

基于基线自动恢复技术的数字多道能谱仪

陈 伟^{1,2} 周建斌¹ 方 方¹ 洪 旭¹ 赵 祥¹ 周 伟¹ 马英杰¹

1 (成都理工大学 核技术与自动化工程学院 成都 610059)

2 (成都航空职业技术学院 信息工程学院 成都 610100)

摘要 不同放射性强度的测量应用中,探测器输出核脉冲信号的基线将发生漂移,进而造成多道能谱仪的谱线漂移和能量分辨率损失。尽管采用数字基线估计方法可以对核脉冲信号的基线进行正确估计,但纯数字基线恢复算法无法有效处理核脉冲信号基线漂移对前端电路的影响。采用最小平均值基线估计方法,先在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)中进行数字基线估计;然后通过 SPI 总线将基线估计值传入微控制器(Micro-Controller Unit, MCU),MCU 根据基线值判断是否进行基线调节,将基线估计值传入数模转换器(Digital-to-analog Converter, DAC);最后在前端电路中实现核脉冲信号的基线恢复。基于 LaBr₃(Ce)探测器的测试结果表明:采用该基线自动恢复技术的数字化多道能谱仪能够实现核脉冲信号的基线自动恢复。在高放射性测量条件下,测量系统能够解决因基线漂移引起的谱线漂移问题,使系统能量分辨率保持稳定。

关键词 基线恢复,多道能谱仪,谱线漂移,能量分辨率

中图分类号 TL822⁺.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.050401

Design of digital multi-channel spectrometer based on auto-baseline restoration

CHEN Wei^{1,2} ZHOU Jianbin¹ FANG Fang¹ HONG Xu¹ ZHAO Xiang¹ ZHOU Wei¹ MA Yingjie¹

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

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

Abstract [Background] The baseline drift of detector output could result in spectrum drift and energy resolution loss of the multi-channel spectrometer. Though baseline estimation approaches can obtain the baseline of nuclear signals, they are not able to reduce the effect of baseline drift on the front-end circuit. [Purpose] This study aims to design and implement a multi-channel spectrometer with auto-baseline restoration functionality. [Methods] First of all, the baseline of detector's output is estimated by using minimum average method and implemented in the field-programmable gate array (FPGA). Then the estimation value is sent to micro-controller unit (MCU) for regulation condition judgment, and to digital-to-analog converter (DAC) for necessary baseline adjustment. Finally, the baseline of detector output is restored in the front-end circuit. A multi-channel spectrometer is designed based on LaBr₃(Ce) detector and this auto-baseline restoration functionality. [Results] The experimental results imply that the designed multi-channel spectrometer can realize baseline restoration automatically. [Conclusion] Under the situation of high radioactivity, the baseline drift of detector output can be solved by this multi-channel spectrometer, and the

国家重点研发计划项目(No.2016YFC1402505)、国家自然科学基金(No.11475036、No.11675028)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: 周建斌, E-mail: zjb@cdut.edu.cn

收稿日期: 2017-05-25, 修回日期: 2017-08-10

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2016YFC1402505), National Natural Science Foundation of China (No.11475036, No.11675028)

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

Corresponding author: ZHOU Jianbin, E-mail: zjb@cdut.edu.cn

Received date: 2017-05-25, revised date: 2017-08-10

energy resolution of the system can remain stable.

Key words Baseline restoration, Multi-channel spectrometer, Spectrum drift, Energy resolution

在 20 世纪 50 年代, 多道能谱分析技术就在科学、工业、医疗领域占有重要地位。随着数字信号处理与高速模数转换(Analog-to-digital Converter, ADC)技术的发展, 数字化多道能谱分析技术已获得广泛应用^[1-2]。由于受电源噪声、温度、探测器漏电流和较差的极零相消处理等因素的影响, 探测器输出核脉冲信号的基线会发生漂移; 另外, 高放射性条件下产生的脉冲堆积也会引起核脉冲信号的基线漂移。基线漂移使得有效信号叠加在可能不为零的基线上, 干扰真实脉冲幅度的提取, 导致测量系统的能量分辨率损失。因此, 必须采用有效的方法恢复核脉冲信号的基线, 以改善测量系统的能量分辨率^[3-10]。

从模拟方法到数字方法, 众多机构和学者对基线恢复技术进行了大量理论与方法研究。模拟多道能谱仪采用的基线恢复器虽能有效消除基线漂移和涨落, 但易受电子线路和不确定因素的影响。当前广泛使用的数字基线恢复方法有 Kalman 滤波器法^[5]、IIR 滤波器法、最小噪声加权法^[6]、零面积滤波恢复法^[7]等。如, 李彦波等^[8]针对相邻采样点取平均值算法的不足, 提出了一种基于补偿最小二乘法的基线估计算法; Kafae^[9]提出了双极尖状成形来减轻基线漂移和缓解堆积方法。这些方法运算量较大, 不适合现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)编程; 李伟男等^[10]提出的动态实时求平均估计基线的方法, 易于在 FPGA 中实现, 在高计数率测量条件下, 该方法能够改善测量系统能量分辨率, 且具有较高的准确性、实时性和灵敏度。以上各基线恢复方法为纯数字算法, 没有实际解决探测器输出核脉冲信号基线漂移对前端电路的影响, 以及在高放射性测量条件下因核脉冲信号基线漂移引起的谱线漂移和能量分辨率损失问题。本文设计的基于基线自动恢复的数字化多道能谱仪可以很好地改善这些问题。

1 探测器输出信号的基线漂移

闪烁体-光电倍增管系统在核辐射探测器中有广泛应用。它的工作原理是: 入射射线与闪烁体原子发生相互作用, 使其发生电离或激发, 闪烁体原子在退激过程中发射出波长近似可见光的闪烁光子; 当闪烁光子到达光阴极后, 与光阴极发生光电效应, 闪烁光子转换为光电子; 聚焦极作用使光阴极产生的光电子尽可能多地打到光电倍增管的第一

打拿极上, 以产生更多的电子; 这些电子在打拿极的作用下加速、倍增, 最终在阳极形成电信号, 该信号的幅度与入射射线的能量成正比。由于光电倍增管的最末三级打拿极中的次级电子数量已经很大, 在相应分压电阻上产生的脉冲电流也很大。因此, 通常分压电阻并联旁路电容来改善脉冲电流过大时对极间电压的影响。另外, 为了避免空间电荷效应, 最末两级打拿极间的电位差需设置高一些。对于高计数率场合, 可使用稳定性更好的晶体管射极跟随器分压网络^[11-15], 来减小分压器效应的不利影响。

对核能谱测量系统中的基线漂移现象分析发现, 后级处理电路引入的基线漂移较小, 出现基线漂移的源头在探测器光电倍增管的分压网络中, 探测器输出信号的基线漂移量与被测对象的放射性强度有关。为观察在不同放射性条件下探测器输出核脉冲信号基线漂移现象, 采用法国圣戈班公司的 $\phi 75\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ LaBr₃(Ce)探测器, 分别在无放射源、仅 ^{137}Cs 源、 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}$ 源和 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}+^{22}\text{Na}$ 源条件下记录探测输出核脉冲信号的基线道址, 实验结果见图 1。由图 1 可以看出, 无放射源时, 探测器输出核脉冲信号的基线道址集中在 21 道附近; 仅 ^{137}Cs 源时, 基线道址在 20 道附近, 与环境本底测量时相比漂移了 1 道; 当 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}$ 源时, 基线道址在 18 道附近, 与环境本底测量时相比漂移了 3 道; 当 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}+^{22}\text{Na}$ 源时, 基线道址在 12 道附近, 与环境本底测量时相比漂移了 9 道。可以看出, 随着测量对象放射性强度的增加, 探测器输出核脉冲信号的基线漂移变大。

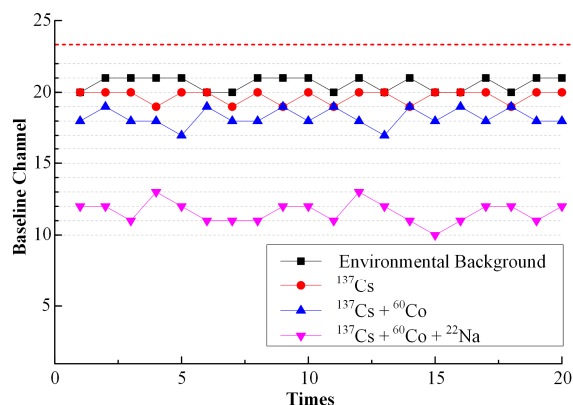


图 1 不同放射性强度下探测器输出信号的基线道址
Fig.1 Baseline channel of detector output signal under different radioactive intensities

2 数字化多道能谱仪设计

2.1 系统原理

数字化多道能谱仪 (Digital Multi-Channel Analyzer, DMCA) 主要由探测器、前端电路、ADC、数字信号处理单元、MCU 和计算机组成^[2,12], 系统原理框图如图 2 所示。前端电路的主要功能是对探测器输出核脉冲信号进行线性放大, 使其幅度在 ADC 的采样电压范围; 另外, 前端电路还需完成核脉冲信号的基线调节工作。ADC 采集后的数字信号被送入数字脉冲处理单元进行数字处理, 完成基线估计、滤波成形、堆积识别、幅值提取等任务。MCU 一方面通过 SPI 总线获取 FPGA 中的数字基线估计值, 经过基线漂移判别算法计算出调节量, 控制数模转换器 (Digital-to-analog Converter, DAC) 输出模拟调整信号, 送至前级偏置调整电路恢复基线; 另一方面通过 CAN 通讯端口将前级数字脉冲处理后的数据上传至计算机进行数据分析与显示。计算机系统的主要功能有: 获取测量数据、完成能量刻度、谱数据分析与处理、测量数据存储显示等。

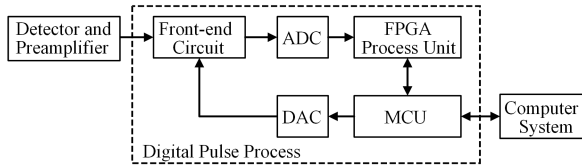


图 2 数字化多道能谱仪框图
Fig.2 Block diagram of digital multi-channel spectrometer

2.2 最小平均值基线估计算法

在数字化多道能谱仪中, 核脉冲信号的基线估计在 FPGA 中完成。由于 FPGA 不擅长除法运算, 为提高系统的运行效率, 应尽量采用简单算法。实际应用中, 短时间内脉冲基线的漂移量较小, 因此设计了一种最小平均值算法来求取一段时间的基线估计值, 方法如下: 高速 ADC 对脉冲信号连续采样, FPGA 取 X 个连续采样值并求出最小值, 记为 A_i ($i=1, 2, 3, \dots, Y$), 然后重复 Y 次上述操作, 得到最小值数列, 求该数列的平均值并将其作为基线估

计值, 算法如下:

$$\bar{A} = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y A_i \quad (1)$$

式中: $\bar{A}$ 为最小平均基线估计值; Y 为最小值的个数, 为便于 FPGA 移位计算, Y 通常取 2 的 n 次幂。

X 为采样点数, 为能获取到堆积脉冲的最低幅值, X 的取值应大于两个脉冲宽度所对应的采样点数。探测器输出信号基线估计流程如图 3 所示。

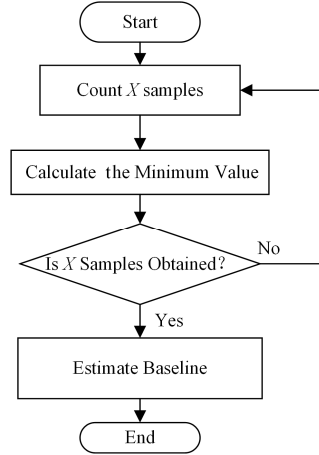


图 3 基线估计流程图
Fig.3 Flow chart of baseline estimation

2.3 前端电路

前端电路的原理如图 4 所示。第一级 (图 4 第 I 区) 为放大倍数在 10 倍以内的固定增益电路; 第二级 (图 4 第 II 区) 为偏置调节电路, 反向端 BL_ADJ 信号来自后级带基线调整量的 DAC 输出, 用于基线调节; 第三级 (图 4 第 III 区) 为程控增益放大电路, 由 MCU 控制实现核脉冲信号幅度的线性放大; 第四级 (图 4 第 IV 区) 选用低失真差分 ADC 驱动器 AD8138 来抑制共模噪声及干扰, 将单端模拟核信号转换成差分输出, 使后级 ADC 性能达到最佳; 第五级为高速 ADC 转换电路, 选用美国 Analog Devices 公司的 $2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 12 位多级差分流水线结构的模数转换器 AD9235 (图 4 第 V 区)。

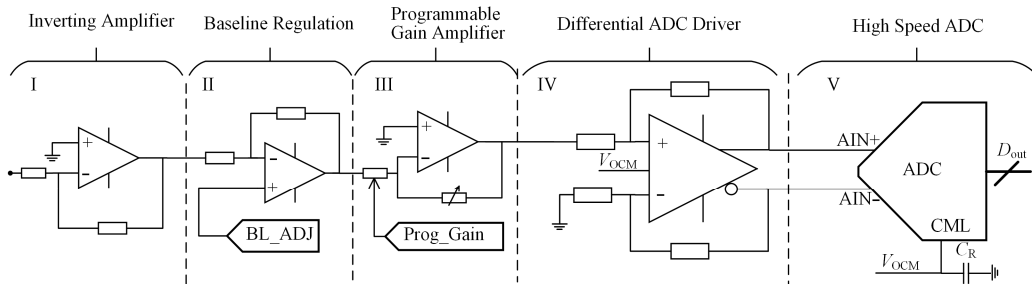


图 4 前端电路原理图
Fig.4 Schematic diagram of the front-end circuit

2.4 数字脉冲处理

图 5 是 FPGA 中的数字处理单元功能框图, 图中细实线箭头表示控制信号, 粗实线箭头表示总线数据。采样控制模块控制高速 ADC, 将调理后的核信号转换为数字信号, 并送至先进先出(First In First Out, FIFO)缓存。基线估计模块从 FIFO 读取数据, 运行最小平均基线估计算法, 该模块与后级 MCU 控制的 DAC 和前级偏置调整电路共同完成基线恢复。梯形成形分为快成形和慢成形两个结构相同的模块, 快成形模块将脉冲成形为宽度较小的梯形脉冲, 用作慢成形的控制信号; 快成形后的数据进入阈值去噪模块, 剔除噪声后送入堆积判弃模块, 剔除噪声后送入堆积判弃模块,

一方面用作慢成形时的幅值提取的控制信号, 另一方面产生死时间信号供死时间记录。慢成形后的数据, 进入幅值提取模块, 然后根据幅度大小存入谱线 RAM 中形成谱数据。图中的 FIFO、波形 RAM、谱线 RAM 均为双端口, 输入输出端口可以独立进行读写操作。借助多路选择器, 上位机可自由选择读取 ADC 采样原始脉冲数据、梯形成形后脉冲数据、多道谱数据, 方便对核信号的分析与处理。逻辑控制模块用于协调各模块之间的数据同步, 参数寄存器用于存储系统的配置参数, 如启停状态、脉冲幅值的放大倍数、阈值去噪模块的阈值、梯形成形参数等。

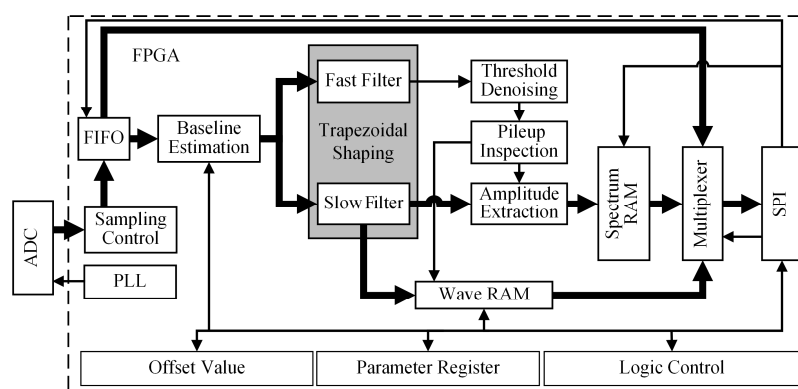


图 5 FPGA 中的实时处理功能框图
Fig.5 Block diagram of the real time processing unit in FPGA

2.5 基线恢复的实现

MCU 选用 STM32F103 处理器, 它的主要任务是建立数据通信和控制基线调节。MCU 中设有基线漂移阈值寄存器, 允许基线在一定范围内波动。MCU 获取 FPGA 中的基线估计值后, 先将估计值与基线漂移阈值寄存器内的设定值进行比较, 当新基线值的漂移量大于设定阈值时, 触发后续的基线调整进程; MCU 将基线估计值运算后得到带调节量的调整值, 该调整值受调整精度阈值的限定; 当调整值大于调整精度阈值时, MCU 将调整值通过 DAC 输出至信号调理电路的基线调整端 BL_ADJ (图 4 第 III 区) 进行核脉冲信号的基线调节; 当调整值小于调整精度阈值时, 此时的基线值认为是 0 mV, 不做基线调节。图 6 为基线恢复流程图。调整精度阈值由高速 ADC 决定, 本文选用的 12 位高速 ADC, 输入信号满量程为 2 V, 则最小刻度单位为 $2/2^{12} \approx 0.5 \text{ mV}$, 故本文中的调整精度阈值为 0.5 mV。短时间内的脉冲基线漂移量较小, 为了较准确地估计一段时间内的基线水平, 减小最小平均基线估计误差, 应合理设置最小值采样点数 M 和增

加最小值个数 N , 即以增加采样时间的方式获取基线估计值。本设计中采用的基线恢复调节周期为 1 s。

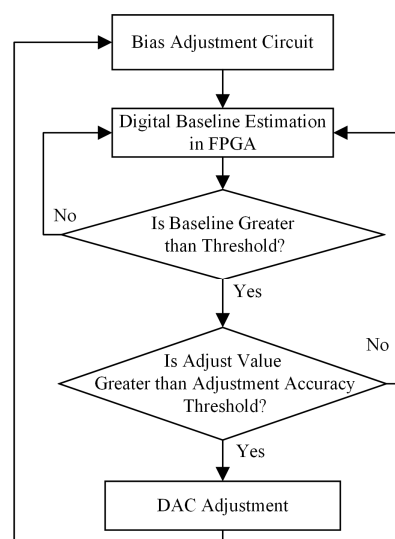


图 6 基线自动恢复流程图
Fig.6 Flow chart of auto-baseline restoration

3 实验与测试

3.1 基线实时调整测试

对 ^{137}Cs 进行多次测量, 系统的能量分辨率和特征峰所在道址均稳定, 图 7 为任选出的一组谱线。特征峰 661 keV 所在的峰位在 435 道, 能量分辨率为 2.92%。测量条件不变, 通过改变探测器输出核脉冲信号的偏置电压, 模拟核脉冲信号的基线漂移。图 8(a) 为设定的基线值小于实际基线值时测得的能谱图。由图 8(a) 可以看出, I 区谱线低能区域的高计数率异常谱线产生的原因为初始基线值较低, 噪声被作为有效信号被记录; II 区所示谱线区域, 谱线向低能方向自动调整; 图 8(b) 为设定的基线值大于实际基线值时测得的能谱图, 由图 8(b) 可以看出, III 区所示谱线区域, 特征峰向高能方向自动调整。综合分析图 8(a)、(b) 的谱线可得, II、III 区谱线的

异常是由于初始基线值与实际基线值相差较大, 影响了脉冲信号的幅值, 进而使峰位发生漂移, 两种测试方式的 ^{137}Cs 特征峰最终均稳定在 435 道。调整后的基线值可作为后续同等测量条件下的基线初始值。

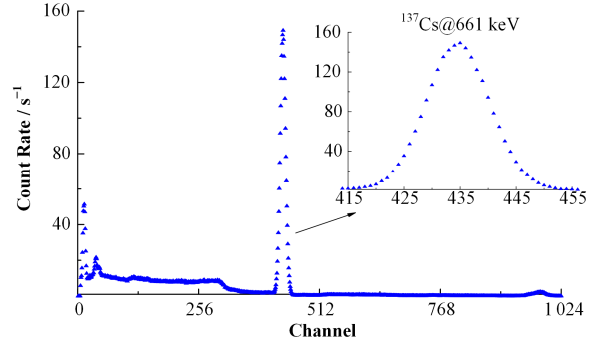


图 7 ^{137}Cs 源能谱
Fig.7 Energy spectrum of ^{137}Cs source

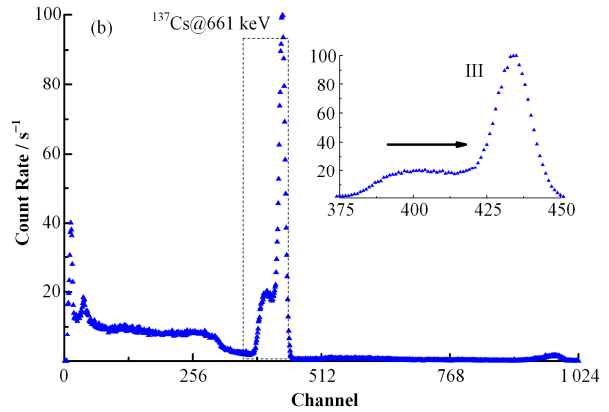
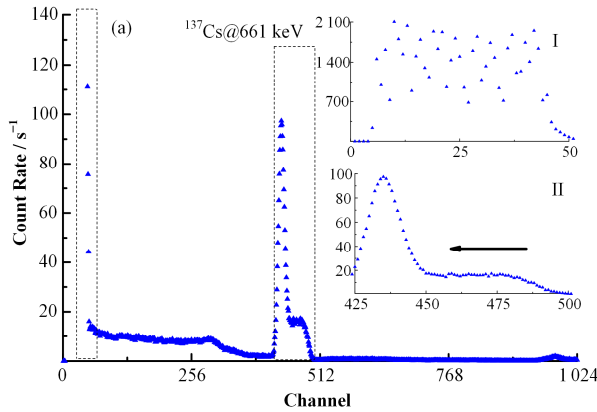


图 8 初始偏置值小于(a)和大于(b)实际值时的基线自动调整测试
Fig.8 Auto-baseline regulation test with the set value more (a) and less (b) than the actual values

3.2 基线自动恢复测试

为验证算法的准确性, 分别在 ^{137}Cs 源和 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}+^{22}\text{Na}$ 源两种情况下进行能谱测量, $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}+^{22}\text{Na}$ 是为了模拟高放射性条件。在不采用基线自动恢复算法情况下, 不同放射性强度测量结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 仅 ^{137}Cs 源时, 特征峰峰位在 435 道, 计算得到能量分辨率为 3.03%; 在 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}+^{22}\text{Na}$ 源时, ^{137}Cs 特征峰位于 420 道, 此时的能量分辨率为 3.27%。与仅 ^{137}Cs 源的测量结果对比, 在高放射性条件下, ^{137}Cs 特征峰向左漂移了 15 道。

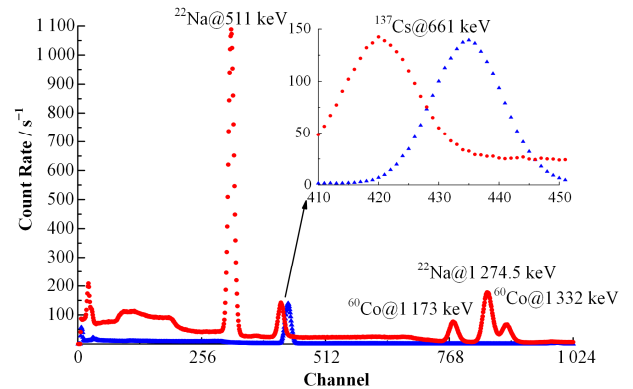


图 9 未采用基线恢复时不同放射性强度测量能谱
Fig.9 Measurement spectra under different radioactive intensities without baseline restoration

采用基线自动恢复算法后,在相同测量条件下,不同放射性强度测量结果如图 10 所示。可以看出,在高计数率条件下 ^{137}Cs 的特征峰峰位在 434 道,计算得到能量分辨率为 3.17%,与仅 ^{137}Cs 源时测量结果对比,峰位仅左移了 1 道,能量分辨率指标下降了 0.25%。

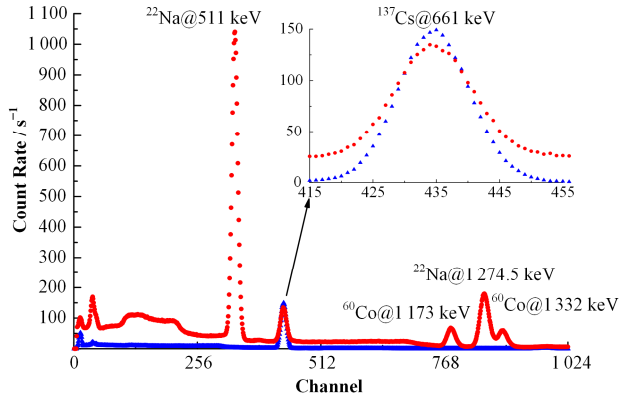


图 10 采用基线恢复时不同放射性强度测量能谱
Fig.10 Measurement spectrums under different radioactive intensities with baseline restoration

3.3 能量线性测试

采用 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}+^{22}\text{Na}$ 源,测量得到混合能谱,各个放射源的特征峰能量以及在能谱中的道址如表 1 所示。对这些能量与道址进行线性拟合,得到二者之间的线性关系,如图 11 所示,其中线性拟合参数 $R^2=0.99999$,结果表明:测量系统具有较好的能量线性。

表 1 特征峰峰位与对应道址
Table 1 Peak positions of nuclide and their corresponding channels

核素 Nuclide	能量 Energy / keV	道址 Channel
^{22}Na	511.00	333.64
^{137}Cs	661.65	434.54
^{60}Co	1173.2	782.05
^{22}Na	1274.5	850.97
^{137}Co	1332.5	888.57

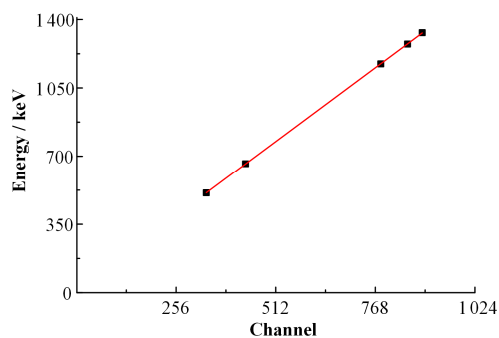


图 11 道址与能量的线性拟合结果
Fig.11 Liner fitting result between channel and energy

4 结语

针对不同放射性强度的测量应用中,闪烁体-光电倍增管探测器输出核脉冲信号的基线发生漂移的问题,提出了数字基线估计与硬件基线恢复相结合的方法,并基于 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器,设计了具有基线自动恢复功能的数字化多道能谱仪。测试表明:设计系统在 511~1332.5 keV 能量范围,能量-道址线性拟合参数 $R^2=0.99999$;在 $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}+^{22}\text{Na}$ 源条件下,采用基线自动恢复方法可将 ^{137}Cs 的 661 keV 特征峰稳定在 434 道,与仅 ^{137}Cs 源时相比,峰位相差 1 道;同时,采用基线自动恢复可以使系统能量分辨率保持稳定。测量系统能够解决核脉冲信号基线漂移引起的谱线漂移问题。

参考文献

- Simões J B, Correia C. Pulse processing architectures[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1999, 422(1-3): 405-410. DOI: 10.1016/S0168-9002(98)00992-9.
- 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.
- Abbiati R, Gatti E, Geraci A, et al. A new digital estimation technique for baseline restoration[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2005, 548(3): 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 and Methods in Physics Research A, 2002, 482(1-2): 441-448. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01509-1.
- 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.
- 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.
- 7 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.
- 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 squares in DMCA[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(8): 991–994. DOI: 10.3969/j.issn. 0258-0934. 2014.08.017.
- 9 Kafaee M, Moussavi-Zarandi A. Baseline restoration and pile-up correction based on bipolar cusp-like shaping for high-resolution radiation spectroscopy[J]. Journal of the Korean Physical Societ, 2016, **68**(8): 960–964. DOI: 10.3938/jkps.68.960.
- 10 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.
- 11 梁卫平, 胡颖睿, 肖无云, 等. 数字化多道脉冲幅度分析器调理电路设计[J]. 核电子学与探测技术, 2012, **32**(4): 462–465. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.04.021.
LIANG Weiping, HU Yingrui, XIAO Wuyun, *et al.* Digital multi-channel pulse height analyze pre-filter circuit design[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, **32**(4): 462–465. DOI: 10.3969/j.issn. 0258-0934.2012.04.021.
- 12 钱建复, 沈庭云. 核辐射剂量学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 161–193.
QIAN Jianfu, SHEN Tingyun. Nuclear radiation dosimetry[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 161–193.
- 13 曹忠, 黄正德, 陈群. 高计数率下闪烁体-光电倍增管系统增益的稳定[J]. 核技术, 1990, **13**(2): 85–90.
CAO Zhong, HUANG Zhengde, CHEN Qun. Gain stabilization of the scintillator-photomultiplier counting rates[J]. Nuclear Techniques, 1990, **13**(2): 85–90.
- 14 张思玲, 董成富, 原振东, 等. 低功耗和快速补偿的光电倍增管偏置电路[J]. 核电子学与探测技术, 2000, **20**(3): 236–239.
ZHANG Siling, DONG Chengfu, YUAN Zhendong, *et al.* Low consumption and fast recovery photomultiplier bases[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, **20**(3): 236–239.
- 15 魏福利, 王培伟, 袁媛, 等. 光电倍增管线性电流扩展研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(9): 986–990. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.09.012.
WEI Fuli, WANG Peiwei, YUAN Yuan, *et al.* The study of linear current extention of PMT[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **31**(9): 986–990. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.09.012.