

文章编号: 1007-4627(2019)04-0456-06

基于FPGA的数字反符合 γ 谱仪系统设计

袁雪岚¹, 王磊^{1,†}, 刘馨¹, 潘洁², 余运强¹

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610000;

2. 军事科学院军事医学研究院, 北京 100850)

摘要: 本文设计了基于FPGA的数字反符合 γ 谱仪系统来降低天然本底和康普顿散射对低活度放射性测量的影响。该系统选用 $\Phi 145\text{ mm}\times 95\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的NaI(Tl)环形探测器与 $\Phi 75\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 的NaI(Tl)主探测器构成反符合探测器, 采用FPGA和高速ADC同步采样主探测器脉冲信号和反符合环形探测器输出信号。在FPGA中实现了核脉冲信号采集、缓存、反符合甄别、梯形成形等相关算法。在天然本底测量实验中, 数字反符合 γ 谱仪系统的计数率为191.80 cps, 本底抑制系数为2.69; 对 ^{137}Cs 放射源的测量实验表明, 在反符合探测器端面中心处, 反符合测量峰总比为0.41, 能量分辨率为6.99%; 在反符合探测器侧面中间部位, 反符合测量峰总比为0.30, 能量分辨率为7.48%。实验结果表明, 基于FPGA的数字反符合 γ 谱仪系统明显降低了天然环境本底和康普顿散射对测量的影响, 适用于低活度放射性测量、现场就地放射性测量。

关键词: 本底; 康普顿散射; 反符合测量; γ 谱仪

中图分类号: TH842 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.04.456

1 引言

本底辐射主要来源于宇宙射线和环境天然放射性核素产生的射线。本底辐射会导致本底信号产生, 随着探测器的类型、大小及其屏蔽程度的变化, 这些本底信号也会发生显著变化^[1]。环境本底不仅会增加放射性测量的难度, 还会降低放射性检测的精度。降低本底辐射则有利于降低探测下限, 提高探测精度。

目前, 降低 γ 谱仪的本底辐射干扰的主要方法包括降低硬件系统噪声、增加物质屏蔽和采用反符合测量^[2]。随着电子技术的不断发展, γ 谱仪的硬件系统噪声已得到较大改善。物质屏蔽虽然可以在一定程度上降低本底辐射水平, 但屏蔽效果主要取决于辐射的强度和屏蔽材料的厚度, 且宇宙射线硬成分无法被屏蔽^[3]。而反符合测量不仅可以通过物质屏蔽降低天然本底, 还可以利用反符合甄别技术降低宇宙射线和康普顿散射对放射性测量的影响^[4]。因此, 本文设计了由 $\Phi 145\text{ mm}\times 95\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的NaI(Tl)环形探测器与 $\Phi 75\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 的NaI(Tl)探测器所构成的反符合探测器, 同时完成了基于FPGA的数字反符合 γ 谱仪的设计。通过数字反符合甄别技术大幅度降低了本底辐射和康普顿散射对低能区的贡献, 提高了 γ 谱仪对低活度放射性核素的分析能力, 具有较好的应用前景^[5]。

2 系统方案设计

2.1 谱仪结构

数字反符合 γ 谱仪由反符合探测器与硬件测量系统两部分组成, 如图1所示为谱仪总体结构图。其中探测器单元由主探测器和反符合环形探测器组成, 环形探测器紧密环绕贴合在主探测器外围。本文采用北京滨松公司生产的CH158-06型3英寸低本底NaI(Tl)探测器作为主探测器, 其有效尺寸为 $\Phi 75\text{ mm}\times 75\text{ mm}$, 具有结构紧凑、使用简单方便、本底低、能量分辨率好、输出

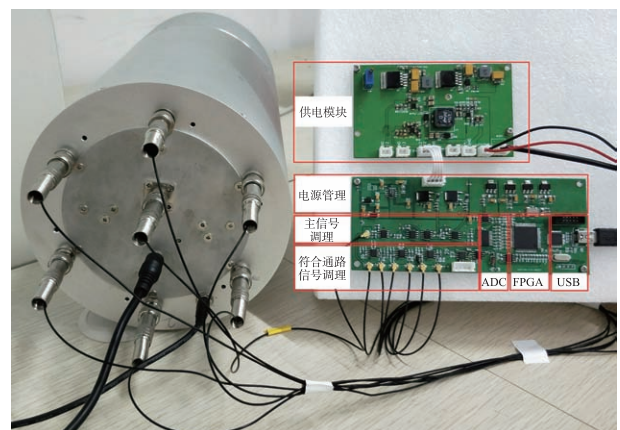


图1 (在线彩图)谱仪总体结构

收稿日期: 2019-04-22; 修改日期: 2019-07-05

基金项目: 四川省应用基础研究项目(面上)(2018JY0181); 国家自然科学基金资助项目(面上)(41874121)

作者简介: 袁雪岚(1994-), 女, 四川南充人, 在读硕士, 从事仪器仪表工程研究; E-mail: yuanxuelan@stu.cdut.edu.cn

† 通信作者: 王磊, E-mail: wl@cdut.edu.cn.

稳定、可靠性高、不易损坏以及探测效率高等优点^[6]。NaI(Tl)反符合环形探测器由晶体尺寸为 $\Phi 145\text{ mm} \times 95\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的NaI(Tl)环和6只小型光电倍增管组成。光电倍增管选用北京滨松公司生产的CR11001型28 mm直径的端窗型光电倍增管,其光阴极材料为双碱(有效感光面直径:25 mm;光谱响应范围:300~650 nm)。

2.2 电子学设计

本文设计的电子学测量系统主要分为模拟信号调理电路和数字信号处理模块。模拟信号调理电路对主探

测器输出的核脉冲信号进行阻抗匹配、程控放大及滤波调理,将信号幅度调整到0~2 V,然后送高速ADC进行信号采集。模拟信号调理电路采用AD8610构建一个跟随器,对信号进行阻抗匹配,隔离前后级电路,然后采用AD5543和外部运算放大器ADA4898一起构成程控增益放大器,如图2所示,其总增益计算公式为 $\text{Gain} = \frac{D}{65536} \times (1 + \frac{R2}{R3})$,其中D为FPGA内设置的程控增益参数。经程控增益放大器后,信号幅度调理到0~2 V,后经抗混叠低通滤波后供高速ADC(AD9235)进行信号采集。

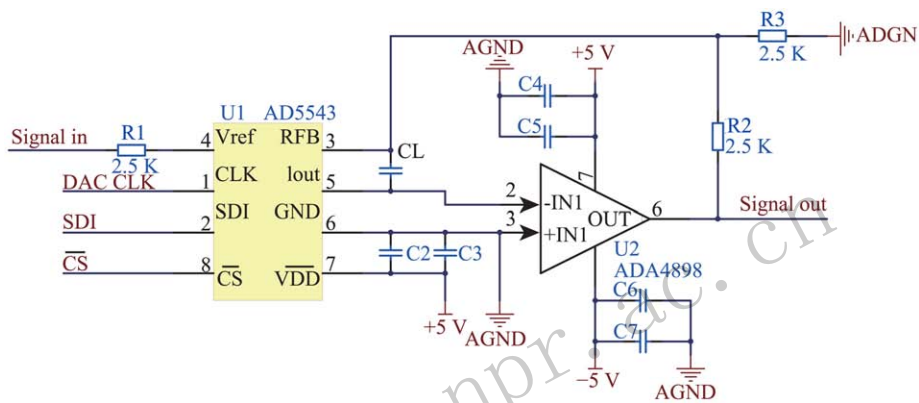


图 2 (在线彩图) 程控增益放大电路

反符合环形探测器输出6路信号经加法电路整合后形成1路符合信号,如图3所示。经电压跟随和信号整形后输出为3.3 V的正向方波信号,其作为门控信号用于后续FPGA对主探测器信号进行反符合甄别。

模拟信号调理模块总体框图如图4所示。

数字信号处理模块主要包括反符合甄别、数字低通滤波、梯形成形以及 γ 能谱统计,如图5所示。数字低通滤波对数字核脉冲信号进行低通滤波以消除高频噪声;反符合甄别以反符合环探测器通道形成的门控信号

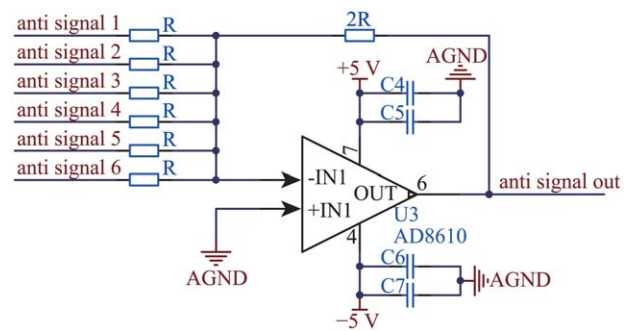


图 3 (在线彩图)加法电路

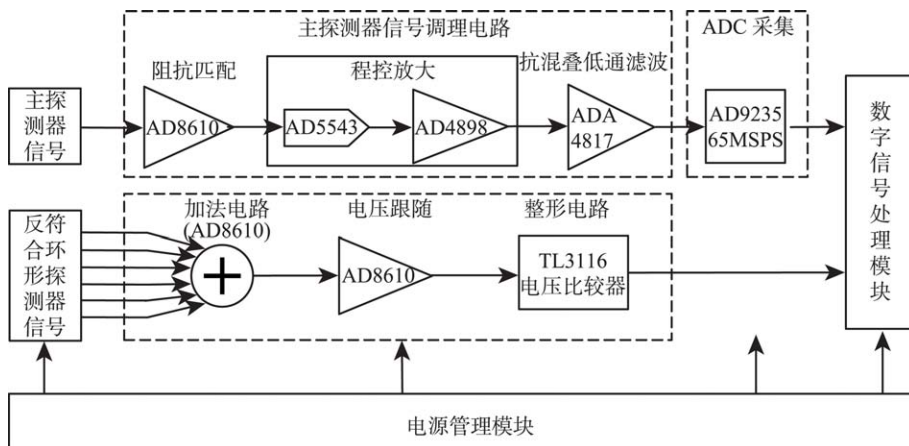


图 4 (在线彩图) 模拟信号调理模块总体框图

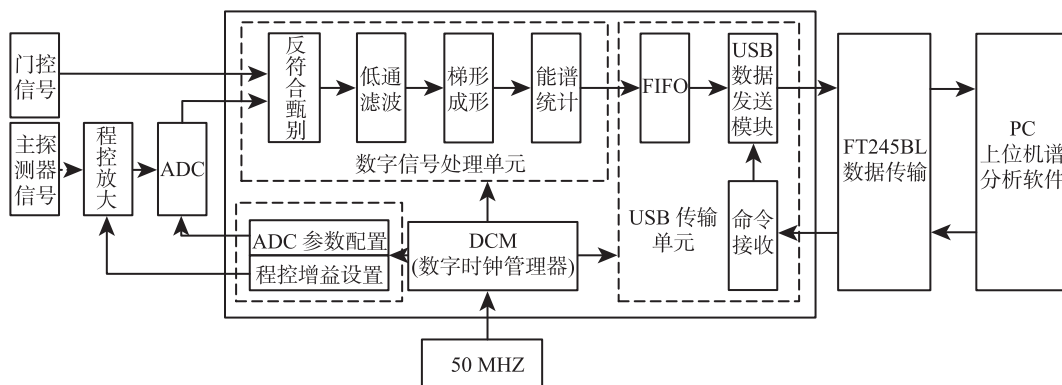


图 5 (在线彩图)数字信号处理模块框图

对主探测器通道信号进行反符合,从而筛选出主探测器中的有效信号;梯形成形算法则将指数衰减信号转换成幅度相同的等腰梯形信号,以减少噪声干扰和脉冲堆积,从而改善能量分辨率^[7]。

3 实验与结果

3.1 信号测试

(1)主探测器信号

NaI(Tl)主探测器输出幅度较小且呈指数衰减的负脉冲信号,如图6中黄色信号所示,脉宽约为2 μs,且上升时间很短。主探测器信号经信号调理后输出如图6中绿色波形所示信号,绿色调理脉冲信号与主探测器输出信号相比,脉宽不变,极性相反,幅度放大1倍,信号无失真且噪声较低。

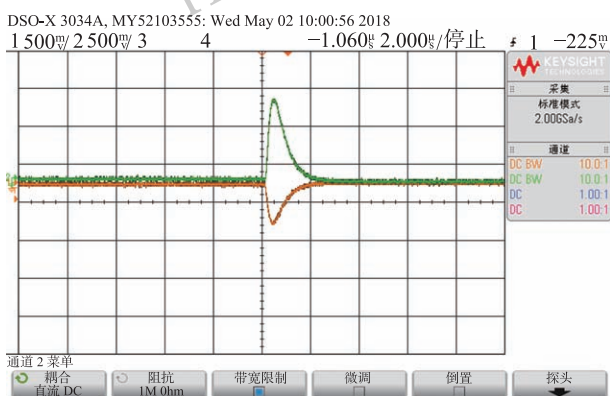


图 6 (在线彩图)主探测器信号测试

(2)符合门控信号

反符合环形探测器输出的脉冲信号,经符合通路信号整形后输出如图7所示的正向方波信号,其作为FPGA对主探测器信号进行反符合甄别的门控信号,幅值为3.3 V,脉宽约为1 μs。

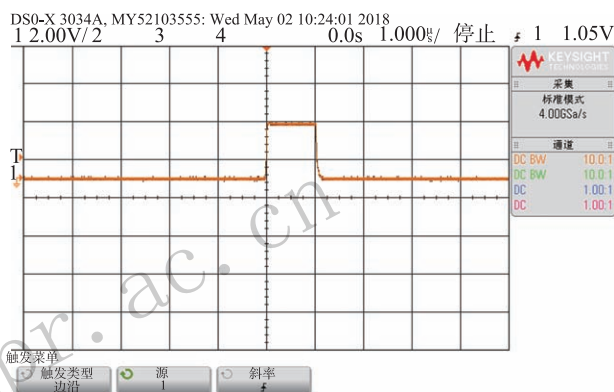


图 7 (在线彩图)符合门控信号测试

(3)反符合甄别

本文采用FPGA控制采样速率为65 MspS的ADC对主探测器通道的核脉冲信号进行采样,同时对反符合环形探测器通道的符合信号进行采集,然后将两路信号接入反符合甄别单元进行反符合甄别。本文采取的反符合测量策略:当主探测器与环形符合探测器输出的两个信号同时产生或者在极短间隔内产生,则判定此次主探测器输出信号为康普顿散射信号,将其舍弃,如图8(a)所示;反之,若在主探测器输出信号期间,反符合探测器没有信号输出,则判定主探测器输出信号为一次正常测量,如图8(b)中主探测器输出的第一个信号所示。

3.2 环境本底测量

在室温环境中(成都市,温度20 °C,湿度63%),分别在以下3种不同条件下进行5 h环境本底测量物理实验:(1)仅主探测器处于天然环境中测量环境辐射;(2)反符合环形探测器仅作为屏蔽体进行普通测量;(3)利用主探测器和环形探测器开展反符合测量。实验得到如图9所示的环境本底能谱。

由图9可知,仅将环形探测器作为屏蔽体进行普通测量时,本底计数率已显著降低,说明环形探测器对主探测器而言具有明显的屏蔽作用。在反符合测量中,数

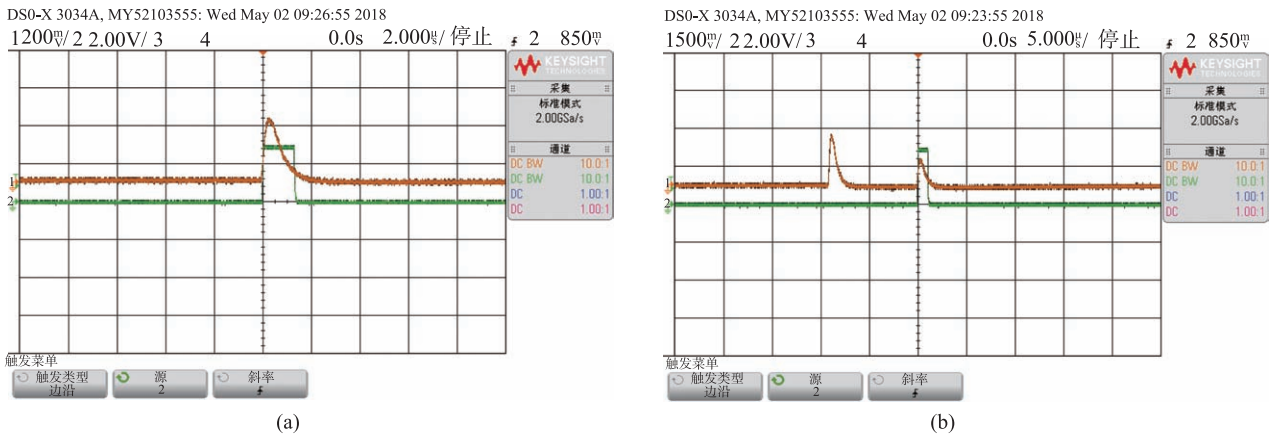


图 8 (在线彩图) 主探测器通道信号与环形探测器通道符合信号测试图
其中黄色为主探测器通道信号, 绿色为环形探测器通道符合信号。

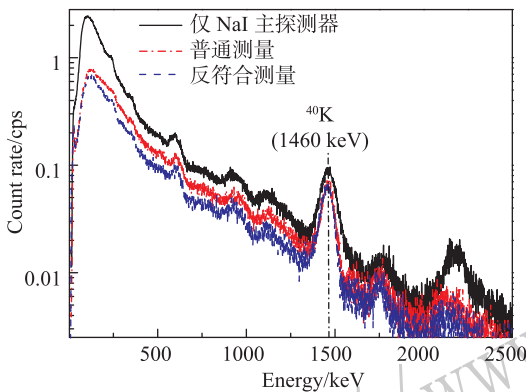


图 9 (在线彩图) 在三种不同条件下, 测量得到环境本底测量能谱

字反符合 γ 谱仪进一步降低了本底辐射对环境本底能谱的贡献。本底计数率对比如表 1 所列。

表 1 三种不同条件下的本底计数率对比

测量条件	能量区间/keV	计数率/cps
仅NaI主探测器	20~2 500	516.20
普通测量	20~2 500	237.62
反符合测量	20~2 500	191.80

进行普通测量和反符合测量时本底抑制系数对比如表 2 所列。

表 2 本底抑制系数对比

测量条件	本底抑制系数
普通测量	2.17
反符合测量	2.69

由表 1 及表 2 数据可知, 在反符合测量条件下, 本底计数率和本底抑制系数明显好于普通测量, 表明反符合甄别发挥显著作用, 抑制了环境本底辐射。其原理在

于环境辐射 γ 射线与环形探测器作用主要有三种过程, 其一是环境辐射 γ 射线的能量全部沉积在环形探测器中; 其二是环境辐射 γ 射线与环形探测器作用发生康普顿散射, 射线在环形探测器中沉积部分能量后, 进入主探测器并在主探测器中沉积能量; 其三是环境辐射 γ 射线穿透环形探测器, 不在其中沉积能量。前两种作用过程会在环形探测器中产生信号输出, 且发生的概率都远大于第三种作用过程, 因此会被反符合逻辑甄别掉, 从而达到抑制本底的目的。

3.3 ^{137}Cs 放射源辐照测量

如图 10 所示, 将 ^{137}Cs 点源置于钨钢屏蔽盒后, 分别置于数字反符合 γ 谱仪的主探测器端面中心处(位置 A)和环形探测器侧面中间(位置 B)进行辐照实验, 分别获取 2 个位置处的 γ 能谱, 然后分析反符合测量对本底和康普顿散射的抑制效果。

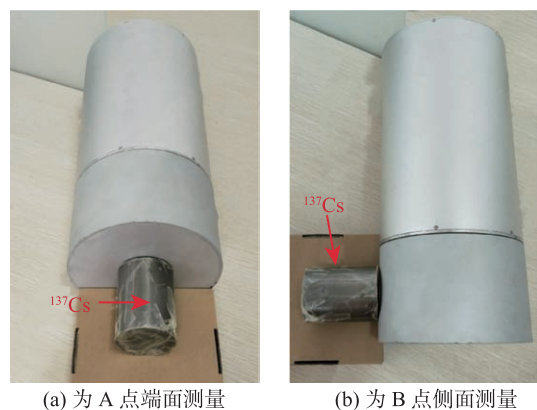


图 10 (在线彩图) 反符合探测器对 ^{137}Cs 放射源进行探测

在 A, B 两个位置处, 对 ^{137}Cs 放射源测量 10 min 获得 ^{137}Cs 能谱如图 11 所示。

由图 11 可知, 反符合测量能谱在低能区的计数显

著低于普通测量能谱中的计数，表明反符合测量抑制了康普顿散射。在 A 端面测量实验中，反符合测量的峰总比达到了 0.41，高于普通测量时的 0.34；反符合测量时的能量分辨率为 6.99%，优于普通测量的 7.16%，如表 3 所列。在 B 侧面测量中，也得到了相近的结果。

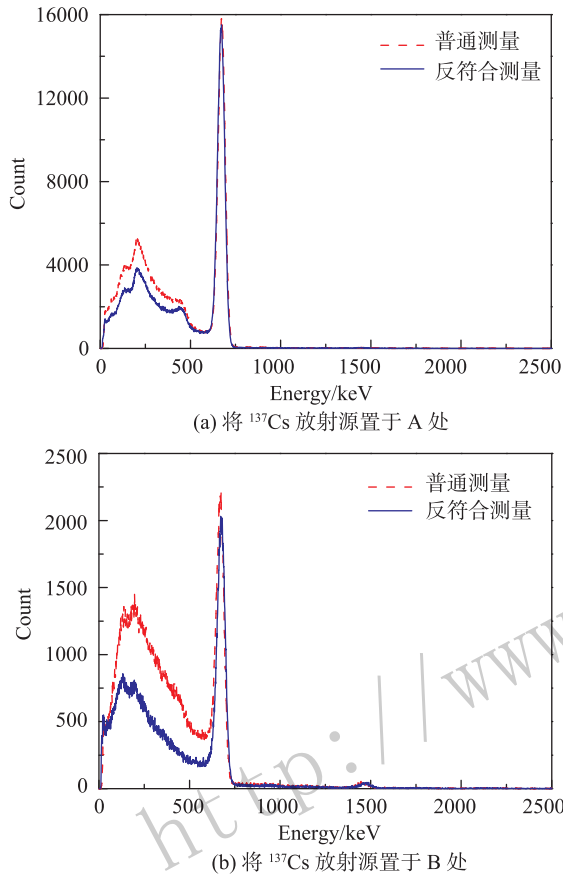


图 11 (在线彩图) ^{137}Cs 放射源分别置于 A, B 两处, 测量 10 min 获得的能谱图

表 3 在 A, B 两种位置处反符合测量的 ^{137}Cs 能谱数据对比表

测量位置	测量条件	总计数	全能峰计数	峰总比	能量分辨率/%
A 端面测量	普通测量	2 382 008	818 176	0.34	7.16
	反符合测量	1 978 164	813 513	0.41	6.99
B 侧面测量	普通测量	634 130	135 780	0.21	7.86
	反符合测量	401 884	121 983	0.30	7.48

4 结论

本文研制的基于 FPGA 的数字反符合 γ 谱仪测量系统选用 NaI 环形探测器与中心 NaI 主探测器构成反符合探测器, 通过 FPGA 和高速 ADC 对主探测器脉冲信号进行采样, 并同步获取环形探测器输出的反符合信号。在 FPGA 中实现了信号采集与缓存、反符合甄别、核脉冲信号梯形成形等相关算法。

在天然本底测量实验中, 采用反符合测量时数字反符合 γ 谱仪系统的计数率为 191.80 cps, 本底抑制系数为 2.69, 明显好于普通测量, 表明数字反符合 γ 谱仪对本底有较好的屏蔽效果。采用主探测器端面对 ^{137}Cs 进行反符合测量, 峰总比和能量分辨率分别达到了 0.41, 6.99%; 采用反符合环形探测器侧面对 ^{137}Cs 进行反符合测量, 峰总比和能量分辨率分别为 0.30, 7.48%。本文设计的基于 FPGA 的数字反符合 γ 谱仪测量系统较好地抑制了康普顿散射, 降低环境本底, 适用于低活度放射性测量、现场就地放射性测量。

参考文献:

- [1] DING Honglin. Nuclear Radiation Detector[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 435. (in Chinese) (丁洪林. 核辐射探测器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 435)
- [2] ZHOU Chunlin, XU Zhenhua, HAN Feng, et al. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2008(02): 418. (in Chinese). (周春林, 徐振华, 韩峰, 等. 核电子学与探测技术, 2008(02): 418.)
- [3] DIAO Lijun, HOU Tiedong, LI Wei, et al. Nuclear Techniques, 2010, 33(07): 501. (in Chinese) (刁立军, 侯铁栋, 李玮, 等. 核技术, 2010, 33(07): 501.)
- [4] CHASOVIKOV E N, ARKHANGELSKAJA I V, ARKHANGELSKIY A I, et al. Journal of Physics Conference Series, 2016, 675(3): 032016.
- [5] SCHROETTNER T, SCHRAICK I, FURCH T, et al. Nucl Instr and Meth A, 2010, 621(1): 478.
- [6] MA Chaogui. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1986(06): 366. (in Chinese). (马朝贵. 核电子学与探测技术, 1986(06): 366.)
- [7] WANG Lei. Research on Key Technologies of Field Rapid Assessment of Internal Contamination in Lungs[D]. Chengdu: Chengdu university of technology. 2013). (in Chinese) (王磊. 肺部 γ 放射部内污染现场快速评估关键技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013)

Design of Digital Anti-coincidence γ Spectrometer System Based on FPGA

YUAN Xuelan¹, WANG Lei^{1,†}, LIU Xin¹, PAN Jie², YU Yunqiang¹

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China;
2. Institute of radiation medicine, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850, China)

Abstract: In this work, we designed an FPGA-based digital anti-coincidence gamma-ray spectrometer system to reduce the effect of the natural background radiation and Compton scattering on detection of the low-level radioactivity. In this system, the anti-coincidence detector consists of a NaI(Tl) detector with a size of $\Phi 75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ and an annular NaI(Tl) detector ($\Phi 145 \text{ mm} \times 95 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$), the FPGA and the ADC were employed to sample the pulse signal from the main detector and the annular NaI(Tl) detector synchronously. We designed the related algorithms running in FPGA, such as signal acquisition and caching, anti-coincidence discrimination, and trapezoidal shaping. In the natural background measurement, the digital anti-coincidence gamma-ray spectrometer system reached a count rate of 191.80 cps and a suppression of background radiation coefficient of 2.69. In the ^{137}Cs source irradiation experiment at the center of the front face of the anti-coincidence detector, the peak to total ratio reaches 0.41 and the energy resolution is 6.99%. The peak to total ratio reaches 0.30 and the energy resolution is 7.48% when the ^{137}Cs source is placed in the middle part of the anti-coincidence detector. The experimental results show that the FPGA-based digital anti-coincidence gamma-ray spectrometer system in this paper can reduce the influence of natural background radiation and Compton scattering effectively, and can be used for on-site radioactivity detection and low-level radioactivity measurements.

Key words: background radiation; Compton scattering; anti-coincidence measurement; gamma spectrometer

<http://www.cnki.net>

Received date: 22 Apr. 2019; Revised date: 5 Jul. 2019

Foundation item: Applied Basic Research Program of Sichuan Province (2018JY0181); National Natural Science Foundation of China (41874121)

† Corresponding author: WANG Lei, E-mail: wl@cdut.edu.cn.