

核脉冲数字基线改进算法

陈 伟^{1,2} 万文杰³ 喻 杰^{3,2} 周建斌² 赵 祥³

1(成都航空职业技术学院 信息工程学院 成都 610100)

2(成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

3(四川新先达测控技术有限公司 成都 610052)

摘要 由于CR微分电路引起的下冲经数字模拟转换器(Analog-to-digital Converter, ADC)转换后的信号基线漂移现象一直存在,增加了数字基线估计算法的复杂度,影响了在线基线的实时性与准确性。通过对平均值法实时提取随机波形信号数字化基线算法的研究,提出了一种在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)可实现的核脉冲数字基线改进算法——平均值阈值法。采用实测的一个带下冲信号进行拆解拼接后得到一条基线值固定的新信号,经平均值阈值法求得的基线与该拼接信号的基线值一致,并且当基线值发生变化时,该算法实时跟随效果好。平均值阈值法实时提取随机波形信号数字化基线算法能有效的计算出基线,并且占用内存小,计算速度快,经该算法处理后的基线值稳定性好,具有较强的跟随效果。

关键词 带下冲的核信号, 数字基线, 平均值阈值法

中图分类号 TL84

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040403

Nuclear pulse digital baseline improvement algorithm

CHEN Wei^{1,2} WAN Wenjie³ YU Jie^{3,2} ZHOU Jianbin² ZHAO Xiang³

1(College of Information Engineering, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China)

2(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

3(Sichuan X-STAR Technology of M&C Co., Ltd., Chengdu 610052, China)

Abstract [Background] After the analog-to-digital converter (ADC) conversion, the baseline drift caused by CR differential circuit always exists. It increases the complexity of digital baseline estimation algorithm, and affects the real-time and accuracy of online baseline. [Purpose] This study aims to improve the average method for extracting the digital baseline algorithm of random waveform signals in real-time. [Methods] An improved method of nuclear pulse digital baseline named average threshold method that can be implemented in field-programmable gate array (FPGA) was proposed. A measured signal with undershoot was taken as simulation nuclear pulse signal by disassembling and splicing to obtain a new signal with a fixed baseline value. [Results] The baseline obtained by the average threshold method was consistent with the splicing baseline value. This algorithm exhibited strong real-time tracking effect while the baseline was changing. [Conclusion] The average threshold method for real-time extraction of random waveform signals digital baseline algorithm can effectively calculate the baseline with less memory occupation and quick speed. The baseline value processed by the algorithm is stable, has a strong follow-up effect.

国家重点研发计划项目(No.2016YFC1402505)、国家自然科学基金(No.41774140)、四川省教育厅资助科研项目(No.18ZA0041)、成都航院校级项目(No.061758)资助

第一作者: 陈伟, 男, 1978年出生, 2008年于成都理工大学获硕士学位, 现为博士研究生, 从事核测控技术研究

通信作者: 万文杰, E-mail: 617467694@qq.com

收稿日期: 2018-08-17, 修回日期: 2018-12-02

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC1402505), National Natural Science Foundation of China (No.41774140), Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department (No.18ZA0041), Chengdu Aeronautic Polytechnic Project (No.061758)

First author: CHEN Wei, male, born in 1978, graduated from Chengdu University of Technology with a master's degree in 2008, doctoral student, focusing on nuclear measurement and control technology

Corresponding author: WAN Wenjie, E-mail: 617467694@qq.com

Received date: 2018-08-17, revised date: 2018-12-02

Key words Nuclear signal with undershoot, Digital baseline, Average threshold method

随着电子技术和计算机技术的发展,数字化核仪器得到了长足发展。数字基线估计技术因其灵活性和适应性,有助于提高系统的稳定性和可靠性,正在替代传统的模拟基线恢复器^[1]。受工频电源文波、电路系统温度漂移、探测器楼电路等因素的影响,基线会发生漂移。为得到合适的信号脉冲宽度和使数字模拟转换器(Analog-to-digital Converter, ADC)工作于最佳状态,前端电路参数的设置会使得基线不为零^[2]。不稳定的基线会导致系统能量分辨率下降。一些高计数率场合下,通常将探测器输出信号通过CR微分电路,负指数信号经CR微分后会出现过零下冲,若在后续的信号处理过程中直接将过零的下冲部分去掉,会导致测量结果出现严重的偏差,因此需要对过零下冲的信号进行基线计算^[3]。

现有的数字基线算法主要有:差值拟合法^[4]、数字滤波法^[5-6]、计权函数法^[7]、最小二乘法^[8]、卡尔曼滤波法^[9-10]、零面积恢复法^[11]等。东华理工大学王海涛等^[12]采用了滑动平均滤波法。陈伟等^[13]采用最小平均值法进行基线恢复。李伟男等^[14]采用动态基线恢复方法进行基线恢复。本文采用李伟男的基线恢复方法,并在其基础上进行改进,针对带有下冲的负指数信号进行数字基线计算。

1 算法实现

工程应用中发现,对于带有过零下冲的核脉冲信号,采用李伟男提出的“平均值法实时提取随机波形信号数字化基线”得到的基线是不稳定的,故对其进行了改进,提出一种平均值阈值实时提取随机波形信号数字化基线的方法(以下简称平均值阈值法),以下为其算法实现流程。

1) 设连续采集的 N 个点为 $W(n)$, $n=1, 2, 3, \dots$, 求其平均值 c

$$c = \frac{W(1) + W(2) + \dots + W(n)}{N} \quad (1)$$

在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)中,此 N 个点不存储,相加后移位, N 为 2^n 。

2) 引入阈值常数 r , 并使采样筛选范围为 $[c-r, c+r]$, ($r>0$)。

3) 继续连续采样,筛选出处于范围 $[c-r, c+r]$ 的点,直到找到 N 个符合要求的点后求取平均值 b , 再将 $[b-r, b+r]$ 作为阈值继续筛选。

在求取平均值时,基线上漂可能使算法失效,为

此,引入可自动调节的参数 M , M 的初值根据计数率选择,再引入数值 K 对 M 进行修正,设每次求平均时实际总采样值为 N_s 。若在求平均值时,采集 $N+M$ 个点后仍未找到 N 个小于等于 c 的点,则将值 $M+K$ 赋予 M , 并将程序跳转至第一步。但若 $N+M-N_s>K$, 则将 $M-K$ 赋予 M , 否则 M 值不变,继续执行第三步,如此循环操作,公式如下:

$$M = \begin{cases} M - K & (N + M - N_s > K) \\ M & (N + M - N_s > 0) \\ M + K & (\text{Others}) \end{cases} \quad (2)$$

此后将每一次新得到的平均值作为当前基线值,经过多次重复操作,得到的平均值将无限逼近于基线。

改进后的平均值阈值法,在实时提取随机波形信号数字化基线时,能有效解决前端CR微分电路引起的过零下冲脉冲信号引起的基线不稳定情况。本次取值 $N=1\ 024$, $r=40$, $K=512$, M 初值取 $1\ 024$, 得到的基线结果较为理想。

2 信号仿真实验

采用 ^{239}Pu 放射源,将钝化离子注入平面硅(Passivated Implanted Planar Silian, PIPS)探测器的输出信号经前端电路调理,送入采样频率为 $20\ \text{MHz}$ 的多道脉冲幅度分析器,脉冲宽度为 $10\ \mu\text{s}$, 从采样信号中截取 $1\ 024$ 点,如图1所示。

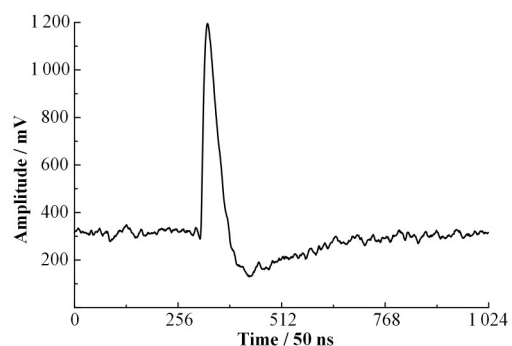


图1 带下冲的原始脉冲信号
Fig.1 Original pulse signal with undershoot

为了方便算法的研究,将图1中信号做多次拼接,得到一条总数据点数为 $201\ 225$ 的测试信号,见图2中的原信号 v_1 。

首先用平均值法和李伟男的“平均值法实时提取随机波形信号数字化基线”法对图2中的测试信号 v_1 进行模拟仿真,结果如图2所示。

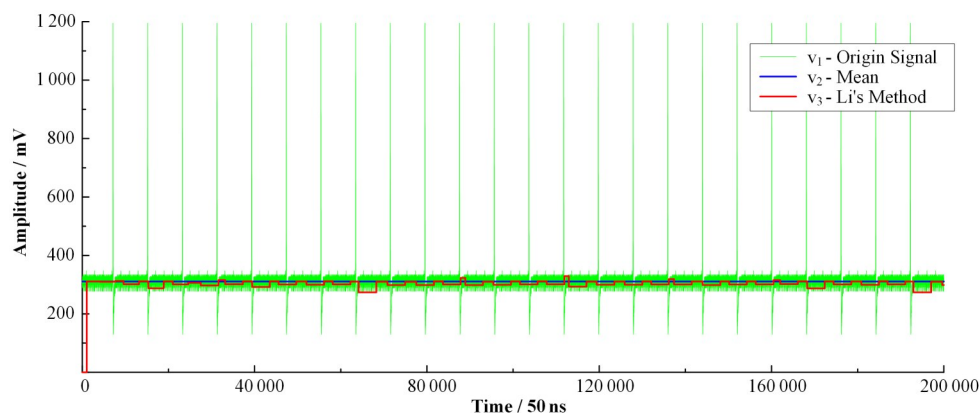


图2 平均值法实时提取随机波形信号数字化基线数值仿真结果
Fig.2 Simulation results of average value method for real-time extraction of random waveform digital baseline

采用两种方案提取图2中的信号 v_1 的数字化基线。方案一是只加基线上阈值,这样的目的是增加满足累加条件的点数,好处在于不会轻易触发到复位操作,增加了基线的稳定性;其次是降低了下冲占有的比重,同样有着提高基线稳定性的效果。不过此种方案里下冲仍会对基线造成影响。方案二是增加基线的上下阈值。这是在方案一的结论之上进一步改进得到的,其中阈值常数 r 是参考噪声的幅度

水平取得的,初始值取50。

只加基线上阈值的仿真效果如图3中 v_3 所示,添加基线上下阈值的仿真效果如图4中 v_3 所示,平均值法、平均值法实时提取随机波形信号数字化基线法、增加上阈值平均值法实时提取随机波形信号数字化基线法和增加上下阈值平均值法实时提取随机波形信号数字化基线法的对比效果如图5所示。

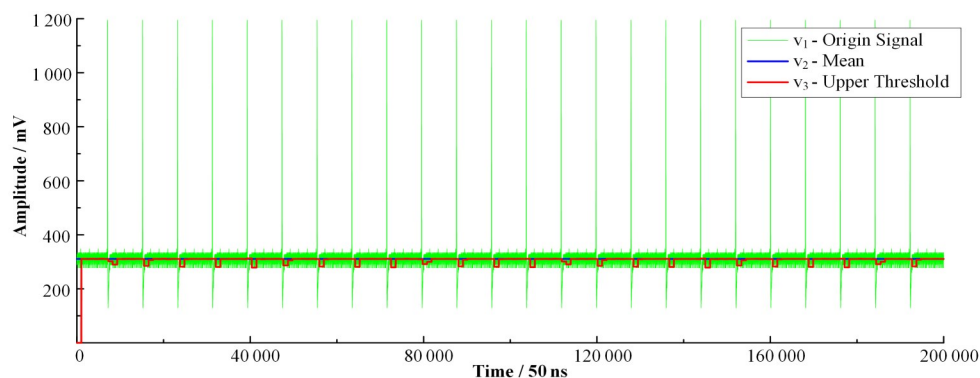


图3 只加基线上阈值的仿真效果
Fig.3 Simulation results of applying only the upper threshold of baseline

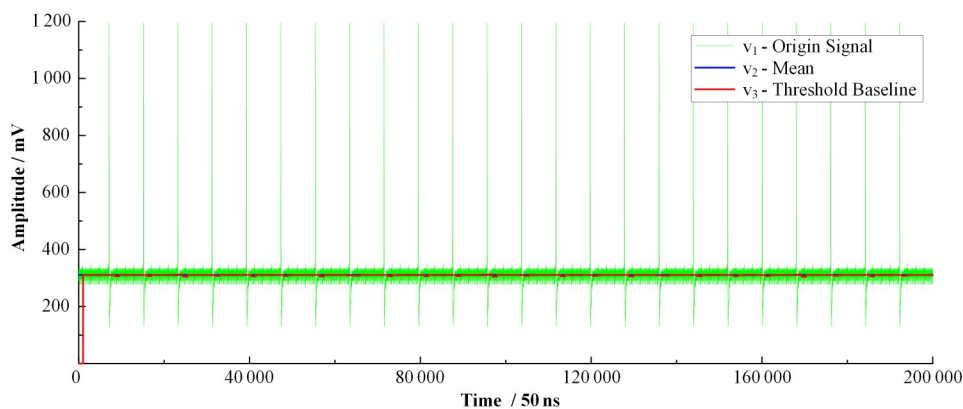


图4 添加基线上下阈值仿真结果
Fig.4 Simulation results of applying upper and lower thresholds of baseline

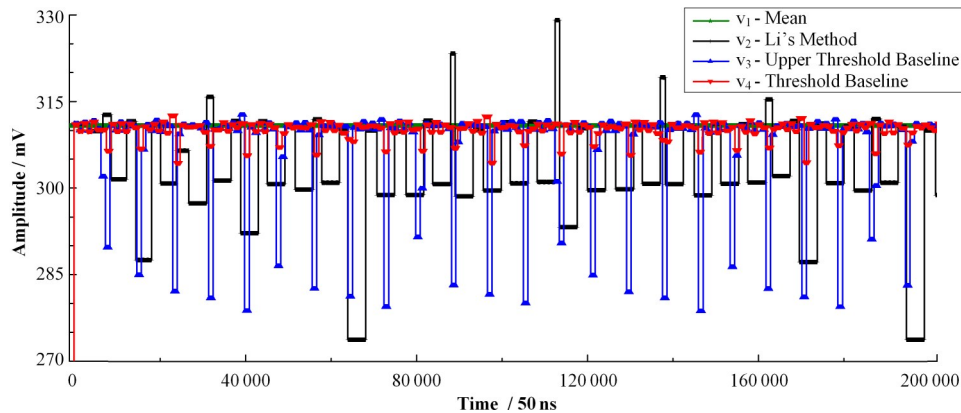


图5 几种基线计算方法的结果对比

(v_1 是所有点的平均值; v_2 是李伟男提出的平均值法实时提取随机波形信号数字化基线; v_3 是增加基线上阈值的平均值法实时提取随机波形信号数字化基线; v_4 是增加上下阈值的平均值法实时提取随机波形信号数字化基线)

Fig.5 Results comparison of several baseline estimation methods

(v_1 is the average value of all points; v_2 is the average baseline method proposed by LI Weinan to extract the digital baseline of the random waveform signal in real time; v_3 is real time extraction of digital baseline for random waveform signals based on average value method which add upper threshold; v_4 is real time extraction of digital baseline for random waveform signals based on average value method which add threshold)

分析图3、图4、图5可得,对所有数据点取平均值所得的基线是很稳定的,但在实际测量中是流水线逐点处理的,因此该方法并不适用。采用李伟男提出的平均值法实时提取随机波形信号数字化基线法处理带有过零下冲信号时,基线的抖动较大。增加上阈值平均值法实时提取随机波形信号数字化基线法比较稳定,但是求得的数字基线值有较明显的抖动。分析图5曲线 v_4 可得,采用本文提出的增加上下阈值平均值法实时提取随机波形信号数字化基线法所得的基线较稳定,基本符合设定的基线值。

3 算法的FPGA验证

本文对李伟男提出的“平均值法实时提取随机波形信号数字化基线”算法做了简单修正,该方法消耗FPGA资源少,时序逻辑简单算法实现容易。实验流程如图6所示。

由于ADC的采样率是20 MHz,即是1 s的采样点有 2×10^8 个。按照间隔1024个点做一次统计,1 s大概统计次数为19 531次,表明统计次数是足够的。

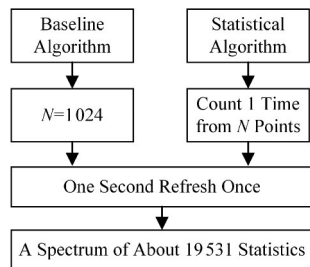


图6 FPGA基线算法验证流程图

Fig.6 Flow chart of FPGA baseline algorithm validation

数字基线为313时,采用“平均值法实时提取随机波形信号数字化基线”统计结果如图7所示。图7中横坐标为基线值,纵坐标为相同数值的基线值统计计数。

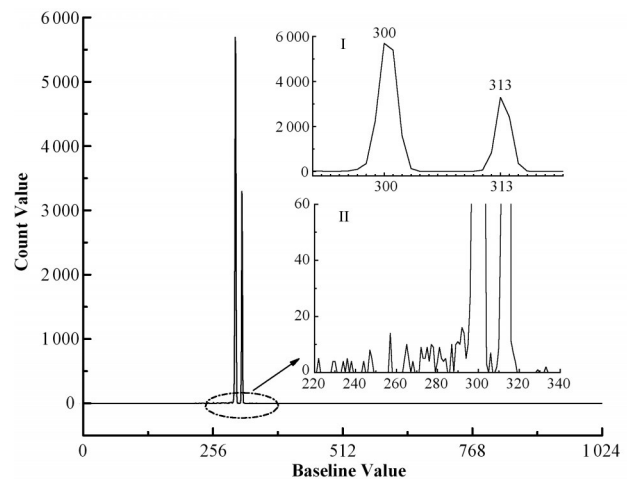


图7 平均值法实时提取随机波形信号数字化基线统计结果

Fig.7 Statistics results of mean value method for real-time extraction of random waveform digital baseline.

由图7右上的放大区I可以看出,基线值统计结果中出现了两个尖峰。其中一个峰出现在基线值为313处,即对应的实际数字基线值。而在基线值300出现的峰主要是因为信号有下冲所引起的。图7中放大区II的基线统计值曲线表明,由于信号下冲的影响致使220~340道之间都有计数,基线分布较广,表明基线计算结果稳定性不足。

采用单边基线阈值法进行计算的结果如图8所示,将其与图7比较分析可得,基线统计曲线由双峰

变成了单峰,且峰值在313附近。分析图8的放大区II和图7的放大区II发现,基线统计值在230~320之间均有计数,说明单边基线阈值法并不能有效克服信号下冲的影响。

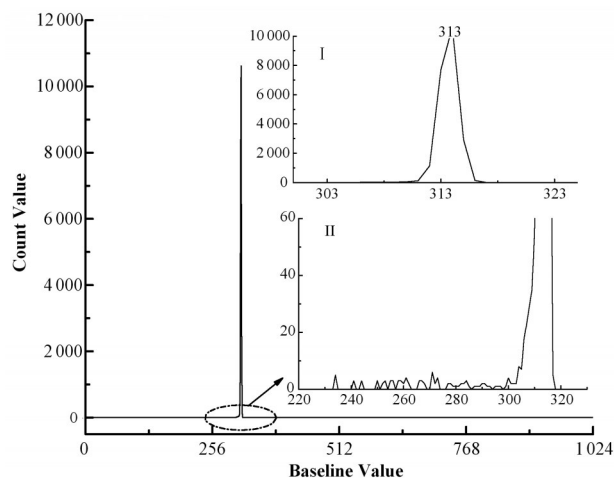


图8 单边基线阈值法

Fig.8 Calculating results of unilateral baseline threshold method

采用双边基线阈值法处理,结果如图9所示。可以看出,基线统计值曲线为单峰,且基线值范围为305~320,与“平均值法实时提取随机波形信号数字化基线”和单边基线阈值法相比,分布范围缩减了6~7倍。峰位处的基线值在313附近,说明采用双边基线阈值法的计算结果可靠。以此说明算法的科学性和准确性。

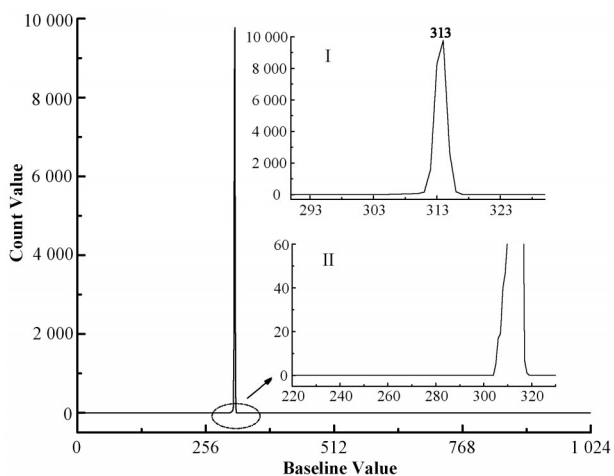


图9 双边基线阈值法

Fig.9 Calculating results of bilateral baseline threshold method

通过调节偏置电压,将基线值变为662,测试基线动态变化的自适应能力,基线值统计曲线见图10。分析可知,图中出现了两个峰,第一个峰为调整前基线值,第二个峰位调整后的基线值,分析图10放大区I可知,统计区间内只有两个孤立峰而无其他

杂峰,说明平均值阈值算法收敛极快,基线变化的跟随能力很强。而第二个峰的峰位在662附近,与实际基线值吻合,稳定之后的基线统计图如图11。

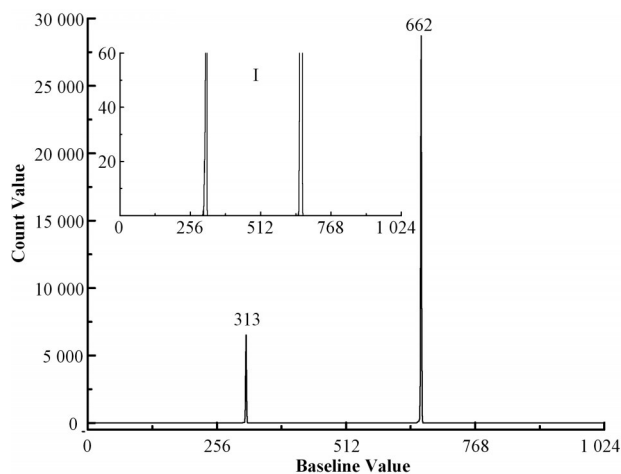


图10 基线动态变化的自适应验证

Fig.10 Adaptive verification of baseline dynamic changes.

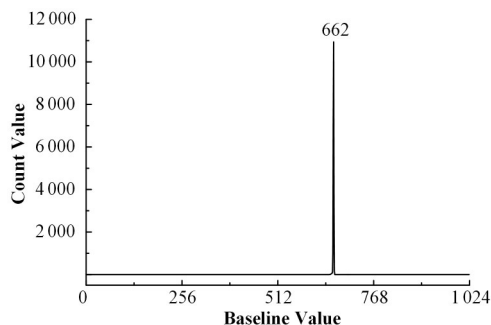


图11 基线稳定为662的效果图

Fig.11 Effect chart with baseline stability at 662

图12描述了阈值常数 r 分别取20、30、40、50时的基线值统计效果图,分析可知,当 $r=20$ 和 $r=30$ 时,基线已经有所偏移,当 r 取40时,可得适合本研究要求的核脉冲信号。

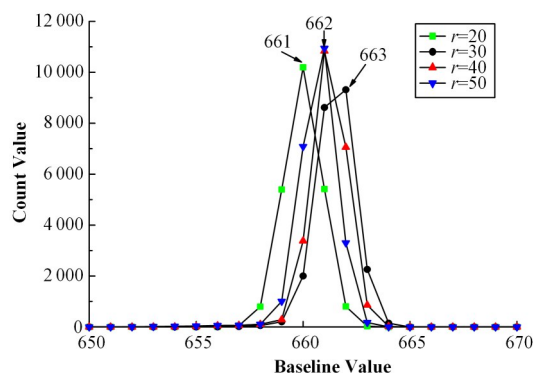


图12 $r=20, 30, 40, 50$ 各值的统计对比图

Fig.12 Statistical comparison maps of r value at 20, 30, 40 and 50, respectively

4 结语

平均值阈值法实现过程简单,方便在FPGA中实现,具有很强的实用性^[15]。在处理带有下冲的核信号时:经平均值阈值法处理的谱线是单峰,且分布范围窄;而经平均值法实时提取随机波形信号数字化基线方法处理后的谱线是双峰,并且在很宽的范围内都有计数。本文提出的平均值阈值法实时提取随机波形信号数字化基线方法,具有基线更稳定,并且当基线改变时能有效的跟随。

参考文献

- 1 陈亮. 核素识别算法及数字化能谱采集系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
CHEN Liang. Nuclide identification algorithm and digital spectra acquisition system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- 2 Hu C H, Zeng G Q, Ge L Q, *et al.* Analog rise-time discriminator for CdZnTe detector[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(4): 52. DOI: 10.1007/s41365-017-0204-0.
- 3 Huang H Q, Yang X F, Ding W C, *et al.* Estimation method for parameters of overlapping nuclear pulse signal [J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(1): 17. DOI: 10.1007/s41365-016-0161-z.
- 4 王昕, 范贤光, 许英杰, 等. 基于B样条的拉曼光谱基线校正方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(8): 2117–2121. DOI: 10.3964/J.ISSN.1000-0593(2014)08-2117-05.
WANG Xin, FAN Xianguang, XU Yingjie, *et al.* Raman spectral baseline correction method based on B-spline[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, **34**(8): 2117–2121. DOI: 10.3964/J.ISSN.1000-0593(2014)08-2117-05.
- 5 张怀远. 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 Huaiyuan. Research on key technologies of digital nuclear spectrometer system[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- 6 张群荔, 曾云, 江晓山. 用于基线测量的FIR数字滤波器的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(3): 351–354.
ZHANG Qunli, ZENG Yun, JIANG Xiaoshan. Design of FIR filter for baseline measurement[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2011, **31**(3): 351–354.
- 7 肖无云, 魏义祥, 艾宪芸. 多道脉冲幅度分析中的数字基线估计方法[J]. 核电子学与探测技术, 2005, **25**(6): 601–604.
XIAO Wuyun, WEI Yixiang, AI Xianyun. Digital baseline estimation method for multi-channel pulse height analyzing[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25**(6): 601–604.
- 8 李彦波, 李朝海, 何子述, 等. DMCA中基于补偿最小二乘法的基线估计算法[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(8): 991–994. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2014.08.017.
LI Yanbo, LI Chaohai, HE Zishu, *et al.* A baseline estimation algorithm based on penalized least quares in DMCA[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(8): 991–994. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2014.08.017.
- 9 王敏, 周建斌, 方方. 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, FANG Fang, *et al.* The study of baseline estimated in digital XRF analyzer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, **33**(4): 233–236.
- 10 张同锋, 方方, 王敏, 等. 核辐射脉冲幅度分析的基线自适应Kalman滤波估计[J]. 核电子学与探测技术, 2012, **32**(2): 203–206. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2012.02.020.
ZHANG Tongfeng, FANG Fang, WANG Min, *et al.* Baseline adaptive Kalman filter estimation method for nuclear radiation pulse height analysis[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, **32**(2): 203–206. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.02.020.
- 11 Geraci A, Pullia A, Ripamonti G. Quasi-optimum gamma and X spectroscopy based on real-time digital techniques [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2000, **439**(2): 378–384. DOI: 10.1016/S0168-9002(99)00897-9.
- 12 王海涛, 汤彬, 王仁波, 等. 数字化 γ 能谱测量系统中的脉冲基线估计与扣除方法[J]. 核技术, 2018, **41**(5): 050402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050402.
WANG Haitao, TANG Bin, WANG Renbo, *et al.* Method of pulse baseline estimate and deduction for digital gamma energy spectrometer[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(5): 050402. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2018. hjs.41.050402.
- 13 陈伟, 周建斌, 方方, 等. 基于基线自动恢复技术的数字多道能谱仪[J]. 核技术, 2018, **41**(5): 050401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050401.
CHEN Wei, ZHOU Jianbin, FANG Fang, *et al.* Design of digital multi-channel spectrometer based on auto-baseline restoration[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(5): 050401.

- DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050401.
- 14 李伟男, 杨朝文, 周荣. 基于FPGA脉冲幅度分析器的数字化基线估计方法[J]. 核技术, 2015, **38**(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060403.
- LI Weinan, YANG Chaowen, ZHOU Rong. Baseline estimation method of digital multi-channel pulse height analyzer based on FPGA[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060403.
- 15 Liu J, Yang J, Zeng G Q, *et al.* Implementation of a cusp-like for real-time digital pulse shaper in nuclear spectrometry[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(7): 103. DOI: 10.1007/s41365-017-0248-1.