

新型 LaBr₃ 探测器数字化多道谱仪研制

韩镇阳¹ 汤晓斌^{1,2} 龚 频¹ 王 鹏¹ 何建平¹ 高 乐¹ 颜 文¹

(1. 南京航空航天大学核科学与工程系, 南京 211106; 2. 江苏省核能装备材料工程实验室, 南京 211106)

摘要: 介绍了具备温漂修正功能的 LaBr₃ 探测器数字化多道谱仪的研制。研制中设计了基于 FPGA 的数字化信号处理算法和电路单元, 研究了 LaBr₃ 探测器在环境温度变化时的能谱漂移并实现了温度补偿算法。测试结果表明, 开发的新型数字化多道谱仪具有良好的能量分辨率与能量线性度, 针对 LaBr₃ 探测器具有良好的温漂修正效果。

关键词: LaBr₃; 数字多道; FPGA; 温漂校正

中图分类号: TL812+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2017)9-0946-06

LaBr₃ 探测器相比其他闪烁体探测器具有能量分辨率高的优点, 常用于环境 γ 射线的能谱测量^[1-3]。由 LaBr₃ 探测器组成的户外定点放射性监测装置, 可以对环境中的放射性核素种类进行连续监控^[4-5]。然而研究表明, 环境温度变化会引起闪烁体探测器光输出和光电倍增管增益的改变, 导致测得的能谱产生温漂现象^[6-7]。温漂引起的能谱畸变将极大地影响 LaBr₃ 户外定点放射性监测装置对环境核素识别的正确率, 造成错误的分析结果。Pausch G 等人利用光脉冲衰减时间法对 NaI 闪烁体的温漂进行修正, 此方法对 LaBr₃ 探测器并不适用^[8-9]。有一些方法例如相关性原理法、外部参考源法、时延估计法和全谱特征法等, 可以实现 LaBr₃ 探测器的温漂修正, 但存在通用性、能

谱本底增加等问题^[10-13]。

本文针对通用 LaBr₃ 探测器开发了一款基于 FPGA 的数字化多道谱仪, 并在数字多道中加入了温漂修正模块, 用于解决 LaBr₃ 探测器用于户外定点放射性监测的温漂问题。通过改变环境温度, 进行了能谱获取实验并验证系统的稳谱效果。

1 系统硬件设计

图 1(a) 是新研制的数字化多道谱仪系统, 由一块数字化信号处理(DPP) 电路板和一块数字温度传感器组成。温度传感器 DS18B20 的供电直接由 DPP 板提供, 温度数据通过串行方式传送至 FPGA 端口。DPP 电路板主要包含前端信号调理模块、模数转换(ADC) 模块、FPGA 模块、USB 模块和电源转换模块, 如图 1(b) 所示。

在探头输出信号接入 DPP 板后, 经前端信号调理模块实现脉冲整形和滤波放大, 送入采用 12 位高速模数转换芯片的 ADC 模块完成脉冲数字化。ADC 输出信号通过低压差分信号(LVDS) 模式进入 FPGA 进行后续处理。FPGA 的时钟源为 50 MHz, 为 ADC 提供频率为

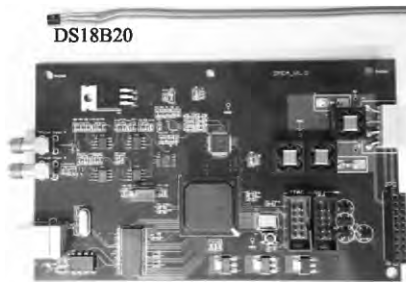
收稿日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(11675078); 江苏省重点研发计划(BE2017729); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

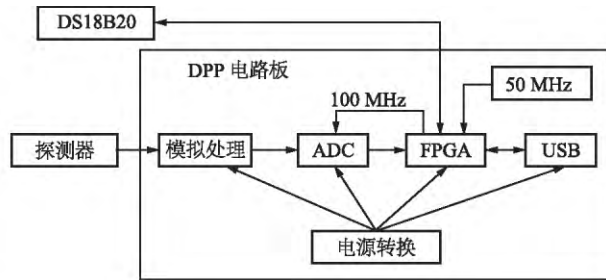
作者简介: 韩镇阳(1990—), 男, 江苏赣榆人, 在读硕士生, 攻读方向为辐射探测方法与核仪器研发。

100 MHz 采样时钟。为了保证电源质量,供电电压先经过电磁干扰(EMI)滤波器,再由线性

稳压器件转换为多种电压。



(a) 实物图



(b) DPP 电路板模块框图

图 1 数字化多道谱仪系统

2 FPGA 算法设计

FPGA 是数字化信号处理的核心,实现数字化脉冲成形、触发和幅度分析等算法。信号处理过程采用流水线方式,如图 2 所示。ADC 采样数据首先通过 LVDS 解码,再经快慢成形,最后进入幅度分析(PHA)和脉冲触发系统。PHA 模块获取去除基线的脉冲幅度值,并送入温度补偿模块。同时,温度监测模块实时获取温度数据,调整脉冲幅度并转换为道址,送入到能谱累加模块。能谱缓存采用 32 位双口 RAM 实现,无需增加外部存储单元。

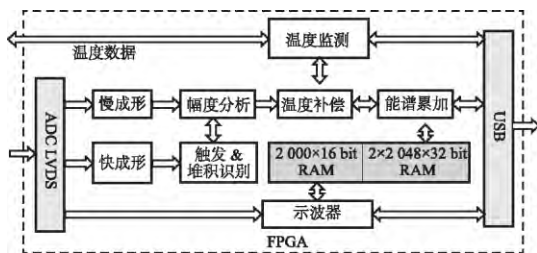
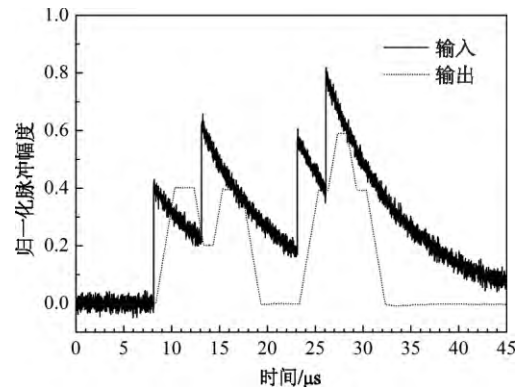


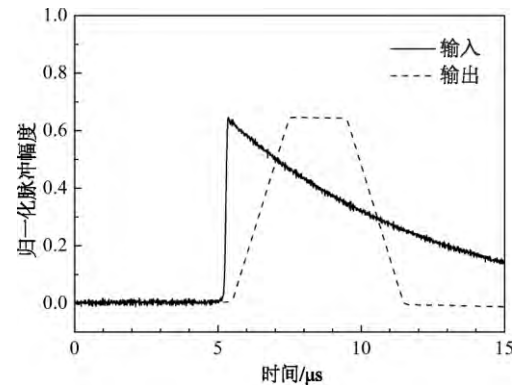
图 2 FPGA 脉冲信号处理流程图

为了检验 FPGA 内的脉冲成形算法效果,采用带有高斯白噪声的仿真脉冲作为输入信号,结果如图 3(a) 所示。成形脉冲比输入脉冲更平滑,有利于提高幅度获取准确性。前两个输入脉冲有一定幅度叠加,但成形后仍可正常分离。后两个输入脉冲间隔小于上升时间与平顶时间之和,因此成形后发生堆积,可由堆积拒绝(PUR)模块自动去除。图 3(b) 为抓取到的

LaBr₃探测器一次粒子事件的实时成形脉冲,成形参数与图 3(a) 中相同。得到的梯形脉冲顶部平坦,显示出成形算法具备较好的时间常数匹配性。



(a) 脉冲堆积仿真结果



(b) 实测成形结果

图 3 梯形成形测试

3 温漂修正模块设计

闪烁体探测器的温漂可以通过其温度特性来进行修正,传统方法通常由反馈电路实现。直接在 FPGA 内实现温漂修正模块,对每个脉冲进行补偿,则无需设计专门的硬件电路。为了获取能谱漂移与温度的依赖关系,采用二次多项式拟合获得的相对峰位曲线,可以用下式表示:

$$F(T_k) = \frac{C_k}{C_0} = \sum_{j=0}^2 a_j \cdot T_k^j \quad (1)$$

式中: C_k 和 C_0 分别为温度 T_k 时和参考温度对应的特征峰道址; a_j 为多项式的系数; $F(T_k)$ 定义为温度 T_k 时的相对峰位,作为特征峰峰位的修正系数。每一个脉冲在经过成形后,采用 $F(T_k)$ 对梯形平顶值进行修正,则修正过后的脉冲幅度可以表示为:

$$A_k^c = \frac{A_k}{F(T_k)} = \frac{A_k}{a_0 + a_1 \cdot T_k + a_2 \cdot T_k^2} \quad (2)$$

式中: A_k 为温度 T_k 时未经修正的脉冲幅度; A_k^c 为修正后的脉冲幅度。如图 4 所示,整个计算过程采用流水线结构逐级进行,将 $F(T_k)$ 的系数 a_j 存储到寄存器中,浮点型运算单元由 IP 核生成。每次更新 $F(T_k)$ 需经过 20 个时钟周期,除法器 DIV 单元延迟为 15 个周期,但对脉冲处理速度无影响。

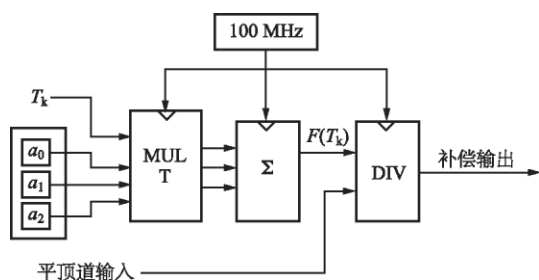


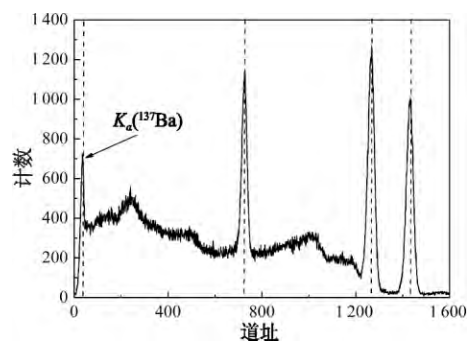
图 4 温漂修正模块算法流程

4 主要性能测试

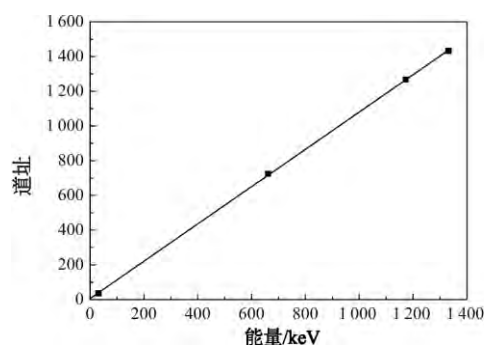
4.1 能量线性度与能量分辨率

采用新研制的数字多道谱仪系统实测了 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 能谱,如图 5(a) 所示。将能谱中四个特征能量 32 keV、662 keV、1 173 keV 和 1 332 keV 与道址进行线性拟合,线性相关性好于 99.9%,结果如图 5(b) 所示。能量为 662 keV、

1 173 keV 和 1 332 keV 的三个全能峰对应的能量分辨率分别为 2.8%、2.6% 和 2.7%。测试结果显示数字化谱仪系统的能量线性度与能量分辨率性能良好。



(a) $^{137}\text{Cs} + ^{60}\text{Co}$ 源的能谱

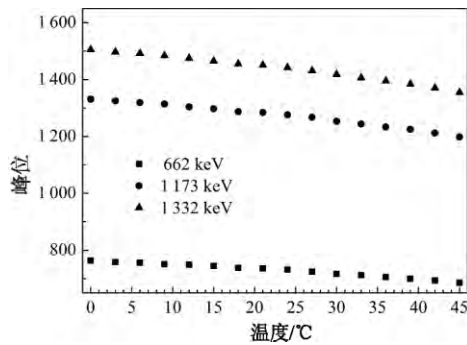


(b) 能量与道址线性拟合结果

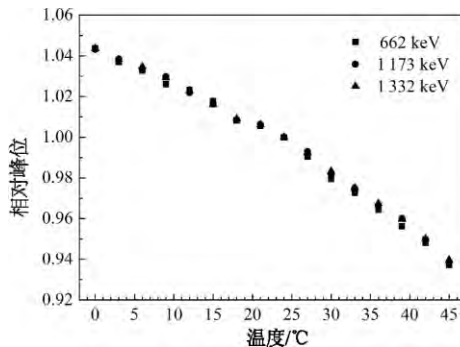
图 5 能量线性度测试

4.2 峰漂曲线获取

峰漂曲线试验时使用了 1.5 英寸×1.5 英寸 (1 英寸=2.540 0 厘米) LaBr_3 探测器,将温度传感器和探测器放入德瑞克 DRK641 型高低温箱内,连接出前放和温度信号线至 DPP 电路板。控制高低温箱从 0 °C 开始以 3 °C 为间隔提升到 45 °C,每当调节到新的温度时保持 2 h 使探测器温度稳定再进行 200 s 能谱获取。试验中使用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 实验源。试验结果如图 6(a) 所示,三个特征峰峰位随温度向左漂移,与探测器的负温度效应一致。图 6(b) 是将峰位归一化到参考温度 24 °C 时的相对峰位变化,三个能量的特征峰相对峰位与温度的关系基本一致。



(a) 特征峰峰位随温度变化



(b) 相对峰位随温度变化

图6 峰漂曲线获取结果

4.3 温漂校正效果

在相同试验条件下对数字多道谱仪系统采用的温漂修正算法进行测试。测试时温度从 0 °C 开始,以 3 °C/h 的变化速度提升至 45 °C,每小时进行一次 200 s 能谱获取,测试时将采用和未采用温度补偿算法的代码分别配置 FPGA。图 7 为三个时间点的能谱,未经温漂校正的三个时间点的能谱存在较大漂移,修正后的能谱虽然仍存在一些偏移,但比未经修正的漂移明显减小,修正后存在的偏移量可能与温度测量的误差有关。图 8 统计了修正前后¹³⁷Cs 和⁶⁰Co 源三个特征峰的峰位变化。对于能量为 1 332 keV 的特征峰,未经修正时最大峰位漂移为 148 道,修正后减小为 9 道。测试结果表明,新研制的数字多道谱仪系统的温漂校正效果明显。

4.4 稳定性测试

在常温下对数字多道谱仪系统进行了稳定性测试。测试采用¹³⁷Cs 和⁶⁰Co 放射源。系统连续工作 8 h 测得的峰位变化如图 9 所示,1 332 keV 峰位漂移量最大值为 7 道。为进一步检验设备的长期工作稳定性,令设备连续工

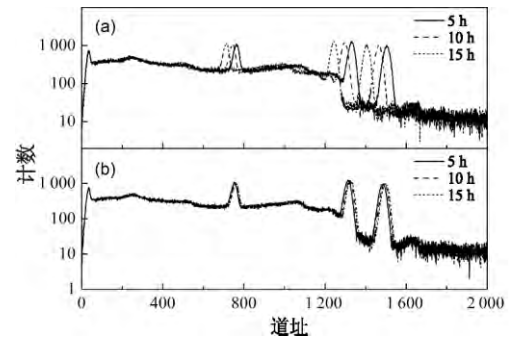


图7 温漂修正前后的能谱

(a) 无温漂校正; (b) 有温漂校正

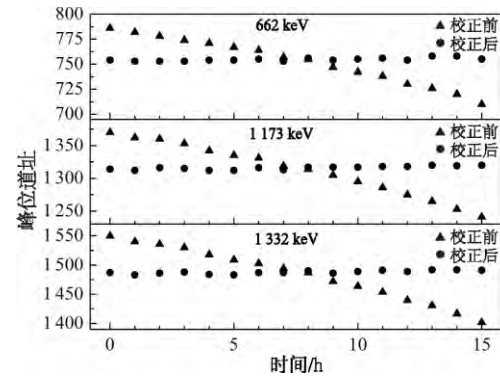


图8 温漂校正前后能谱峰漂对比

作一周时间,期间每隔 8 h 获取一次能谱。长期稳定性测试的峰位漂移随时间变化情况如图 10 所示,1 332 keV 峰位漂移量最大值为 15 道。稳定性测试结果表明,新研制的数字多道谱仪系统在长期连续工作时,能谱漂移较为稳定,可以用于实际的环境放射性监测。

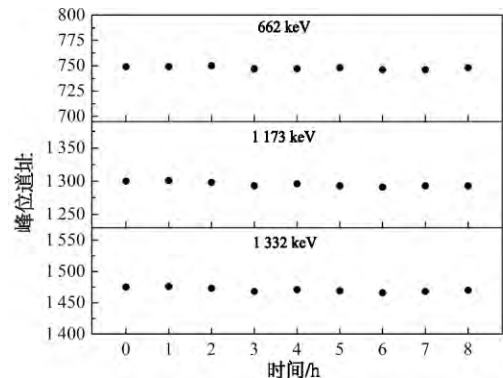


图9 短期稳定性测试

5 结论

本文研制的基于 FPGA 的具有温漂校正功

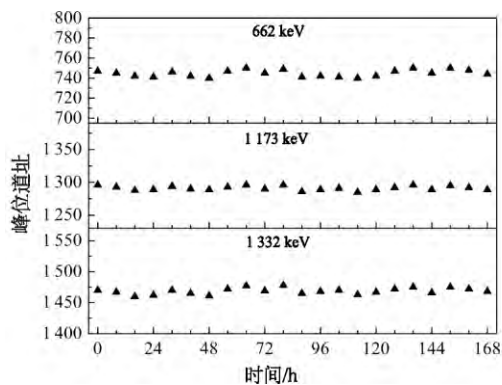


图 10 长期稳定性测试

能的 LaBr₃探测器数字化多道谱仪经过测试,具备良好的能量分辨率和能量线性度,所采用的温漂校正方法可以实现良好的稳谱效果。测试中发现能谱仍存在一定漂移量,与校正算法的误差有关,可进一步研究改进方法。研制的数字化多道谱仪系统可以配合通用 LaBr₃探测器用于户外定点放射性监测装置。

参考文献:

[1] Van Loef E V D, Dorenbos P, Van Eijk C W E, et al. Scintillation properties of LaBr₃: Ce³⁺ crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 2002, 486(1): 254-258.

[2] Milbrath B D, Choate B J, Fast J E, et al. Comparison of LaBr₃: Ce and NaI(Tl) scintillators for radio-isotope identification devices [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 2007, 572(2): 774-784.

[3] Ciupek K, Jednoróg S, Fujak M, et al. Evaluation of efficiency for in situ gamma spectrometer based upon cerium-doped lanthanum bromide detector dedicated for environmental radiation monitoring [J]. Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry, 2014, 299(3): 1345-1350.

[4] Mattila A, Toivonen H, Vesterbacka K, et al. Radiation monitoring network with spectrometric capabilities: implementation of LaBr₃ spectrometers to the Finnish network [J]. Nordic Society for Radiation Protection, 2010, 210.

[5] Toivonen H, Vesterbacka K, Pelikan A, et al. LaBr₃

spectrometry for environmental monitoring [C]//The 12th International Congress of the International Radiation Protection Association. Buenos Aires: IAEA, 2008: 1-10.

[6] Payne S A, Hunter S, Ahle L, et al. Non-proportionality of scintillator detectors. III. Temperature dependence studies [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(5): 2771-2777.

[7] Upadhyay P N, Kumar P, et al. Study of temperature effect on the gain of a photomultiplier tube [J]. Acta Ciencia Indica Physics, 1990, 16(3): 179-181.

[8] Pausch G, Stein J, Teofilov N. Stabilizing scintillation detector systems: determination of the scintillator temperature exploiting the temperature dependence of the light pulse decay time [C]//Nuclear Science Symposium Conference Record, Rome: IEEE, 2004, 2: 846-850.

[9] Moszyński M, Nassalski A, Syntfeld-Kazuch A, et al. Temperature dependences of LaBr₃(Ce), LaCl₃(Ce) and NaI(Tl) scintillators [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 2006, 568(2): 739-751.

[10] 李晓丽, 葛良全, 杨佳, 等. 基于相关性原理的嫦娥二号 γ 谱谱漂校正 [J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(2): 202-205.

[11] 敖奇, 魏义祥, 屈建石. NaI 谱仪数字稳谱方法设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(1): 19-22.

[12] 顾民, 葛良全, 杨峰. 基于时延估计法的自然 γ 能谱自动稳谱 [J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(2): 293-295.

[13] 翟娟, 胡媛, 郭成, 等. 基于全谱特征的谱线漂移校正方法研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(01): 81-84.

Study and Development of a Digital LaBr₃ Spectrometer with Temperature Peak-shift Correction Function

HAN Zhen-yang¹, TANG Xiao-bin^{1,2}, GONG Pin¹, WANG Peng¹, HE Jian-ping¹, GAO Le¹, YAN Wen¹

(1. Department of Nuclear Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Nuclear Energy Equipment Materials Engineering, Nanjing 211106, China)

Abstract: A digital multi-channel spectrometer with temperature peak-shift correction function has been introduced in this paper. The digital signal processing circuit based on FPGA has been designed in our development. The energy spectrum shift of the LaBr₃ detector at different ambient temperature has been studied and a temperature compensation algorithm has been designed. The test shows that the developed digital multi-channel spectrometer has good energy resolution and energy linearity, and the temperature peak-shift correction method is effective for LaBr₃ detector.

Key words: LaBr₃; digital multi-channel; FPGA; temperature peak-shift correction