

数字化 γ 能谱测量系统中的脉冲基线估计与扣除方法

王海涛¹ 汤彬^{1,2} 王仁波¹ 瞿金辉¹ 张雄杰¹ 陈锐¹ 刘志锋¹

¹ (东华理工大学 教育部核技术应用工程研究中心 江西 330013)

² (东华理工大学 江西 330013)

摘要 在 γ 能谱测量系统中,基线的估计与扣除一直是脉冲幅度测量处理过程中的一个重要环节。随着 γ 能谱测量系统的数字化,基线的估计与扣除方法也需要作相应的改进。目前相对复杂的算法只能是先对输入射线脉冲经数字化采样后,再在计算机上编程实现,不适用于以现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)等为核心的数字化系统。部分可以在 FPGA 上实现的算法,在估计基线时没有充分考虑正常核脉冲信号对基线的影响,精度和实时性相对不足。为解决这一问题,本文提出了一种可在 FPGA 上实现的脉冲基线估计与扣除方法。该方法通过对采样得到的原始脉冲信号进行去异常滑动平均滤波法,进而求得原始输入脉冲的直流基线,并对该基线进行扣除。而脉冲基线的扣除,必将降低仪器后续处理的复杂度。经实验验证:此方法算法简单、精度好、灵敏度高、可在 FPGA 上编程实现、可以抑制低频干扰和温度漂移等因素对基线的影响,能够在一定程度上提高能量分辨率,抑制谱线漂移。该方法不仅可以用于数字化 γ 能谱测量系统,也可以应用于测量其他类型射线(如 X 射线)的数字化谱仪。

关键词 基线估计与扣除,现场可编程门阵列,滑动平均滤波

中图分类号 TL817⁺.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050402

Method of pulse baseline estimate and deduction for digital gamma energy spectrometer

WANG Haitao¹ TANG Bin^{1,2} WANG Renbo¹ QU Jinhui¹ ZHANG Xiongjie¹
CHEN Rui¹ LIU Zhifeng¹

¹(Engineering Research Center for Nuclear Technology Application, Ministry of Education, East China University of Technology, Jiangxi 330013, China)

²(East China University of Technology, Jiangxi 330013, China)

Abstract [Background] In the gamma energy spectrum measurement system, estimation and deduction of the baseline has been an important part of pulse amplitude measurement processing. With the digitalization of gamma energy spectrometer, the baseline estimation and deduction method also need to make corresponding improvement. [Purpose] Some relatively complex algorithms which with digital sampling of original pulses only can be realized on a computer, but not suitable for the digital systems which based on field programmable gate array (FPGA). Some

国家自然科学基金(No.41504136、No.41330318)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项(No.2017YFF0104200)、江西省教育厅科技计划项目(No.KJLD14052)、核技术应用教育部工程研究中心开放基金项目(No.HJSJYB2015-3)资助

第一作者:王海涛,男,1982年出生,2010年毕业于东华理工大学获硕士学位,现为博士研究生,研究领域为核电子学与探测技术

通信作者:汤彬, E-mail: tangbin@ecit.cn

收稿日期:2018-01-24, 修回日期:2018-03-16

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41504136, No.41330318), National Key R & D Project (No.2017YFF0104200), Science and Technology Project Founded by the Education Department of Jiangxi Province (No.KJLD14052), and Open Fund of Engineering Research Center of Nuclear Technology Application (East China University of Technology) (No.HJSJYB2015-3)

First author: WANG Haitao, male, born in 1982, graduated from East China University of Technology with a master's degree in 2010, doctoral student, focusing on nuclear electronics and detection technology

Corresponding author: TANG Bin, E-mail: tangbin@ecit.cn

Received date: 2018-01-24, revised date: 2018-03-16

algorithms which could be executed on FPGA didn't fully consider the influence of the normal pulse signal, which have poor real-time performance and accuracy. To solve this problem, paper puts forward a kind of new algorithm which could estimate and deduct the pulse baseline. The most important is that it can implement on FPGA. [Methods] This method is called moving average filter after excluding abnormal signal (MAEA). That is based on the original pulse signal, which obtained by analog-to-digital (A/D) sampling, pulses are viewed as abnormal signals, superimposed on the direct-current (DC) baseline, which need to be deducted. Then DC baseline is obtained by the moving average filtering method. While the pulse DC baseline is deducted by FPGA, the complexity of the instrument for subsequent processing will be lower. [Results] After experimental verification, this method has some characteristics: simple algorithm, well accuracy and high sensitivity. It not only could inhibit the signal's influence on the baseline such as low frequency interference and temperature drift, but also could track the change of the baseline real time and accurately and suppress spectral drift to a certain extent. [Conclusion] This method not only can be used for digital gamma energy spectrum measurement system, also can be used applied to other types, such as X-ray digital spectrometer.

Key words Pulse baseline estimate and deduct, FPGA, Moving average filter

在 γ 能谱测量系统中, 由于探测器漏电流、极零相消处理的不完善、电子学元器件温漂、电源纹波、以及数字信号对模拟信号的高频干扰等影响, 使得在核脉冲幅度测量过程中, 有用信号总是叠加在一个不稳定的直流基线上, 从而导致测量结果的波动^[1]。不仅降低了系统的能量分辨率, 且会引起能量线性刻度曲线的斜率变化和直流基线漂移。如果将基线予以扣除, 确保系统的能量刻度曲线经过坐标轴的零点, 必然会降低后续谱线处理的复杂度。

传统的模拟 γ 能谱测量系统通常使用基线恢复器来降低脉冲过冲引起的瞬时基线漂移, 使用低通滤波电路来估计直流基线的大小, 并将其从有用信号中扣除^[2-4]。随着电子技术的飞速发展, 该方法逐渐被以现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、高速模拟/数字信号转换(Analog-to-digital, A/D)等器件为核心的数字化 γ 能谱测量系统所代替, 相应的模拟基线恢复器可以通过数字基线估计和扣除方法来实现。数字基线估计与模拟的基线回复电路相比, 可显著提高系统稳定性和可靠性, 具有较高的灵活性和适应性, 可进一步改善系统能量分辨率, 成为数字化核信号处理方法中的一个重要部分。

目前国内外对数字基线估计和扣除的研究方法有很多, 比如 Abbiati 等^[5]通过插值的方法求出新的基线采样值来代替原来的脉冲信号采样值; Geraci^[6]采用分段滤波法中的一个信号滤波器和三个基线滤波器实现基线估计值; 清华大学肖无云等^[7]利用计权函数形式给出的有限冲击响应(Finite Impact Response, FIR)基线滤波器实现基线估计; 邱晓林等^[8-9]利用自适应 Kalman 滤波估计基线, 不过此类算法较复杂, 不适合在 FPGA 上编程实现; Li 等^[10]

研究了可以在 FPGA 上实现的直方图统计法进行原始脉冲基线估计, 该方法是默认处于基线附近的脉冲较多(比如叠加在基线上的波纹等), 根据统计方法, 在能谱图中找到计数最高的道址作为基线, 该方法具有一定的准确性, 能够对能谱分辨率有所改善, 但是测量结果受纹波、脉冲通过率等影响较大; 成都理工大学曾国强等^[11]研究了利用脉冲采样触发阈值的方式进行基线识别和处理, 但忽略了较小脉冲信号及纹波干扰等影响; 四川大学的李伟男等^[12]研究了利用平均值法的改进方法进行原始脉冲基线估计, 取得了较好的效果, 该方法可以在 FPGA 上予以编程实现, 但需要对基线进行较长时间的跟踪, 且判断过程较为复杂, 而且在估计基线时没有完全剔除正常核脉冲信号对基线的影响。为了解决上述问题, 本文提出了一种基于 FPGA 的去异常滑动平均滤波法来估算原始脉冲基线。

1 滑动平均滤波方法在 FPGA 中的应用

利用滑动平均滤波估算原始脉冲基线的方法类似于传统模拟核脉冲幅度测量基线恢复电路中的低通滤波部分。该方法需要在 FPGA 中开辟一组 N 个单元的循环缓冲区, 用递推法求得 $N=2^k$ 个点的平均值 $\bar{x}$, 公式如下:

$$S = S_p + x(n) - x(n - N - 1) \quad (1)$$

$$\bar{x} = S / N = S / 2^k = S \gg k \quad (2)$$

式中: S 为循环缓冲区中 N 个点的累加和; S_p 为 S 延迟一个时钟序列的值(即前一个时钟序列 N 个点

的累加和), 在执行平均滤波之前, 需要将 S_p 及循环缓冲区中的内容全部初始化为0。

在脉冲通过率较低时, 随着 N 的增大, 基线评估结果越来越接近实际值, 这种方法切实可行。然而, 当脉冲通过率较高时, 因为没有剔除正常脉冲或异常干扰信号对基线评估影响, 会导致基线评估的精度变差。

2 去异常滑动平均滤波法

为避免脉冲通过率高高低等情况影响基线评估结果, 可以把正常的核脉冲信号和异常的干扰信号都看成是叠加在直流基线上的异常, 只要在对采样数据进行滑动平均滤波之前剔除这些异常, 必然可以提高基线评估的精度。文中将这种方法称为去异常滑动平均滤波法。

基线相比于脉冲信号会平坦很多, 如果对所有采样数据进行一阶数值微分, 微分后变化幅度较大的点或出现连续相同符号(连续为正或连续为负)的点, 必为脉冲信号(或异常信号)。但是微分后幅度变化接近于零的点不一定都为基线, 比如当输入脉冲超出谱仪量程范围时, 系统一般会将采样数据设置为最大量程值, 这些点经过数值微分后的数值会是一串连续的零, 但却不属于基线, 如图1所示。这种现象对于顶部比较平坦的类高斯型输入脉冲同样存在。

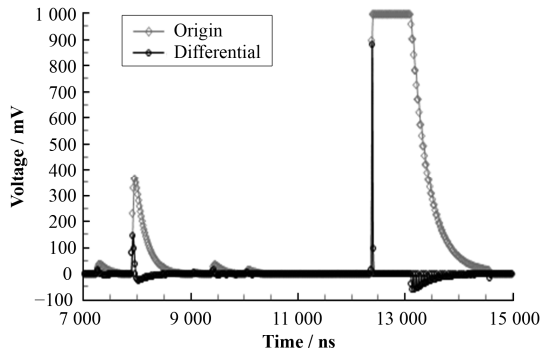


图1 γ 射线脉冲及其微分后的结果
Fig.1 γ -ray pulse and its differential results

为了避免在用微分法识别基线与脉冲的过程中, 因顶部平坦脉冲引起的误判, 首先对所有采样数据进行滑动平均滤波, 得到一个初步基线评估值, 这里称为粗基线。再将该粗基线作为判断阈值, 将输入数据与粗基线进行比较, 如果大于粗基线, 则认为是脉冲; 如果小于或等于粗基线, 为了进一步剔除较小脉冲信号的影响, 可以对其进行一阶数值微分, 此时变化幅度较小且正负符号不连续的点必为基线, 对这些点再次进行滑动平滑滤波即可得到

最终的基线评估值, 这里称为精密基线。

为了在FPGA中实现去异常滑动平滑滤波算法, 需要在FPGA中开辟两组循环缓冲区, 其中一组 $N=2^k$ 个单元的循环缓冲区BUF_A用来计算粗基线 $\bar{x}$, 另外一组 $M=2^m$ 个单元的循环缓冲区BUF_B用来计算精密基线 $\bar{x}'$ 。具体算法如下:

首先对每次采样得到的数据与前一次数据进行一阶数值微分, 其结果用 $dx(n)$ 表示, 如式(3)所示。

$$dx(n) = x(n) - x(n-1) \quad (3)$$

粗基线 $\bar{x}$ 由式(1)、(2)求得。假设系统采样数据的纹波范围为 ε , 选取 p 个点来判断采样数据微分后的正负符号是否连续, 只要满足条件:

$$\begin{cases} x(n) \leq \bar{x} \\ \left| \sum_{i=0}^{p-1} dx(n-i) \right| < p \\ |dx(n)| < \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

即可判定该点为基线, 这里用 $x'(n)$ 表示。将该点存入缓冲区BUF_B的头指针指向的位置, 并在满足条件式(4)的前提下通过式(5)、(6)来计算精密基线 $\bar{x}'$ 。

$$\begin{cases} x'(n) = x(n) \\ S' = S'_p + x'(n) - x'(n-M-1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{x}' = S' / M = S' / 2^m = S' \gg m \quad (6)$$

式中: S' 和 S'_p 分别为当次和前一次缓冲区BUF_B中 M 个点的累加和; $x'(n-M-1)$ 为需要从缓冲区BUF_B的尾指针处读出的数据; $|dx(n)|$ 表示数值微分 $dx(n)$ 的绝对值。

精密基线的准确估计时间不仅与粗基线计算的缓冲区长度 N 、精密基线计算的缓冲区长度 M 及系统采样周期 T_{sample} (或采样频率 f_{sample})有关, 同时还与系统的脉冲通过率有关。因为在计算精密基线的过程中需要扣除正常脉冲的影响, 当脉冲通过率较高时, 在同一时间段实际采样的基线点相对较少。通常情况下默认仪器的最高脉冲通过率是仪器可承受最高脉冲计数率的0.1倍, 即当输入信号脉冲宽度是 $1 \mu\text{s}$ 时, 仪器可承受最高脉冲计数率 10^6 s^{-1} , 则认为仪器的最高脉冲通过率是 10^5 s^{-1} 。若想求得准确的粗基线, 需要在循环缓冲区 N 中的所有数据均为有效的采样数据; 若想求得准确的精密基线, 需要在循环缓冲区 M 中的所有数据均为扣除异常(脉冲和干扰)后的采样数据。因为通常情况下每

M 个采样数据中最多包含 $0.1 \times M$ 个脉冲数据, 即需要 $M/(1-0.1)$ 个采样数据才能填满循环缓冲区 M 。因此, 在仪器处于最高脉冲通过率的情况下, 基线估计的最长时间为:

$$t' = N \times T_{\text{sample}} + \frac{M}{1-0.1} \times T_{\text{sample}} \\ \approx (N + 1.11 \times M) \times T_{\text{sample}} \quad (7)$$

式中: $N \times T_{\text{sample}}$ 表示粗基线的最长准确计算时间; $M/(1-0.1) \times T_{\text{sample}}$ 表示精密基线的最长准确计算时间。若 $N=256$ 、 $M=1\,024$ 、 $f_{\text{sample}}=60\text{ MHz}$, 则 $t' \approx 23\text{ }\mu\text{s}$ 。可以看出基线评估的灵敏度非常好。由于该方法在进行基线估计时求取基线的速度较快, 还可以在在一定程度上抑制低频干扰对脉冲信号的影响。

3 实验结果

为了验证这一方法的正确性和优越性, 项目研究人员利用自制的数字化多道 γ 能谱仪 (探测晶体使用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, FPGA 芯片为 A3P250, A/D 转换芯片为 AD9235-65, 基准电压 1.000 V, A/D 采样速

率为 60 MHz, 能谱曲线道址 0~1 024 道 (即每道间隔所对应的 γ 射线脉冲幅度约为 1 mV)), 在硬件测试条件完全相同的条件下, 以 ^{137}Cs 标准源为测试对象, 对比了利用去异常滑动平均滤波算法进行脉冲基线估计和扣除前后, 662 keV 的特征峰能量分辨率变化情况, 根据半高宽 (Full Width Half Maximum, FWHM) 的方法, 求得结果如表 1 所示。对比表 1 的数据可以看出, 利用去异常滑动平均滤波算法进行脉冲基线估计和扣除后, 能量分辨率得到了优化。

此外, 项目研究人员在常温下于不同时间段, 在东华理工大学的铀矿测井模型中, 对仪器是否利用去异常滑动平均滤波算法进行基线扣除的情况进行了测试, 共 7 个标准铀矿模型井, 不同模型对应的矿物含量分别为: NMF-0.01-0.03 (铀 0.01%、钍 0.03%); MF-0.01-0.03 (铀 0.01%、钍 0.03%); UF-0.1 (铀 0.1%); NMF-0.1-0.03 (铀 0.1%、钍 0.03%); UF-1.0 (铀 1%); MF-1.0-0.1 (铀 1%、钍 0.1%); UF-2.0 (铀 2%)。

表 1 进行脉冲基线扣除前后的能量分辨率对比
Table 1 Energy resolution before and after pulse baseline deduction

测量时间 Measure time / min	无基线扣除时能量分辨率(@662 keV) / % Energy resolution without baseline deduct (@662 keV) / %	有基线扣除时能量分辨率(@662 keV) / % Energy resolution with baseline deduct (@662 keV) / %
5	3.783 1	3.736 0
10	3.807 1	3.736 0
20	3.816 8	3.731 3
30	3.821 7	3.731 3

为了对比基线扣除前后的漂移情况, 选取了几个重要核素的清晰可辨的特征能量 (特征谱峰) 对仪器进行了能量刻度, 实际选取的特征能量峰为铀系镭组中的 ^{214}Bi (0.609 MeV、1.120 MeV、

1.760 MeV、2.204 MeV), 以及钍系中的 ^{208}Ti (2.620 MeV) 等。表 2 为使用去异常滑动平均滤波进行基线扣除前后仪器测量数据对比情况。

表 2 不同模型中基线扣除前后不同特征峰能量所对应道址
Table 2 Channels of characteristic peaks before and after baseline deduction under different U-models

模型编号 Model No.	特征峰能量对应道址 ¹⁾ Peak energy corresponding channel ¹⁾									
	0.609 MeV		1.120 MeV		1.760 MeV		2.204 MeV		2.620 MeV	
	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD
NMF-0.01-0.03	165	166	309	307	494	483	616	603	—	723
MF-0.01-0.03	164	166	305	310	486	483	608	603	—	719
UF-0.1	168	167	314	310	498	484	627	604	—	—
NMF-0.1-0.03	162	168	303	310	489	488	606	605	—	721
UF-1.0	162	168	307	308	488	485	612	606	—	—
MF-1.0-0.1	165	167	310	309	492	483	616	604	732	717
UF-2.0	163	171	308	311	492	486	619	609	—	—

注: 1) 扣前表示基线扣除前, 扣后表示基线扣除后

Note: 1) BD means before baseline deduct, AD means after baseline deduct

根据表 2 中的数据可看出,使用去异常滑动平均滤波方法扣除基线后,特征峰的峰位基本重合,因基线漂移等原因引起的谱漂情况得到显著改善。

根据能量刻度曲线的线性拟合方程,可求出输入脉冲的直流基线 b 。

$$y = kx + b \quad (8)$$

式中: x 表示 γ 射线的特征能量; y 表示特征能量所对应的特征谱峰道址(其实际物理意义为射线的脉冲幅度); k 表示能量刻度曲线的斜率; b 表示能量刻度曲线在坐标轴上的截距(其实际物理意义为输入脉冲的直流基线)。

根据表 2 中的数据和式(8),得到直流基线 b 的漂移情况如图 2 所示。从图 2 可以看出,实现去异常滑动平均滤波后,仪器输入脉冲的基线漂移情况基本得到校正。滤波前的直流基线在 -8 mV 左右波动,滤波后的基线在 0 mV 左右波动,相应的滤波后谱图的能量刻度曲线均可看成经过坐标零点。

同时根据表 2 所示数据可以看出,使用去异常滑动平均滤波方法扣除基线后,特征峰的峰位基本重合,因基线漂移等原因引起的谱漂情况得到显著改善。

实际上,因温度变化引起的谱线漂移更为严重,包括基线漂移和能量刻度曲线的线性(斜率)变化,且能量刻度曲线的变化对谱线漂移的影响远大于基线漂移。但是若能确保仪器的能量刻度曲线经过坐标零点(即扣除直流基线),可以降低对仪器进行实时能量刻度的复杂度,使用时只要一个以上的特征

峰即可完成刻度,比如只需在探测器表面贴上一个如 ^{137}Cs 的单能刻度源(甚至在本底辐射比较小的场合,只用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 晶体本身的 ^{138}La 元素产生的 1.436 MeV 特征峰),无需关心其环境温度变化,即可实现能谱曲线的实时特征峰稳谱。为了验证该算法能否消除因温度变化引起的基线漂移,研究人员在恒温箱中对仪器进行了对比测试,测试的对象为铀矿石粉末,温度变化范围为 $0\sim 60$ $^{\circ}\text{C}$ 。

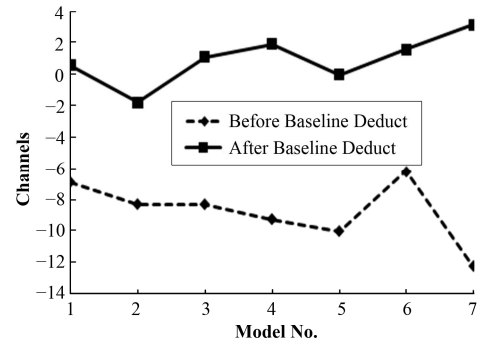


图 2 不同铀矿模型中进行基线扣除前后的基线漂移情况
Fig.2 Baseline drift before and after the deduction under different uranium deposit models

表 3 为不同温度下使用去异常滑动平均滤波算法进行基线扣除前后的仪器测量数据。选取的特征能量峰为铀系镭组中的 ^{214}Bi (0.609 MeV、 1.120 MeV、 1.760 MeV、 2.204 MeV)、 ^{214}Pb (0.352 MeV、 0.295 MeV), 以及钍系中 ^{235}U (0.185 MeV)。

表 3 不同温度下基线扣除前后不同特征峰能量所对应道址
Table 3 Channels of characteristic peaks before and after baseline deduction under different temperature

温度 Temperature / $^{\circ}\text{C}$	特征峰能量对应道址 Peak energy corresponding channel													
	0.185 MeV		0.295 MeV		0.352 MeV		0.609 MeV		1.120 MeV		1.760 MeV		2.204 MeV	
	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD	扣前 BD	扣后 AD
0	58	55	93	86	110	102	189	175	349	320	547	502	684	627
10	56	54	89	85	106	101	184	173	340	316	533	494	667	616
20	53	53	85	83	102	98	178	168	329	307	518	481	649	601
30	51	51	82	80	98	95	171	162	318	297	501	466	628	580
40	48	50	78	78	94	93	165	158	306	289	483	454	605	567
50	45	48	74	75	89	89	157	152	293	278	462	437	579	543
60	41	46	69	71	83	84	148	144	277	263	437	413	549	516

根据表 3 中的数据和式(8),得到仪器在不同温度下进行基线扣除前后的基线漂移情况(图 3)。

从图 3 可以看出,实现去异常滑动平均滤波前,

输入脉冲直流基线随温度而变化,滤波后的基线稳定在 2.5 V 左右。在误差允许范围内,谱图的能量刻度曲线均可看成经过坐标零点。

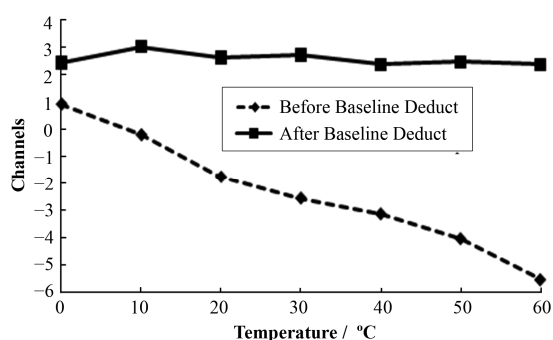


图3 不同温度下的基线漂移情况

Fig.3 Baseline drift under different temperature

4 结语

综上所述,文中提出的去异常滑动平均滤波方法,在不同的脉冲通过率较低或较高、不同的环境温度下,均能够得到较好的脉冲基线估计效果。该算法简单,能够在FPGA上予以编程实现;运算速度快,能够实时跟踪原始输入脉冲基线的变化;准确性好、灵敏度高,能够抑制低频信号干扰和温度漂移等因素对系统的影响。不仅可以在一定程度上抑制谱线漂移、优化了能量分辨率,而且有助于降低仪器能量刻度的复杂度。此方法同样适用于测量其他类型射线(如X射线)的数字化谱仪。

参考文献

- Geraci A, Rech I, Gatti E, *et al.* Shared baseline restoration at minimum noise for high resolution spectroscopy[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, **482**: 441-448. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01509-1.
- Fairstein E. Gated baseline restorer with adjustable asymmetry[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975, **22**(1): 463-466. DOI: 10.1109/TNS.1975.4327681.
- Ohkawa S, Husimi K. Logarithmic converter stabilized by a baseline restorer employing gain switching[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1979, **26**(1): 433-437. DOI: 10.1109/TNS.1979.4329671.
- Kuwata M, Maeda H. New baseline restorer based on feed forward differential compensation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, **41**(4): 1236-1239. DOI: 10.1109/23.322891.
- Abbiati R, Gatti E, Geraci A, *et al.* A new digital estimation technique for baseline restoration[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, **548**: 507-516. DOI: 10.1016/j.nima.2005.04.072.
- Geraci A, Rech I, Gatti E, *et al.* Shared baseline restoration at minimum noise for high resolution spectroscopy[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Research A, 2002, **482**: 441. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01509-1.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2005.06.007. 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. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2005.06.007.
- 邱晓林, 方国明, 弟宇鸣, 等. 核辐射脉冲幅度分析的基线卡尔曼滤波估计[J]. 原子能科学技术, 2007, **41**(3): 375-377. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2007.03.025. QIU Xiaolin, FANG Guoming, DI Yuming, *et al.* Baseline Kalman filter estimation method for nuclear radiation pulse height analysis[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, **41**(3): 375-377. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2007.03.025.
- 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 radiation pulse height analysis[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, **32**(2): 203-206. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.02.020.
- Li H D, Wang C, Zhang Y X, *et al.* A new statistics-based online baseline restorer for a high count-rate fully digital system[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, **57**(2): 550-555. DOI: 10.1109/TNS.2009.2036914.
- 曾国强, 欧阳晓平, 喻明福, 等. 手持式单板 500 MHz 采样率数字化多道设计[J]. 核技术, 2017, **40**(3): 030401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.030401. ZENG Guoqiang, OUYANG Xiaoping, YU Mingfu, *et al.* Design of handheld 500-MHz digital multi-channel analyzer on single board[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(3): 030401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.030401.
- 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.