

核脉冲信号数字高斯成形模型的建立与仿真

周伟^{1,2}, 周建斌², 方方², 朱星², 刘易², 李扬红²

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:详细阐述了一种以 Sallen-Key 滤波器为基础的新型数字高斯成形的办法。运用二阶微分方程建立高斯成形数学模型, 在模型解算过程中利用数值微分算法得到一个通用的输入信号与输出信号的数值递推解, 从而实现了核脉冲信号的数字高斯成形。通过标准指数信号的模拟以及实际测量信号的模拟, 确定了数字高斯成形的参数。

关键词:核脉冲信号; Sallen-Key 滤波器; 数字高斯成形; 数值微分法

中图分类号: P631.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)02-0260-03

核信息的获取和处理作为一种常见的研究手段, 在许多基础科学研究和应用科学研究中起着重要的作用。凭借灵敏度高、准确度好、微区、微量和无损、多元素同时分析等优点, 核分析技术在地质资源勘查、环境辐射评价、材料科学、生物医学、考古学等众多学科领域中得到广泛应用^[1]。相对应的, 核仪器的发展一直受到人们广泛的关注。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必然方向。数字脉冲成形技术是核仪器数字化的关键, 已跻身到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^[2-5]。

1 Sallen-Key 滤波器介绍

Sallen-Key 滤波器(简称 S-K 滤波器)是一种信号处理中常用的有源滤波电路, 1955年由 R. P. Sallen 和 E. L. Key 提出。该电路有高通 S-K 滤波器和低通 S-K 滤波器 2 种形式。由于采用了部分正反馈控制, 该电路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。

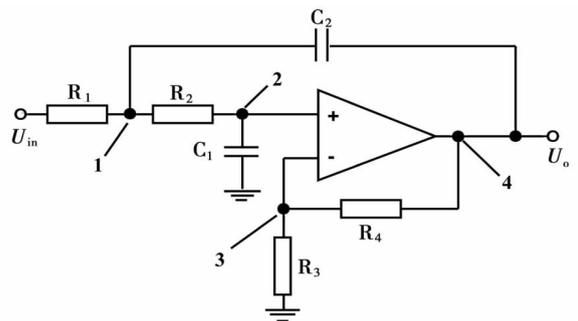


图 1 S-K 滤波器电路原理

基于分立元件设计的 S-K 滤波器, 在噪声抑制、信号堆积、谱峰漂移和工作稳定性等方面存在着诸多不足。此外, 真正的高斯脉冲成形具有反因果部分, 模拟系统难以实现。而将 S-K 滤波器数字化处理后, 可以克服上述模拟系统的诸多不足, 在提高整个测量系统综合指标的同时也增强了系统的维护性和通用性。

2 高斯成形数学模型的建立

图 1 中标记 4 个节点(节点 1~4), 分别标识对应的电压 U_f 、 U_p 、 U_n 和 U_o 。根据 KCL 定律(Kirchhoff Current Law), 建立如下 4 个电压传递公式:

$$\frac{U_{in} - U_f}{R_1} = \frac{U_f - U_p}{R_2} + C_2 \frac{d(U_f - U_o)}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{U_f - U_p}{R_2} = C_1 \frac{dU_p}{dt}, \quad (2)$$

$$U_n = U_o \frac{R_3}{R_3 + R_4}, \quad (3)$$

$$U_n = U_p. \quad (4)$$

式(1)~式(4)中,取 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R, C_1 = C_2 = C$,则可以联合推导出:

$$\frac{U_{in} - U_f}{R} = \frac{U_f - U_p}{R} + C \frac{d(U_f - U_o)}{dt}, \quad (5)$$

$$(U_f - U_p)/R = CdU_p/dt, \quad (6)$$

$$U_p = U_o/2。 \quad (7)$$

再将式(5)~式(7)联合推导出:

$$U_{in} - \left(\frac{U_o}{2} + \frac{RC}{2} \cdot \frac{dU_o}{dt}\right) = \left(\frac{U_o}{2} + \frac{RC}{2} \cdot \frac{dU_o}{dt}\right) - \frac{U_o}{2} + RC \cdot \frac{d\left(\frac{U_o}{2} + \frac{RC}{2} \cdot \frac{dU_o}{dt}\right)}{dt} - RC \frac{U_o}{dt}, \quad (8)$$

将式(8)化简,得:

$$2U_{in} = (RC)^2 \cdot \frac{d(dU_o/dt)}{dt} + RC \frac{dU_o}{dt} + U_o, \quad (9)$$

将式(9)变换为:

$$(RC)^2 y'' + RCy' + y = 2x。 \quad (10)$$

式(10)中, x 表示某时刻 t 输入电压 U_{in} , y 表示对应时刻输出电压 U_o 。

综上所述,基于 S-K 滤波器的高斯成形模型可以归纳为一个 $y = f(x)$ 数学函数。根据式(10)可知,该函数是一个非齐次二次微分方程的根。因此,通过解算该方程,可以得出高斯成形后脉冲信号输出的数学关系模型。

采用微分数值法将式(10)变换为

$$(RC)^2 \times \frac{\left(\frac{y_{n+1} - y_n}{\Delta t} - \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t}\right)}{\Delta t} + [RC(y_{n+1} - y_n)/\Delta t] + y_{n+1} = 2x, \quad (11)$$

将式(11)进行合并整理后,得

$$[1 + (RC/\Delta t) + (RC/\Delta t)^2] y_{n+1} = [RC/\Delta t + (RC/\Delta t)^2] y_n - (RC/\Delta t)^2 y_{n-1} + 2x。 \quad (12)$$

令 $RC/\Delta t = k$,将式(12)变换为

$$(1 + k + k^2)y_{n+1} = (k + k^2)y_n - k^2 y_{n-1} + 2x。 \quad (13)$$

根据式(13)可以得到

$$y_0 = 2x_0/(1 + k + k^2), \quad (14)$$

$$y_1 = \frac{(k + k^2)y_0 + 2x_1}{1 + k + k^2}, \quad (15)$$

$$y_2 = \frac{(k + k^2)y_1 - k^2 y_0 + 2x_2}{1 + k + k^2}, \quad (16)$$

.....

$$y_n = \frac{(k + k^2)y_{n-1} - k^2 y_{n-2} + 2x_n}{1 + k + k^2}, \quad (17)$$

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(17)递推调用实现。其中 k 表示高斯成形输出信号的调整参数,调整 k 可以设定输出高斯波形的脉冲宽度。

3 模型的计算机仿真

借助计算机仿真工具验证式(17)数字高斯成形模型的正确性。模型的仿真以 Excel 软件为开发平台,编写相应功能的宏程序实现的。具体的仿真过程分为 3 个步骤:①模拟标准指数信号;②模拟基于标准指数信号的高斯成形信号;③模拟实际探测器信号的高斯成形信号。

(1)标准指数信号的仿真。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,则辐射探测器和电阻反馈型电荷灵敏前置放大器系统的输出信号可用指数衰减信号描述。辐射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。指数衰减信号是脉冲成形单元处理的主要信号形式。标准指数信号是通过

$$y = I \exp(-x/\tau) \quad (18)$$

来实现。式(18)中, I 表示模拟信号的幅度, τ 表示模拟信号的衰减常数(也是脉冲信号的成形时间)。图 2 是标准指数信号的仿真波形。

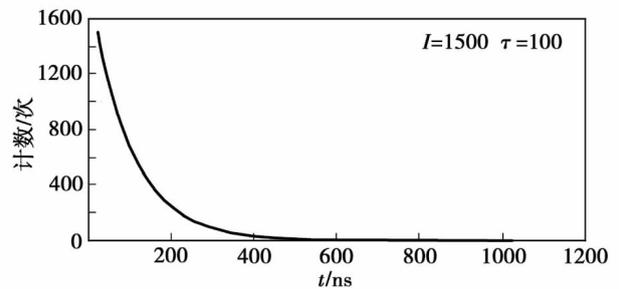


图 2 标准指数信号的仿真波形

(2)标准指数信号的高斯成形仿真。使用相同的方法,通过递推调用式(17),可以实现标准指数信号的高斯成形的仿真。图 3 是标准指数信号的高斯成形仿真的波形。

(3)实测探测器输出信号的高斯成形仿真。在仿真标准指数信号和相应的高斯成形模型的基础上,又对实际的核脉冲信号进行了高斯成形模型的仿真。仿真实测的核脉冲信号是美国 AMPTEK 公司的 Si-PIN 半导体探测器 XR-100CR 测量⁵⁵Fe 核素的输出信号经过高通滤波、线形放大、高速 ADC 采样后得到的。图 4 是实测核脉冲信号与高斯成形后的仿真波形。

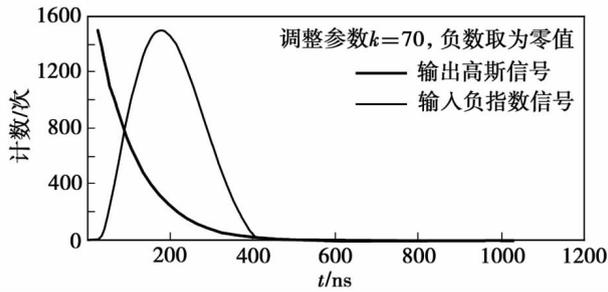


图3 标准指数信号的高斯成形仿真波形

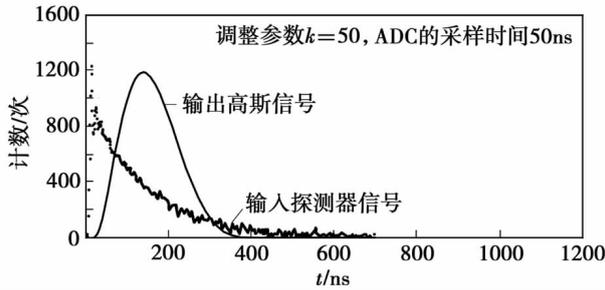


图4 实测核脉冲信号与高斯成形后的仿真波形

通过上述3种情况的计算机仿真,从而验证了式(17)高斯成形数学模型的正确性。同时,在理论方法上也证明了以S-K滤波器为电路模型,通过研究电路信号传递规律,实现数字化核脉冲信号高斯成形的方法是正确可行的。

THE SIMULATION AND ESTABLISHMENT OF DIGITAL GAUSSIAN FILTERING ON NUCLEAR PULSE SIGNAL

ZHOU Wei^{1,2}, ZHOU Jian-bin², Fang Fang², ZHU Xing², LIU Yi², Li Yang-hong²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources & Mine Safety China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116; 2. School of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: A novel model of digital Gaussian filtering is presented in this paper based on Sallen-Key filter. Depending on a second-order differential equation, the authors obtained a general numerical recursive root between the input and the output by applying numerical differentiation algorithm, and implemented digital Gaussian filtering of nuclear pulse signal as well. The operator of the model is confirmed by standard index signal and actual measurement signal simulation.

Key words: nuclear pulse signal; Sallen-Key filter; digital Gaussian filtering; numerical differentiation algorithm

作者简介:周伟(1979-),男,博士,成都理工大学核方法与核仪器仪表专业。

4 结论

核仪器数字化的关键是数字脉冲成形技术。论文以S-K滤波器为基础,运用二阶微分方程数值解建立了一种新型的核脉冲信号的数字高斯成形模型,并借助计算机仿真功能证明了该模型的正确性。最后,以本文研究成果为基础,作者将进一步研究高斯脉冲成形的数字实现方法,为数字核能谱仪器中高斯脉冲成形技术应用提供坚实的技术基础。

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] Goulding F S, Landis D A. Signal processing for semiconductor detectors [J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1982, 29(3): 896-901.
- [3] Goulding F S. Gamma Sphere-elimination of ballistic deficit by using a quasi-trapezoidal pulse shaper [J]. IEEE on Nuclear Science, 1994, 41(4): 1140-1145.
- [4] 陈世国,吉世印,刘万松,等. 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.
- [5] 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.
- [6] 周伟,方方,周建斌,等. 基于无线传感网络的多点辐射监测系统的实现[J]. 物探与化探, 2011, 35(3): 379-381.