

数字核谱仪系统中脉冲幅度提取方法研究

张怀强^{1,2} 汤彬³ 吴和喜²

1 (核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地(东华理工大学) 南昌 330013)

2 (东华理工大学核工程与地球物理学院 南昌 330013)

3 (核技术应用教育部工程研究中心 南昌 330013)

摘要 数字核谱仪系统中脉冲幅度提取的准确性与实时性直接影响到系统的能量分辨率与脉冲通过率。本文对高速 ADC 采样后的数字核信号脉冲幅度提取方法进行研究,将幅度提取方法按直接比较法、曲线拟合法与滤波成形法的工作原理展开讨论。采用上述三种方法对实际采样的数字核信号进行脉冲幅度提取,在 40 MHz 的采样频率下,分别采用曲线拟合法与滤波成形法对脉冲幅度进行提取,得到各自的能谱。通过理论分析,实验比较与测试,综合能量分辨率与脉冲计数率的性能,得到最佳的脉冲幅度提取方法为滤波成形法。

关键词 数字核谱仪, 脉冲幅度提取, 直接比较法, 曲线拟合法, 滤波成形法

中图分类号 TL822

传统的模拟能谱仪系统受到多种不利因素的困扰:模拟滤波成形电路无法达到最佳的滤波效果;采用模拟滤波成形与峰值采样保持电路使得系统无法兼顾能量分辨率与脉冲通过率;由于更多地采用模拟信号处理方式,模拟电路的固有温漂、参数不易调节等问题导致系统稳定性、灵活性、抗干扰性差^[1]。随着 ADC 和数字信号处理技术的迅猛发展,以高速、高分辨率的 ADC 对输入核信号进行采样,应用高性能数字信号处理器(DSP、FPGA、CPLD 等)对脉冲幅度进行有效分析和提取为特点的数字核谱仪的实现已成为现实,核信号采集与处理的数字化是核谱仪发展与应用的主流方向^[2]。在数字核谱仪系统中,为得到最佳的能量分辨率与脉冲通过率,本文就高速、高分辨率 ADC 采样后的数字核信号脉冲幅度提取方法进行研究,通过理论分析与实验测试得到最佳的脉冲幅度提取方法。

1 基本原理

在数字核谱仪系统中,由于 ADC 前端无或仅有简单的滤波成形电路,同时系统摒弃了峰值采样保持电路,使得系统需要高速、高分辨 ADC 对前端的信号进行采样,然后采用高性能的数字信号处理器对采样后的信号进行分析与处理。在能谱测量中,为得到脉冲幅度的最大值,本文将脉冲幅度提取方法按工作原理分为直接比较法、曲线拟合法与滤波成形法。

1.1 直接比较法

该方法把 ADC 采样后的数据视为脉冲信号理想曲线的采样点数据,将脉冲信号的采样点序列最大值作为脉冲信号幅度,直接比较法的工作原理如图 1 所示。

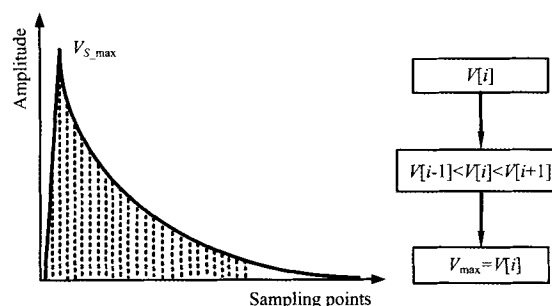


图 1 直接比较法工作示意图

Fig.1 Schematic diagram of direct comparison method.

其中, $t_{\max}$ 为脉冲幅度最大值的对应时间,此时脉冲幅度的最大值为 $V_{S_{\max}}$, $V[i]$ 表示第 i 点的采样值。 $V[i-1]$ 表示第 $i-1$ 点的采样值, $V[i+1]$ 表示第 $i+1$ 点的采样值, $V_{\max}$ 为采样序列的最大值,通过比较采样序列的大小得到,该方法的最终目的就是 $V_{\max}$ 尽可能的接近 $V_{S_{\max}}$ 。在不考虑噪声、基线漂移及脉冲堆积的情况下,ADC 采样频率越高, $V_{\max}$ 越接近 $V_{S_{\max}}$, 此时幅度提取越准确。

国家 863 项目(2012AA061804)、东华理工大学博士基金项目(DHBK201111)、核资源与环境教育部重点实验室开放基金项目(NRE1215)资助

第一作者: 张怀强, 男, 1981 年出生, 2011 年于成都理工大学获博士学位, 现东华理工大学教师, 讲师, 从事核技术及应用专业的科研与教学

收稿日期: 2013-03-01, 修回日期: 2013-04-10

1.2 曲线拟合法

通过对脉冲信号采样点序列进行其理想曲线的拟合, 反演计算出理想曲线的待定系数, 再通过正演计算得到脉冲信号幅度^[3]。以半导体探测器输出脉冲为例, 具体的工作原理如图 2 所示。

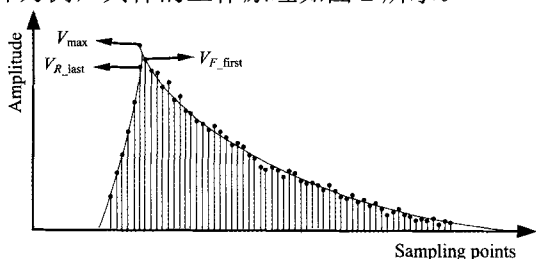


图 2 曲线拟合法工作示意图
Fig.2 Schematic diagram of curve fitting method.

数字化后的采样点数据如图 2 所示, 脉冲波形的后沿曲线方程为:

$$y = ke^{at} \quad (1)$$

通过对图 2 所示的后沿采样点数据进行式(1)的理想曲线拟合, 求出待定系数 k 和 a 。再由 k 和 a 的值, 代入脉冲幅度值点所处的时间, 计算出其脉冲幅度 $V_{\max}$ 。具体算法如下^[4]:

设数字化后的脉冲波形后沿各采样点幅值分别为 $y=y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}$, 对应归一化的采样点时间序列 $t=0, 1, 2, \dots, n-1$ 。对式(1)两边取对数得:

$$\ln y = \ln k + at \quad (2)$$

由式(2)可得偏差的平方和 M 为:

$$M = \sum_{i=0}^{n-1} [\ln y_i - (\ln k + ai)]^2 \quad (3)$$

对式(3)中的 $\ln k$ 和 a 分别求偏导并令其等于 0 得:

$$\frac{\partial M}{\partial (\ln k)} = 2 \sum_{i=0}^{n-1} [\ln y_i - (\ln k + ai)] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial a} = 2 \sum_{i=0}^{n-1} [\ln y_i - (\ln k + ai)]i = 0 \quad (5)$$

联立式(4)、式(5)可求得 k 和 a :

$$k = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln y_i - \frac{a}{n} \sum_{i=0}^{n-1} i\right)$$

$$a = (n \sum_{i=0}^{n-1} i \ln y_i - \sum_{i=0}^{n-1} i \sum_{i=0}^{n-1} \ln y_i) / [n \sum_{i=0}^{n-1} i^2 - (\sum_{i=0}^{n-1} i)^2]$$

式中, $\exp(x)$ 为数学表达式 e^x 。

实际上, 脉冲信号幅值受 ADC 采样率限制并未采集到, $V_{\max}$ 点介于 V_{R_last} (上升沿最后一个采样点) 和 V_{F_first} (下降沿第一个采样点) 之间, 具体位置是随机的, 实际应用中可近似地以 V_{R_last} 和 V_{F_first} 之间的中点对应的幅值作为 $V_{\max}$ 点。

1.3 滤波成形法

目前, 国内外数字核谱仪系统常采用滤波成形法对脉冲幅度信息进行提取, 如美国 XIA 公司与 OTREC 公司在其数字核谱仪系列产品中使用梯形滤波成形器; 美国 CANBERRA 公司在其数字核谱仪系列产品使用三角形与梯形滤波成形器^[5]; 而国内相关研究中^[6,7]也常用滤波成形法实现数字核信号的脉冲幅度分析与提取, 上述滤波成形器的实现可采用传递函数法, 以梯形滤波成形为例, 具体工作原理如图 3 所示。

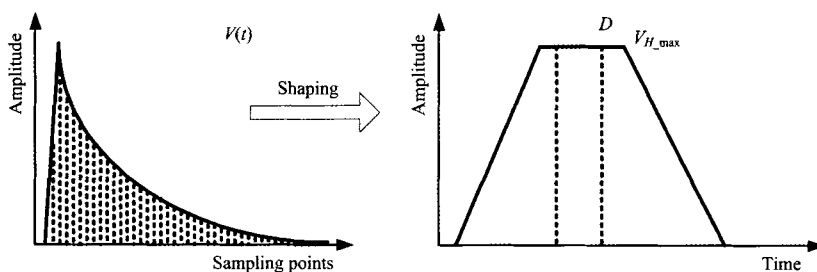


图 3 滤波成形法工作示意图
Fig.3 Schematic diagram of filter shaper method.

梯形滤波成形输出为:

$$V_o = \sum_{i=1}^4 y_i(t)$$

$$y_1 = Au(t) / t_a$$

$$y_2 = -A(t - t_a)u(t - t_a) / t_a$$

$$y_3 = -A(t - t_b)u(t - t_b) / t_a$$

$$y_4 = A(t - t_c)u(t - t_c) / t_a$$

A 为信号幅度, t_a 为梯形上升沿时间, D 为梯形平顶宽度, $t_b = t_a + D$, $t_c = t_a + t_b$ 为波形总宽度, $u(t)$ 为阶跃函数。设 T_s 为采样周期, 令 $n_a = t_a / T_s$, $n_b = t_b / T_s$, $n_c = t_c / T_s$, 对 V_o 进行 z 变换可得:

$$H(z) = \frac{V_o(z)}{V_i(z)} = \frac{(z^{-1} - z^{-(n_a+1)} - z^{-(n_b+1)} + z^{-(n_c+1)}) - \alpha(z^{-2} - z^{-(n_a+2)} - z^{-(n_b+2)} + z^{-(n_c+2)})}{n_a(1 - 2z^{-1} + z^{-2})} = \frac{z^{-1}(1 - \alpha z^{-1})(1 - z^{-n_a} - z^{-n_b} + z^{-n_c})}{n_a(1 - z^{-1})^2}$$

在对 $V_{H_{\max}}$ 提取的过程中, 由于梯形成形后的平顶并非一个理想的直线, 各处的幅值有一定的涨落, 在幅度提取中可以取固定点处或平顶上几点的平均值作为脉冲幅度, 采用多点平均方法提取脉冲幅度值, 由于平均了 N 点的噪声, 可以改善信噪比与微分非线性, 假定 ADC 输出信号噪声 $S(n)$ 是方差为 σ^2 、均值为 0 的独立白噪声时, 其功率谱为 $P(e^{j\omega}) = \sigma^2$, N 点平均后的噪声功率谱为 σ^2/N , 微分非线性可进一步降低为 m/N (m 为 ADC 的微分非线性)。 N 可取 2^n 个点, 在数字信号处理中, 除以 2^n 只需将数据向右移 n 位即可, 但其必须小于平顶宽度的采样点数, 其最大值 $N_{\max} = D/T_s$ 。

2 方法比较

系统采用美国 Moxtek 公司的 XPIN-XT 型 Si-PIN 探测器与 MAGNUM 系列的 50 kV 的 X 光管作为激发源, 测量某钢尺, 设定光管电压为 20 kV, 电流为 2 μ A, ADC 前端信号调理电路输出的核脉冲信号的上升沿时间为 50 ns, 下降沿为 3.3 μ s, 其波形如图 4 所示。

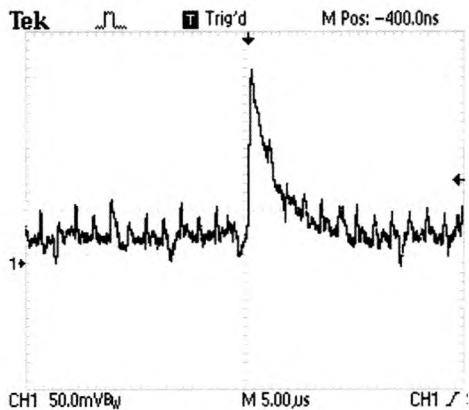


图 4 ADC 采样前的核脉冲信号
Fig.4 Nuclear pulse signal before ADC sampling.

采用 AD9224(12 Bit, 40 MHz)对前端信号进行采样, 由于脉冲上升沿时间为 50 ns, 下降沿时间为

$$V_o(z) = Az(1 - z^{-n_a} - z^{-n_b} + z^{-n_c}) / n_a(z - 1)^2$$

幅度为 A , 时间常数为 T 的单指数函数形式

$$V_i(t) = Ae^{-t/T}, \text{ 其 } z \text{ 变换为: } V_i(z) = Az / (z - e^{-T_s/T}),$$

令 $\alpha = e^{-T_s/T}$, 单指数信号梯形成形的传递函数为^[8]:

3.3 μ s, 同时系统存在噪声, 25 ns(40 MHz)的采样周期不可能准确采样到脉冲幅度的最大值, 考虑到系统成本与后续数字信号处理器的计算能力与存储空间, 采样频率不可能无限增大, 故直接比较法在数字核谱仪系统实际应用中基本不予采用。系统对 ADC 采样后的脉冲采样点序列在 FPGA 中实现梯形滤波成形, 通过 DAC 转换与示波器采样后得到如图 5 所示的梯形成形(近似于三角形)。

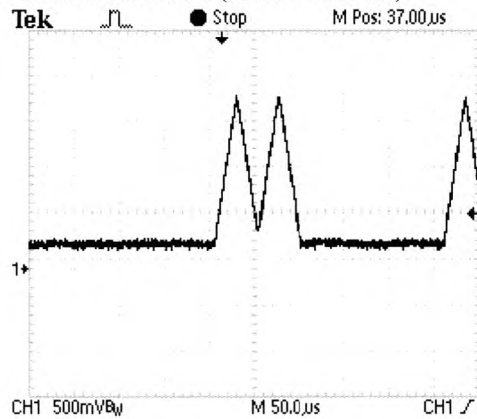


图 5 FPGA 中梯形成形
Fig.5 Trapezoidal shape of FPGA.

分别采用曲线拟合法(拟合参数: $k=450$, $\alpha=-1.7125$), 梯形滤波成形法(成形参数: $t_a=12\mu$ s, $D=0.5\mu$ s)与高斯滤波成形法(成形参数: 成形时间为 24 μ s), 对实际采样后的数字核信号脉冲幅度进行提取, 得到的能谱如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 滤波成形法处理得到的能谱, 其能量分辨率与脉冲计数率均好于曲线拟合法, 其中梯形滤波成形方法得到能谱的能量分辨率与脉冲计数率分别为 180 eV 与 6618; 高斯滤波成形方法得到能谱的能量分辨率与脉冲计数率分别为 182 eV 与 6413; 曲线拟合方法得到能谱的能量分辨率与脉冲计数率分别为 190 eV 与 5823。在相同测量条件下, 梯形滤波成形与高斯滤波成形方法的脉冲幅度提取性能相当, 曲线拟合法的的能量分辨率与脉

冲计数率相对较差, 主要原因在于曲线拟合法进行脉冲幅度提取的准确性建立在高统计样本(即高采样率)下, 同时曲线拟合法在脉冲幅度提取中算法时间较长, 使得脉冲计数率相比滤波成形法具有更大的损失。

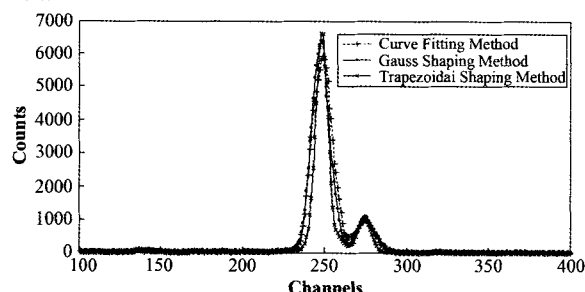


图 6 曲线拟合法与滤波成形法得到的能谱图
Fig.6 Energy spectrum of curve fitting and filter shaper methods.

3 结语

直接比较法对脉冲信号采样点序列的大小直接进行比较, 实现脉冲幅度的提取, 该方法常用于模拟核谱仪系统中(由于 ADC 采样前通过电路对脉冲进行滤波成形、堆积抑制与基线恢复)。数字核谱仪系统中, 在采样频率足够高的情况下, 忽略噪声、脉冲堆积、基线漂移等因素的影响, 可以准确地得到脉冲幅度的最大值, 受数字核信号处理时间与存储空间限制, 直接比较法实用性较差。

曲线拟合法的本质是从统计数据中找平均值, 统计样本越大(采样点数越多), 其统计误差越小, 计算结果越精确。因而在脉冲宽度一定的前提下, 为了尽可能多地获取采样点数, 需要超高速的 ADC, 这样增大了后续数字信号存储空间的负担, 加之该方法计算复杂, 对相关程序(算法实现)的执行效率要求更高, 该方法在核信号脉冲幅度提取中实用性不强。

滤波成形主要的成形方案为: 梯形成形、三角成形与高斯成形。其可对不同类型的核输入信号(阶跃信号、单指数信号与双指数信号)进行成形处理。即使在相对较低的采样频率下, 也可准确提取到脉冲幅值信息, 笔者在 20 MHz 的采样频率下, 通过梯形滤波成形可准确提取到脉冲的幅度信息, 该方法是当今数字核谱仪系统中最常见的脉冲幅度提取方法。

参考文献

- 1 曾国强, 葛良全, 熊盛青, 等. 数字技术在航空伽马能谱仪中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(2): 209-213

- ZENG Guoqiang, GE Liangquan, XIONG Shengqing, *et al.* The application of digital spectroscopic technique to airborne Gamma-ray investigation[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2010, 34(2): 209-213
- 2 张怀强. 数字核谱仪系统中关键技术的研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011
- ZHANG Huaiqiang. Study on key technologies of digital nuclear spectrometer system[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011
- 3 覃章健, 葛良全, 程峰. 曲线拟合在核探测器信号幅度提取中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(6): 643-647
- QIN Zhangjian, GE Liangquan, CHENG Feng. Application of curve fitting to calculating the amplitude of the signal output by a nuclear radiation detector[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2007, 34(6): 643-647
- 4 覃章健. 基于 FPGA 的便携式数字核谱仪研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2008
- QIN Zhangjian. Design of Portable Digital Nuclear Spectroscopy Instrument Based on FPGA[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011
- 5 陈世国. 数字核仪器系统中高斯成形滤波的设计与实现[D]. 成都: 四川大学, 2005
- CHEN Shiguo. Design and Realization of the Gaussian Shaping Filtering in Digital Nuclear Instrument System[D]. Chengdu: Si Chuan University, 2005
- 6 杨彬, 颜拥军, 周剑良. 核信号数字滤波成形算法仿真研究[J]. 核技术, 2010, 33(11): 818-823
- YANG Bin, YAN Yongjun, ZHOU Jianliang. Simulation study on digital filter to nuclear signals[J]. *Nuclear Techniques*, 2010, 33(11): 818-823
- 7 张软玉, 陈世国, 罗小兵, 等. 核辐射能量信号数字化处理方法的研究[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(3): 252-255
- ZHANG Ruanyu, CHEN Shiguo, LUO Xiaobing, *et al.* Study on the method of eigital signals processing for acquiring nuclear energy spectrum[J]. *At Energy Sci Technology*, 2004, 38(3): 252-255
- 8 Cosimo Imperiale, Alessio Imperiale. On nuclear spectrometry pulses digital shaping and processing[J]. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2001, 30(1): 49-73

Pulse amplitude extraction in digital nuclear spectrometer system

ZHANG Huaiqiang^{1,2} TANG Bin³ WU Hexi²

1 (*State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment,
East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China*)

2 (*School of Nuclear Engineering and Geophysics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China*)

3 (*Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China Institute of Technology),
Ministry of Education, Nanchang 330013, China*)

Abstract Background: The accuracy and real-time performance of pulse amplitude extraction in digital nuclear spectrometer system directly influence the system energy resolution and the maximum count rates. **Purpose:** This paper attempts to study the amplitude extraction method of digital nuclear signal, which comes from the high speed ADC. **Methods:** In this paper, according to the principle of operation, the extraction method is categorized into three types: direct comparison method, curve fitting method and filter shaper method, also the operating principle of the three methods are analysed and discussed. **Results:** The above three methods are employed to process actual sampled digital nuclear signal at the sampling frequency of 40 MHz, the curve fitting method and filter shaper method are respectively used to extract the pulse amplitude and get their energy spectrum. **Conclusions:** Taking into account the resolution and pulse counting rate, after theoretical analysis, experimental comparison and test, the optimal pulse amplitude extraction method is filter shaper method.

Key words Digital nuclear spectrometer, Pulse amplitude extraction, Direct comparison method, Curve fitting method, Filter shaper method

CLC TL822