter [J]. Nuclear Instruments and Methods, 1975, 123(1): 169-180.

[7] Koeman H. Practical performance of the transversal digital filter in conjunction with X-ray detector and preamplifier[J]. Nuclear Instruments and Methods. 1975, 123(1): 181-187.

[8] Goulding F S. Some aspects of detectors and electronics for X-ray fluorescence analysis[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1977, 142(1-2): 213-223.

[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 [J]. 1994, 345(2): 337-345.

[10] Jordanov V T, Knoll G F, Huber A C. 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.

[11] Jordanov V T, Knoll G F. Digital pulse-shape analyzer based on fast sampling of an integrated charge pulse [J]. IEEE Transactions on Nuclear science, 1995, 42(4 pt 1): 683-687.

[12] Jordanov V T, Pantazis J A, Huber A C. Compact circuit for pulse rise-time discrimination [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1996, 380(1-2): 353-357.

[13] Jordanov V T. Real time digital pulse shaper with variable weighting function [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 505(1-2): 347-351.

[14] 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): 2282-2287.

[15] 陈世国,吉世印,刘万松.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.

[16] 李东仓,杨磊,田勇,等.基于 Sallen-Key 滤波器的核脉冲信号成形电路研究[J].核电子学与探测技术, 2008, 28(3): 563-566.

[17] 杨磊,李东仓,吕振肃,等.仿核脉冲的高斯分布信号发生器[J].自动化仪表, 2007, 28(5): 29-31.

[18] 周伟.基于数字高斯成形技术的 X 荧光仪的研制[D].成都理工大学,2011.

[19] 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.

[20] Zhou Jianbin, Zhou Wei, Lei Jiarong, et al. Study of time-domain digital pulse shaping algorithms for nuclear signal [J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, 23(3): 150-155.

A study of nuclear pulse signal digital Gaussian shaping based on dual-factor mode

ZHOU Wei^{1,2,3}, ZHOU Jian-Bin³

(1.State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2.Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, Ministry of Education, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 3.Chengdu University of Technology, Institute of Nuclear, Chengdu 610059, China)

Abstract: The study of a novel model for digital nuclear pulse signal Gaussian shaping based on amplitude factor and width factor is described in this paper. According to Sallen-Key filter (S-K filter in short), four formulae are established between the input and the output depending on Kirchhoff Current Law. With dual-factor parameter substitution, a general numerical recursive root is obtained by applying numerical differentiation algorithm. The correctness of the model is verified by computer simulation through the standard exponential decay signal and actual nuclear signal. The shaping factors are also confirmed. Finally, the digital Gaussian shaping technique is applied to the Energy Dispersive X-Ray Fluorescence system and, as a result, the spectrum of ⁵⁵Fe is obtained. Testing results show that digital shaping technique can improve the performance of the EDXRF system in such aspects as energy resolution and count ratio.

Key words: nuclear signal; S-K filter; digital Gaussian shaping; dual-factor model; numerical differentiation algorithm

作者简介: 周伟(1979-),男,副教授,博士,从事核方法与核仪器仪表的研究。E-mail:zhouwei@cdut.edu.cn