

基于 FPGA 的虚拟放射源系统*

邹风华,王柱,钱秋妃,徐跃明,董俊岐

(武汉大学 物理科学与技术学院,湖北 武汉 430072)

摘要:核物理实验、放射医学等领域都离不开放射源及其探测。利用 DAC、FPGA 以及直接数字合成技术构建虚拟放射源系统,能够灵活选择放射源和探测器的种类,也能设置放射源与探测器的相对距离和角度。根据某种放射源的实验谱线按照一定的频率发射幅度信号,通过网口传输进入 FPGA 数字处理平台。FPGA 接收幅度信号并进行处理,从而得到具有特定探测器特征的脉冲信号。采用 14 位数模转换芯片 LTC1667 将 FPGA 得到的数字信号转化为模拟信号。使用脉冲幅度分析仪对该脉冲信号进行采集和分析,并通过相应软件获得能谱。结果表明,虚拟化的放射源代替实物放射源和探测器不仅可以达到相似的效果,而且更加具有灵活性、方便性和安全性。

关键词: FPGA; 虚拟放射源; 直接数字合成; 脉冲信号

中图分类号: TP274.2

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200178

中文引用格式: 邹风华,王柱,钱秋妃,等. 基于 FPGA 的虚拟放射源系统[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 102-105.

英文引用格式: Zou Fenghua, Wang Zhu, Qian Qiufei, et al. Virtual radiation source system based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 102-105.

Virtual radiation source system based on FPGA

Zou Fenghua, Wang Zhu, Qian Qiufei, Xu Yueming, Dong Junqi

(School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Nuclear physics experiments, radiation medicine and other fields are inseparable from the radiation source and its detection. By using DAC, FPGA and direct digital synthesis(DDS)technology to build a virtual radiation source system, the types of radiation source and detector can be flexibly selected, and the relative distance and angle between radiation source and detector can be set. According to the experimental spectral line, the amplitude signal is transmitted at a certain frequency, and it enters the FPGA digital processing platform through the network port. FPGA receives the amplitude signal and processes it to get the pulse signal with specific detector characteristics. The 14 bit digital-to-analog conversion chip LTC1667 is used to convert the digital signal from FPGA to analog signal. Pulse amplitude analyzer is used to collect and analyze the pulse signal and obtain the energy spectrum through the corresponding software. The results show that the virtual radiation source can not only achieve the similar effect, but also have more flexibility, convenience and safe.

Key words: FPGA; virtual radiation source; direct digital synthesis; pulse signal

0 引言

核电子学系统开发、核物理实验教学、放射医学等相关领域的教学和职业培训,都要求投入大量资金用于购买放射源和探测器^[1-3]。例如高纯锗探测器,虽然我国在研制高纯锗探测器方面已取得一定进展,但是还不能达到产业化的标准,市场上使用的大部分高纯锗辐射探测器需要向 ORTEC 公司采购。据统计,我国每年进口高纯锗探测器数百台,价值数亿元。其次,电离辐射技术在医学、工业、农业、国防等领域都有广泛的应用,发挥着至关重要的作用,然而它是一把双刃剑,如果长时间接触核辐射,可能吸收不必要的辐射剂量。人类应该利用

电离辐射造福人类,并尽量避免和减少电离辐射可能引起的对人的健康危害^[4],所以辐射防护措施是必要的。由于电离辐射看不见,摸不着,无色无味的特点,容易让人忽视它的存在,给辐射防护带来一定的困难。

针对以上问题,本文通过上位机软件、嵌入式软件和硬件电路,开发虚拟放射源系统。FPGA 运算处理能力以及可以无限次编程,适合处理数据。通过 Qt 软件实现了归一化、脉冲幅度信号产生。通过 Quartus II 软件与硬件电路协同设计,实现了脉冲堆积、直接数字合成、特定脉冲信号产生。通过以太网模块与上位机模块之间进行通信。本文试图把该系统做好使之能够代替实物放射源和探测器,从而节省放射源和探测器的购买成本、放射性管理和辐射防护的投入,提高学习和培训效率。

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106506); 国家自然科学基金项目(11575129)

嵌入式技术 Embedded Technology

1 系统结构与功能

基于 FPGA 的虚拟放射源系统框图如图 1 所示,系统包括上位机虚拟放射源平台、千兆以太网模块、FPGA 数字处理平台、高速 DAC 数模转换电路。上位机虚拟放射源平台起到脉冲幅度信号产生的作用。千兆以太网口与上位机进行通信,将虚拟放射源产生的脉冲幅度信息发送到 FPGA 数字处理平台。FPGA 数字处理平台实现了以太网口通信、接收幅度信息、脉冲堆积、直接数字合成等算法,产生任意特定探测器相对应的脉冲信号。高速 DAC 数模转换电路用于将数字信号模拟化,成为具有特定放射源和探测器特征的核探测器输出信号。

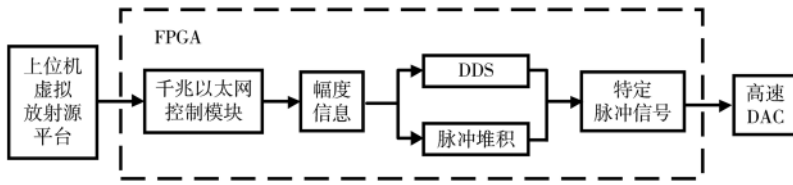


图 1 基于 FPGA 虚拟放射源系统框图

2 系统各模块原理与设计

2.1 脉冲幅度信号产生部分

使用本课题组研制的高纯锗全数字双通道脉冲幅度分析仪对实物放射源进行测试和采集获得实验能谱,将能谱归一化得到能谱概率分布,通过配对不同探测器、放射源可以获得不同的实验能谱概率分布。本设计分辨率为 14 位,能谱道址可以达到 16 384 道,按照一定的频率在 0 到 16 383 区间内取随机道数,将同一个随机道数对应的实验能谱概率求和,当概率等于 1 时输出此随机道数。输出一个随机道数即产生一个脉冲幅度信号,该脉冲幅度信号符合实验能谱概率分布并且时间上随机。

2.2 FPGA 数字处理部分

FPGA 由逻辑单元、RAM、乘法器等硬件资源组成,合理利用这些硬件资源可以实现寄存器、乘法器、地址发生器等硬件电路。FPGA 运算处理能力强以及可以无限次编程,能实现本系统的数据处理。本设计选用 Altera 公司的 Cyclone III 系列芯片 EP3C40Q240C8N。

2.2.1 DDS 技术

直接数字合成技术是以数字信号处理理论为基础,从相位概念出发直接合成所需要波形的一种全数字技术频率合成方法^[5]。相位累加器是 DDS 技术的关键部分,相位累加器读取数据的地址值由外部时钟信号控制产生,通过查找表的方式,把地址转化为所需脉冲信号的数字幅度序列。合成的脉冲信号种类由 FPGA 的 IP 核 ROM 表中的幅度序列决定,如果需要多种脉冲信号,只要把所需要的脉冲信号的数据存放到 ROM 表中即可。

2.2.2 脉冲堆积设计

FPGA 数字处理平台接收由上位机虚拟放射源产生的脉冲幅度信息,用来控制 ROM 表预先存储的脉冲信

号的幅度。FPGA 接收一个幅度信息就读出 ROM 表存储的一个脉冲信号,如果这个幅度下的脉冲信号还没读完又接收到第二个幅度信息,那么就要考虑脉冲的堆积现象,堆积现象影响着能量分辨率和检测效率,是核信号采集的重要问题。二重堆积的产生需要 FPGA 调用两个 IP 核 ROM 表,假设深度都为 3 000,分别预先存储具有特定探测器特征的脉冲信号初始数据,

读取两个 ROM 表数据并叠加,得到的和便是 FPGA 的输出脉冲信号。图 2 为二重堆积设计流程图,图 3 为二重堆积效果图。三重、四重堆积等设计原理和二重堆积类似。

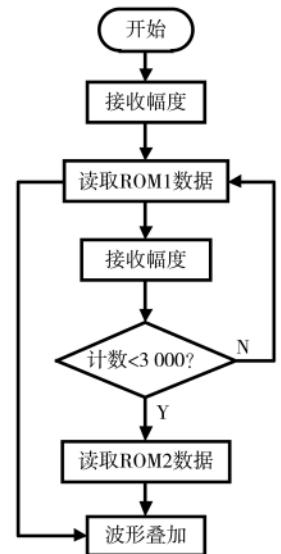


图 2 二重堆积设计流程图

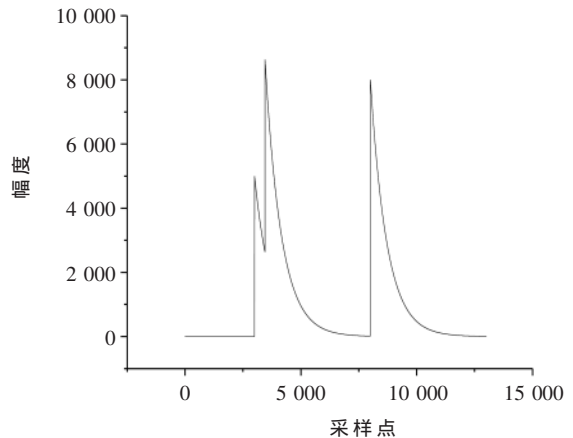


图 3 二重堆积效果图

2.3 DAC 模块

为了将 FPGA 产生的离散序列转换成连续的模拟信号,同时兼顾系统的精度、速度以及线性度,本系统采用 LTC1667 芯片实现脉冲信号数模转换。LTC1667 芯片分辨率为 14 位,转换速率为 50 MS/s,功率为 180 mW(±5 V 供电),适合直接数字合成的应用,LTC1667 选用内部参考电压 2.5 V。DAC 模块简化电路如图 4 所示,LTC1667 数模转换器将 FPGA 产生的数字信号模拟化差分输出电压值,经过 I-V 转换电路单端输出电压值,这种配置通常具有最佳的直流线性性能。I-V 运算放大器采用 ADI 半导体公司的 LT1812 芯片,具有高速度、低功耗、超高压摆率的优越性能,电路结构为电压反馈放大器。

2.4 千兆以太网模块

本系统在 FPGA 中以硬件形式实现网络传输数据,对传输速度要求较高^[6],因此本系统采用千兆以太网来

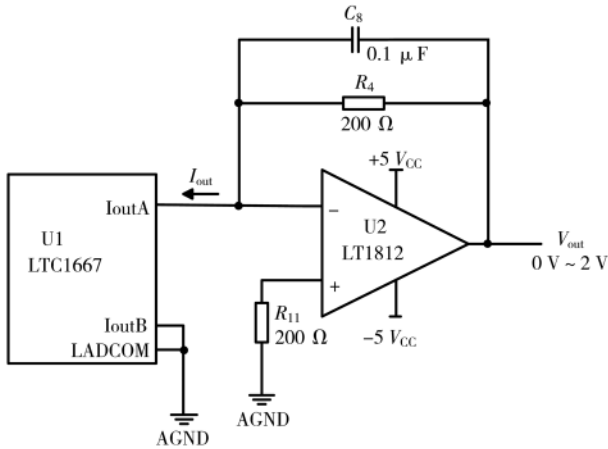


图4 DAC模块简化电路

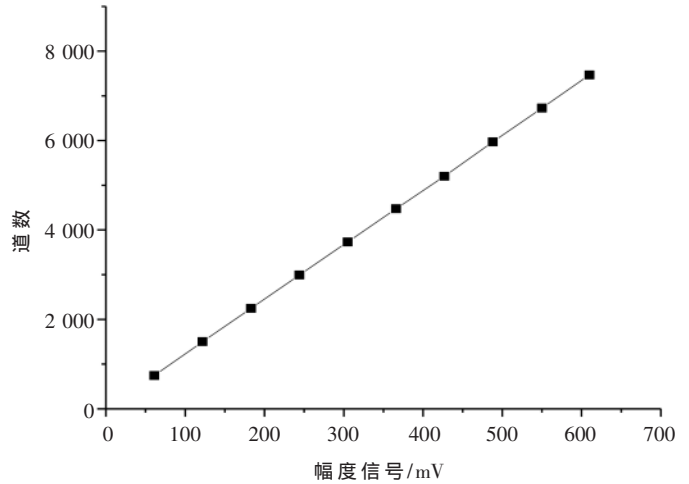


图5 道数和脉冲幅度信号的关系

实现。物理层使用 RTL8211 芯片, FPGA 通过 GMII 接口和 RTL8211 连接, GMII 接口采用 8 bit 进行数据传输, 传输时钟为 125 MHz, 传输速率为 1 000 Mb/s。本设计在 FPGA 上移植了基于 UDP 协议的网络接收模块。以太网接收数据的原理: 上位机发送过来的数据经由网线传递给网络变压器, 网络变压器的输出连接到物理层芯片上, 物理层芯片对信号进行解码后得到实际的数据, 将数据传递给 FPGA 芯片。

3 测试结果与评价

3.1 系统线性度测试

虚拟放射源产生的脉冲幅度信号和经过脉冲幅度分析仪采集对应的道数的关系如图 5 所示, 可以看出其线性关系良好。

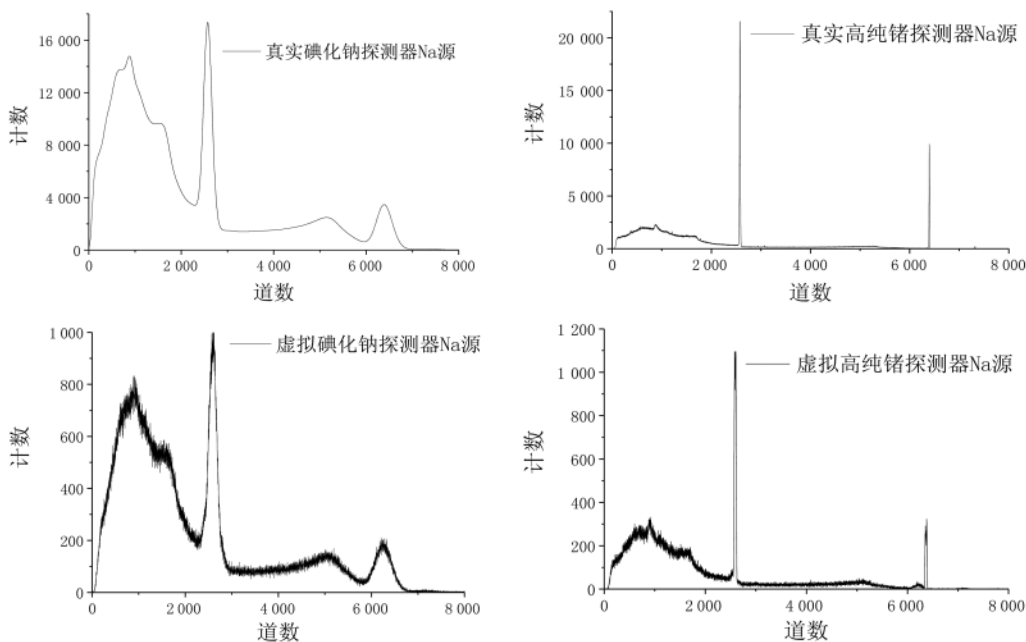
3.2 能谱测试

伽马能谱是对放射源发射的伽马射线能谱的定量

研究, 它可以用来识别放射性核素。对实验室常用的 ^{60}Co 、 ^{22}Na 以及 ^{137}Cs 源进行测试, 能谱图如图 6~图 8 所示, 可以看出本系统组合不同探测器、放射源能够理想地模拟真实放射源和探测器的能谱, 并且得到的能谱与实际能谱相符。

4 结论

本文提出了一种基于 FPGA 的虚拟放射源系统, 可以组合不同探测器、放射源获得不同的能谱概率分布, 根据实验谱线按照一定的频率发射脉冲幅度信号, 在 FPGA 平台上进行直接数字合成、脉冲堆积设计以及脉冲信号产生。实验结果表明, 本系统代替实物放射源和探测器可以达到相似的效果, 且具有灵活性、方便性和安全性, 是一套较为理想的虚拟放射源系统。

图6 ^{22}Na 源伽马射线能谱图

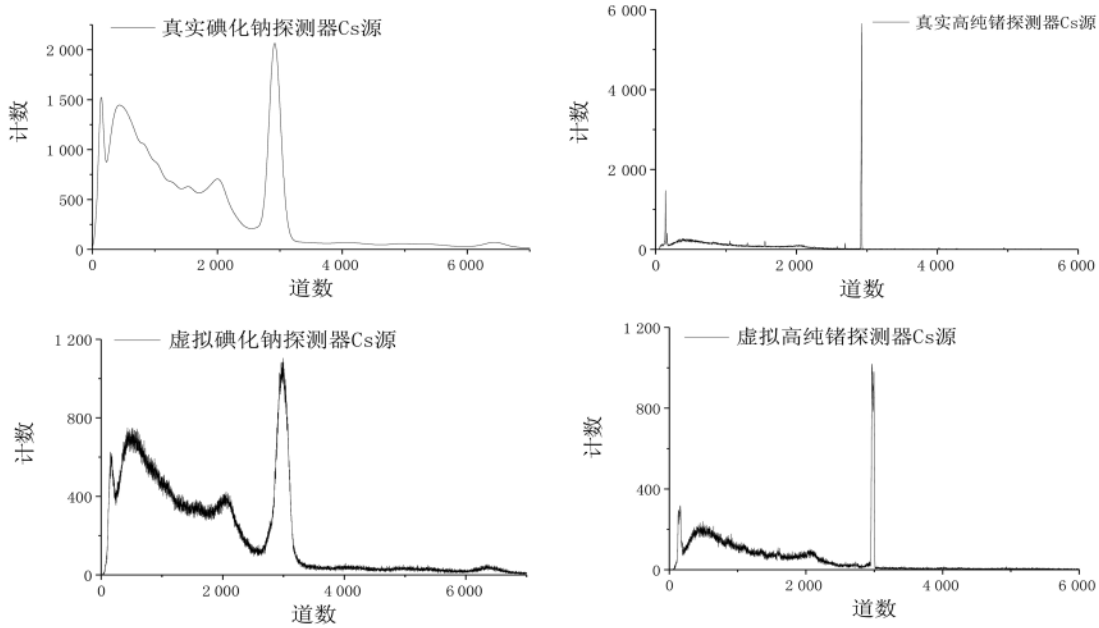


图7 ^{137}Cs 源伽马射线能谱图

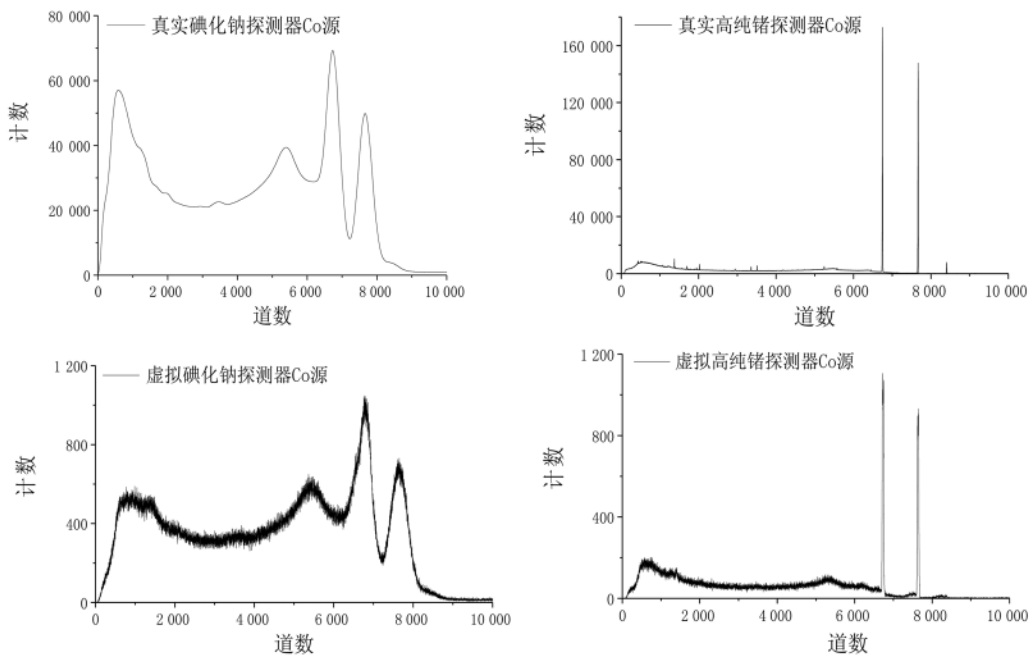


图8 ^{60}Co 源伽马射线能谱图

参考文献

[1] 殷伟刚,王芷路,刘升全,等.基于虚拟放射源技术的X射线能谱测量实验教学系统[C].第十八届全国核电子学与核探测技术学术年会,2016.
 [2] 黄洪全,任家富,陈光柱.高校实验室放射源虚拟化设计方法[J].实验室研究与探索,2015,34(8):275-279.
 [3] 张宪锋.虚实重构的核物理实验[J].物理实验,2017(11):33-34.
 [4] 李洪星.辐射防护基础[M].北京:原子能出版社,1982.
 [5] 孟帅旗,徐志平,尹新宇,等.基于DDS的信号发生器基

本原理研究[J].科技与创新,2019(9):72-73.
 [6] 廖远.高纯锗全数字双通道脉冲幅度分析仪的研制[D].武汉:武汉大学,2019.

(收稿日期:2020-03-10)

作者简介:

邹风华(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:核脉冲信号处理和采集。
 王柱(1962-),通信作者,男,教授,主要研究方向:微电子与固体电子材料,E-mail:wangz@whu.edu.cn。
 钱秋妃(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:FPGA。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所