

嫦娥七号月球中子伽玛谱仪测试系统的设计与实现

开宇^{1,2,3} 黄永益^{1,2} 马涛^{1,2,3} 徐遵磊^{1,2,3}

张永强^{1,2,3} 张岩^{1,2}

1(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

2(中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

3(中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 月球中子伽玛谱仪 (Lunar Neutron Gamma Spectrometer, LNGS) 是嫦娥七号轨道器的有效载荷, 受控于轨道器载荷管理系统。其主要科学目标是测量整个月表的水、冰和主要元素的丰度和分布。在 LNGS 研制过程中, 需要一套测试系统, 模拟轨道器载荷管理系统, 对 LNGS 的各项功能进行测试。测试系统主要包括地检板和上位机两部分, 分别基于 FPGA (Field Programmable Gate Array) 与 Labwindows/CVI 开发, 实现了以交互式界面控制载荷和解析数据, 提高了系统测试效率与稳定性, 为载荷的顺利研制提供了保障。

关键词 嫦娥七号, 地检板, FPGA, Labwindows/CVI

中图分类号 P171

Design and Realization of the Test System for Chang'e-7 Lunar Neutron Gamma Spectrometer

KAI Yu^{1,2,3} HUANG Yongyi^{1,2} MA Tao^{1,2} XU Zun-lei^{1,2}

ZHANG Yong-qiang^{1,2} ZHANG Yan^{1,2}

1 (Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

2 (Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

3 (School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The Lunar Neutron Gamma Spectrometer (LNGS) is a payload on the Chang'e-7 orbiter, controlled by the orbiter payload management system. Its primary scientific goal is to measure the abundance and distribution of water, ice, and major elements across the lunar surface.

* 基金项目: 嫦娥七号中子伽玛谱仪 (541811)

投稿日期:

E-mail: xuzl@pmo.ac.cn

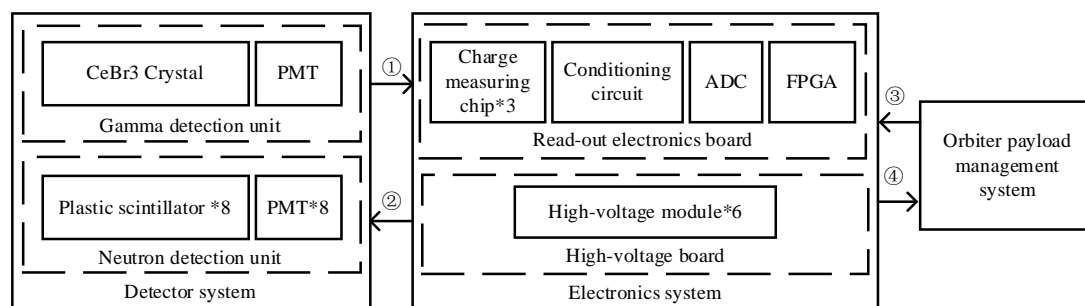
During the development of the payload, a testing system is required to simulate the orbiter payload management system and test the various functions of LNGS. The testing system mainly consists of two parts: the ground test board and the host computer software. These are developed based on FPGA (Field Programmable Gate Array) and LabWindows/CVI, respectively. The system achieves interactive control of the payload and data analysis through an interface, significantly improving the testing efficiency and stability, and ensuring the smooth development of the payload.

Key words Chang'e-7, Ground test board, FPGA, LabWindows/CVI

0 引言

宇宙射线与月表物质发生作用会产生中子和伽玛射线,月表中的自然放射性物质也会释放出伽玛射线。根据中子的能量分布和特性,将中子分成三个能段:快中子、超热中子和热中子。其中,超热中子的通量与氢含量呈现明显的负相关,通过对超热中子通量的测量,可以间接获得月表氢的分布情况,从而获得水、冰的分布信息[1]。伽玛射线的能量与自然放射线物质的原子核序数有关,可以通过研究伽玛射线的能谱来获得月表元素种类及丰度[2]。

嫦娥七号轨道器搭载的月球中子伽玛谱仪 (Lunar Neutron Gamma Spectrometer, LNGS) 就是通过探测月表中子与伽玛射线能谱,实现对月表水、冰和主要元素丰度和分布的测量。LNGS 组成结构如图 1,其由两个主要部分组成:探测器系统和电子学系统[3]。探测器系统基于闪烁晶体与光电倍增管 (PhotoMultiplier Tube, PMT) 实现粒子探测[4],共包含四个中子探测单元和一个伽玛探测单元[5]。电子学系统由前端电子学板 (Front-End Electronics, FEE) 和高压板组成: FEE 通过模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)将探测器系统的模拟信号转换为数字信号,再通过 FPGA 转换为能谱数据。高压板则用于提供探测器系统所需的高压,以确保 PMT 处于正常的工作状态。



①Analog signal ②High-voltage supply ③Telecontrol and power supply ④Telemetry and scientific data

图1 月球中子伽玛谱仪组成结构图

Fig.1 Structure of LNGS

如图 1 所示,轨道器载荷管理系统直接控制并接收 LNGS 返回的遥测参数与科学数据。在 LNGS 研制过程中,需要一套测试系统,模拟轨道器载荷管理系统,对 LNGS 的性能及各项功能进行测试[6]。

1 测试系统设计

测试系统用于模拟轨道器载荷管理系统,实现对 LNGS 的性能及各项功能进行测试。为了完成这项任务,测试系统需要具备以下功能:

- (1) 支持 LNGS 的通信协议与硬件接口;
- (2) 实现对 LNGS 的供配电管理;
- (3) 备份通信数据,检测错误状态;

(4) 监测状态参数, 分析科学数据;

测试系统集成功能较多, 通过设计上位机能大大减小操作复杂度, 同时, 对于工程参数与能谱信息也能较为直观的显示。为了模拟轨道器载荷管理系统, 测试系统应兼容 LINGS 的通信协议与硬件接口, 因此需要一套专门的硬件设备, 即地检板, 实现上位机和 FEE 之间的通信与监测功能。

综上所述, 设计上位机与地检板能够较好的实现测试系统所需的功能。

1.1 地检板硬件设计

根据接口设计规范, FEE 与载荷管理系统之间分别通过两条链路 RS422 和 LVDS(Low-Voltage Differential Signaling), 传输工程参数数据与科学数据。RS422 链路采用半双工差分传输, 每秒传输 268 字节数据, 波特率 $115.2\text{kbits} \pm 3\%$, 串口差分传输芯片为 B26LV31TERH, B26LV32TERH, 连接器为 J30JHP15TJWBN10-SBT。LVDS 链路采用 8b/10b 编码 $20\text{Mhz} \pm 1\%$ 比特流, 普通模式下每秒传输 66048 字节数据, 控制码为 K28.5, 连续传输时高位字节在前, LVDS 差分传输芯片选用 B54LVDS031LVRH。

地检板与 FEE 通信有严格的时序要求, 例如: RS422 链路采用半双工方式通信, 数据收发均在一条线路完成, 若要保证通信正常, 需要双方在发送完成后及时放弃对总线的控制权。根据接口设计规范要求, 通信双方应在发送完毕后 $10\mu\text{s}$ 内放弃对总线的控制权。地检板不仅需要能及时放弃总线控制权, 还要能对 FEE 能否及时放弃总线控制权进行检测。因此地检板的核心处理器必须具备很高的时序精度。

FPGA 对处理时序要求严格的任务具有很大的优势, 能做到纳秒级的时序精度。同时, FPGA 可编程的特性能够很容易的让测试人员对地检板的功能进行优化与拓展, 使其能胜任各种复杂的任务。综上, 选择 FPGA 作为地检板核心处理器^[7]。

FPGA 芯片选用 ALTERA 公司 Cyclone V 系列的 5CEFA9F23I7N。该 FPGA 共有 301k 逻辑资源, 480 个输出管脚, 12200kb M10K 和 1717 kb MLAB 片上内存。可以满足编写功能与实时调试的需求。

FEE 数据传输量为 0.13MB/s , 最大不会超过 1MB/s 。遥测工程数据与能谱数据分别由 LC234X 串口通信模块和 FT232H USB2.0 模块传输。其中 FT232H 工作在异步 FIFO(First In First Out)模式, 传输速率为 6MB/s 左右, 可以满足 LINGS 的数据量需求。

FPGA 需要不同大小的电压供电, 如: 内核供电 1.1V , 锁相环供电 2.5V , IO 供电 3.3V 。通过设计电源芯片阵列, 提供不同幅度的电压, 使 FPGA 正常工作。电源芯片采用 ALTERA 公司的 EN539QL, 其具有封装小、可靠性高等优点。电源芯片阵列分别产生两个 3.3V 电压供 IO 和外部模块使用, 一个 2.5V 供内部锁相环使用, 一个 1.1V 供内核使用。

FPGA 编程口有 JTAG 和 AS 两种模式, 可以在线调试以及固化逻辑电路。拓展口为 PCIE(Peripheral Component Interconnect Express)接口, 选用该接口的原因为, 该接口通用性强, 插拔方便, 输出管脚多, 能够满足未来拓展硬件功能的需要。

地检板硬件结构框图如图 2。

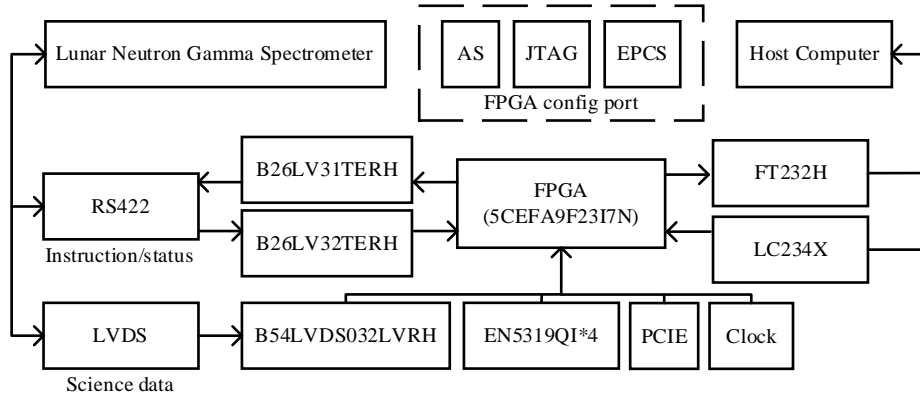


图2 地检板硬件结构图
Fig.2 Hardware structure of ground test board

1.2 地检板软件设计

地检板的主要功能分为两部分：一是实现 RS422 与 LVDS 接口通信，二是备份与监测总线数据。

1.2.1 通信功能设计

地检板分别通过 RS422 接口与 LVDS 接口完成指令和科学数据传输。

(1) RS422 接口通信设计

根据总体要求，LNGS 的 RS422 接口通信工作在主从模式，轨道器载荷管理系统为主机，LNGS 为从机，主从机通信结束后立刻设定为高阻模式。LNGS 应答时间应为轨道器载荷管理系统通信结束时刻 20us 后，应答总时长根据应答数据不同而不同，最长不超过 50ms。对于不需要回复的指令，连续的指令间隔大于 3ms。

由于不同指令的长度与响应不同，地检板需要具备区分不同指令的能力。地检板接收到上位机的指令后，先将指令存入内部缓冲，待满足时序条件后将指令传出。RS422 接口软件模块框图如图 3。其中，为了验证 FEE 是否具有链路层错误检测能力，UART(Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)传输模块具备可配置的波特率、奇偶校验、停止位、字节间隔。

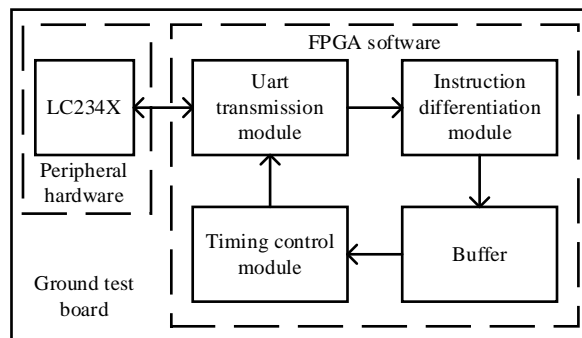


图3 地检板软件RS422接口通信模块框图
Fig.3 Module block diagram of RS422 of ground test board software

(2) LVDS 接口通信设计

LVDS 接口通过单路异步传输 8b/10b 编码的 20MHz 数据流，异步数据传输需要采取一定的时钟恢复和亚稳态抑制技术，保证采样数据的正确性。

由 LVDS 接收模块整合后的数据流传入 8b/10b 解码模块进行解码，得到 8 位有效数据，解码模块会剔除掉 K 码（十六进制显示为 BC），将有效数据存入 FIFO 中。随后，FIFO 将

数据输出给 USB(Universal Serial Bus)传输模块, 将数据转换成 USB 通信协议, 最终上传给上位机进行处理。图 4 展示了 LVDS 链路模块框图。

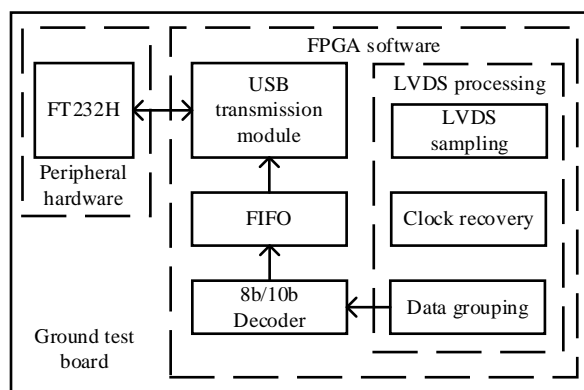


图4 地检板LVDS接口通信模块框图

Fig.4 Module block diagram of LVDS of ground test board software

1.2.2 通信备份与监测功能设计

地检板要能够实时备份与监测通信双方的数据, 为了不影响地检板已有模块的功能, 同时也避免 FPGA 内部程序过于复杂, 将总线数据通过 PCIE 接口引至拓展口, 由拓展板硬件实现数据备份与监测功能。

拓展板由 STEP-MAX10 开发板控制, 分别由串口模块 LC234X 与 USB 传输模块 FT232H, 将总线数据传输至备份机, 实现通信备份。

拓展板实时监测 RS422 链路中出现的通信错误, 如: 指令校验和、时序错误等。由于该链路采用单路半双工通信, 线路上混合了地检板与 FEE 双方的通信。拓展板首先需要区分发送指令的方向, 再判断指令的数据和时序是否出现错误。当判断指令存在错误时, 将错误信息写入 RAM(Random Access Memory), 由于 RAM 在写入时可能需要向上位机上传数据, 为了减少电子学死时间, 采用乒乓结构来提高数据传输的效率^[8], 拓展板错误检测软件框图如图 5。

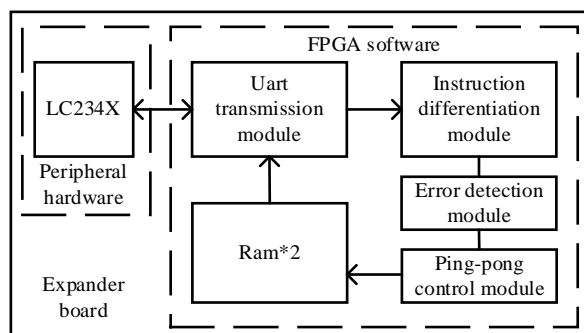


图5 拓展板错误检测模块框图

Fig.5 Module block diagram of error detection of expander board

1.3 上位机设计

LabWindows/CVI (C programming language Virtual Instrument)平台是美国 NI (National Instruments)公司利用虚拟仪器技术开发的软件开发平台, 面向计算机测控领域, 提供了丰富的函数面板和库函数^[9]。上位机基于 LabWindows/CVI 开发, 能够实现通信、数据处理、错误检测等测试所需的各项功能。上位机运行流程图如图 6。

1.3.1 通信设计

上位机通过串口与 USB 与地检板通信，实验人员可以通过 UART 配置窗口调整串口通信的参数，包括字节间隔、波特率、奇偶校验位和停止位。此外，上位机还可以通过串口控制直流稳压电源，实现一键给 FEE 和地检板上电的目的。

在测试过程中，需要发送不同类型的指令。针对固定格式的指令，用户可以通过界面的按钮发送，对于内容不固定的配置指令，用户可以通过点击“读取配置”的按钮，从 PC 中读取指令，一次可以读取多条。读取完毕后，用户可以通过点击“一键配置”按钮，将指令发送给地检板。

1.3.2 数据处理及自动化设计

上位机通过串口接收的数据中包含了工程参数与压缩能谱。在接收到数据包后，软件将自动对数据进行校验与解包、换算工程参数、累积能谱数据等。工程参数与能谱数据以图表的形式展示在界面中，供测试人员使用。

上位机持续监测通信状态与数据状态。当通信或数据连接断开时，软件将以信号灯熄灭的方式响应。对于出现错误的通信，错误信息将显示在文本框内。此外，所有通信内容将保存在本地端供测试人员查阅。

上位机使用的大部分场景是使用固定的配置文件进行能谱数据采集，为了提高测试效率，软件引入了许多自动化设计。在使用自动化操作时，初次使用仅需四步即可完成能谱采集：导入配置文件、自动配置串口、设置能谱采集时间、点击 DAQ 开始。再次使用则只需单击 DAQ 开始/关闭，即可完成操作。

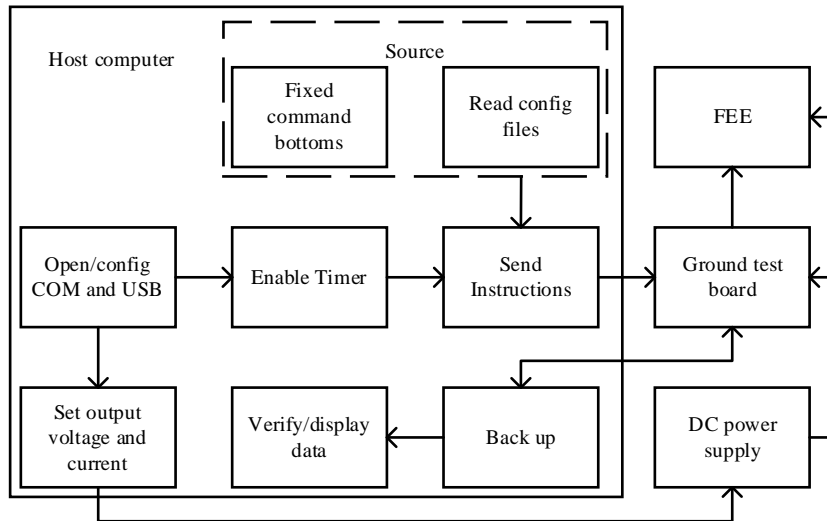


图6 上位机运行流程图
Fig.6 Workflow of Host computer control software

2 测试系统实现与运行情况

测试系统由上位机、地检板、直流稳压电源、高压模块等组成，旨在模拟轨道器载荷管理系统，测试 LNGS 的各项功能。测试人员只需在上位机上进行操作，即可完成设置和监测直流稳压电源、控制高压模块输出、发送和接收指令，以及采集科学数据等操作。图 7 为地检板硬件实物，图 8 为上位机运行界面。

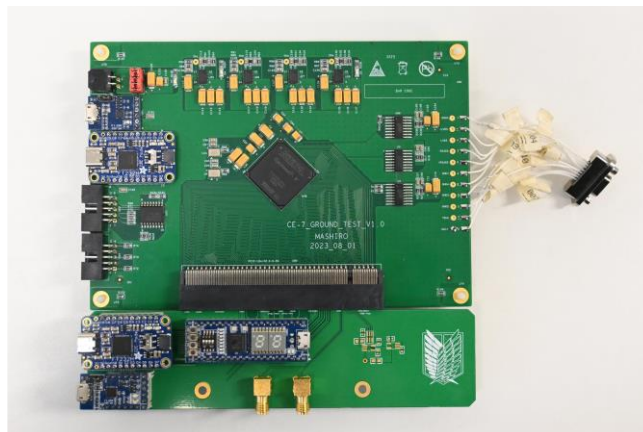


图7 地检板正面图

Fig.7 Front side of ground test board



图8 上位机运行界面

Fig.8 Interface of ground test board control software

图 9 展示了综合测试系统的运行情况，测试人员通过上位机控制地检板和直流稳压电源，完成能谱累积、配置电荷采集芯片等任务。

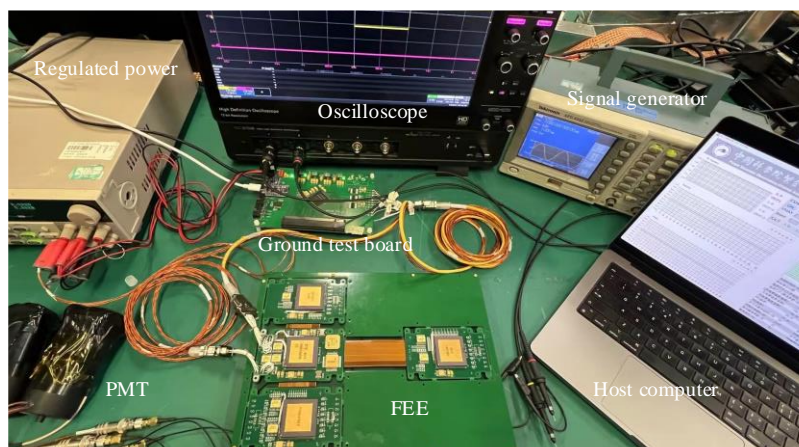


图9 测试系统运行现场

Fig.9 Operation scene of test system

环境中的本底噪声可能导致探测器触发并产生计数,因此对环境本底的测量是探测器校准和背景减除的重要步骤^[10]。同时,环境本底测量也可以反映探测器的性能。这项工作有助于识别和理解探测器信号中的噪声来源和环境辐射的干扰。通过区分真实的辐射信号和仪器本身或环境条件引起的干扰,可以提高探测器的灵敏度和准确性。下图 10 和图 11 展示了 LNGS 的中子环境本底谱和伽玛环境本底谱。其中伽玛环境本底谱中, K40 与 TH232 特征峰清晰可见,表明探测器的功能正常。

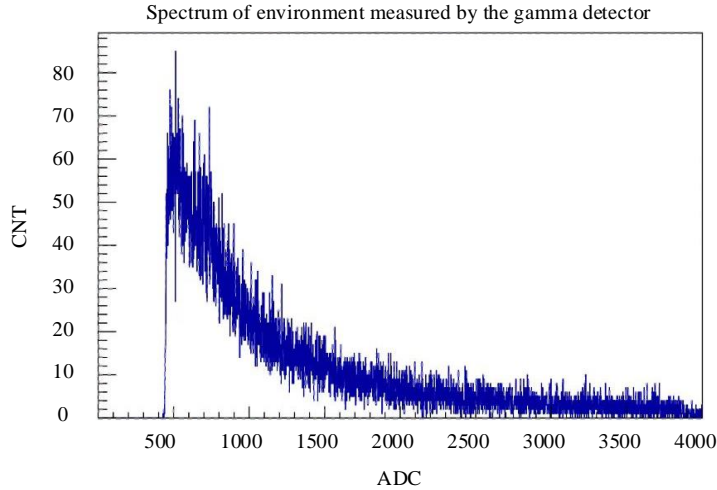


图10 月球中子伽玛谱仪中子环境本底谱
Fig.10 Neutron ambient background spectrum of LNGS

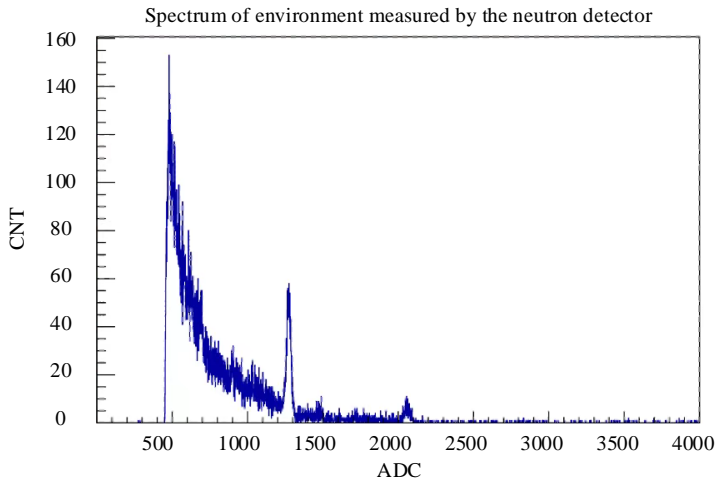


图11 月球中子伽玛谱仪伽玛环境本底谱
Fig.11 Gamma ambient background spectrum of LNGS

3 结论

本文介绍了月球中子伽玛谱仪测试系统的设计与实现,该系统由上位机、地检板、直流稳压电源、高压模块等组成,能够模拟轨道器载荷管理系统,为 LNGS 提供各种所需的测试条件,并对其功能进行验证。该系统具有高度的自动化程度和可靠性,并已成功应用于载荷研制的各个阶段,保障了载荷的顺利研制与交付,可为同类型的设计提供参考。

参考文献

- [1] W.C.Feldman, S.Maurice, A.B.Binder, et al. Fluxes of Fast and Epithermal Neutrons from Lunar Prospector: Evidence for Water Ice at the Lunar Poles[J]. *Science*, 1998, 281(5382): 1496-1500
- [2] T.H.Prettyman, J.J.Hagerty, R.C.Elphic, et al. Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(E12007)
- [3] HE Rui, NIU Xiaoyang, WANG Yi, et al. Advances in nuclear detection and readout techniques[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(205)
- [4] P.Antonino. The Physical Mechanisms of Neutron Detection[J]. *Contemporary Physics*, 2023, 64(3): 194-223
- [5] LIU Shixing, ZHANG Wei, ZHANG Zihan, et al. Performance of real-time neutron/gamma discrimination methods[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(8)
- [6] XU Zunlei, ZHANG Yongqiang, ZHANG Zhe, et al. The Design and Realization of the Payload Integrated Test System for DAMPE[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2018, 59(3): 25-35 (徐遵磊, 张永强, 张哲. 暗物质粒子探测卫星有效载荷综合测试系统的设计与实现[J]. *天文学报*, 2018, 59(3): 25-35)
- [7] C.S.Anil.Kumar, P Hemanth, B Ganesh, et al. A Survey of FPGA-Based Techniques for High-Performance Gamma Radiation Detection (A)\,[C]//2024 4th International Conference on Data Engineering and Communication Systems(ICDECS), 2024
- [8] LI Hongdi, WONG Waihoi, J.Uribe, et al. A high speed position-decoding electronics for BGO block detectors in PET (A)\,[C]//1999 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1999
- [9] Jianxin WANG, Meili SUI. LabWindows/CVI Virtual Instrumentation Design Technology\,[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013 (王建新, 隋美丽. LabWindows/CVI 虚拟仪器设计技术\,[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013)
- [10] D.Mrdja, S.Forkapic, J.Hansman, et al. Low-level gamma ray counting on environmental samples[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2024, 278(107511)