

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005477

# 基于 MODBUS 协议的深海原位核探测谱仪读出方法\*

刘朝亮<sup>1,2</sup> 曹平<sup>1,2</sup> 袁建辉<sup>1,2</sup> 周自衡<sup>1,2</sup> 孙振宇<sup>3</sup> 安琪<sup>1,2</sup>

(1.中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室 合肥 230026; 2.中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026; 3.中国科学院近地空间环境重点实验室 合肥 230026)

**摘要:** 深海原位核辐射探测仪在经过母船配置后,可以自行在原位环境中运行。同时,仪器打捞回收后,母船需要完成与之对接和数据回收功能,探测仪和母船上位机之间的数据读出成为一个关键问题。针对目前谱仪读出设备中存在的兼容性和可扩展性问题,设计了深海原位核辐射探测仪的数据读出方法,硬件上采用 RS485 和 LVDS 物理层,保证谱仪数据的稳定可靠读出;应用层使用 MODBUS 协议,利用其开放性、易用性、可靠性等特点,提高了谱仪的兼容性和可扩展性。通过搭建实验室测试平台,对系统整体功能和物理层传输信号的误码率、眼图进行测试。结果表明,读出方法能够实现深海原位伽马探测仪数据的稳定可靠读出,在低速和高速模式下的读出数据率分别为 115 200 bit/s 和 40 Mbit/s。

**关键词:** MODBUS; 深海原位; 数据读出; 辐射探测

**中图分类号:** TL822 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 490.15

## Readout method for deep-sea in-situ nuclear radiation detector based on MODBUS protocol

Liu Zhaoliang<sup>1,2</sup> Cao Ping<sup>1,2</sup> Yuan Jianhui<sup>1,2</sup> Zhou Ziheng<sup>1,2</sup> Sun Zhenyu<sup>3</sup> An Qi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Department of Modern Physics, University of Science and Technology, Hefei 230026, China; 3. Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The deep-sea in-situ nuclear radiation detector can operate in the in-situ environment by itself after being configured by the mother ship. At the same time, after the instrument is salvaged and recovered, the mother ship needs to complete the docking and data recovery functions, and the data readout between the detector and the host computer on the mother ship becomes a key issue. Aiming at the compatibility and scalability problems existing in the current spectrometer readout equipment, this paper designs a data read-out method for the deep-sea in-situ nuclear radiation detector. The RS485 and LVDS physical layer are used in hardware to ensure the stable and reliable data readout spectrometer. The MODBUS protocol application layer is used to improve compatibility and scalability spectrometer. By building a laboratory test platform, the overall function of the system, and the bit error rate, eye diagram of the physical layer are tested. The results show that the method can realize the stable and reliable data readout of the deep-sea in-situ gamma detector. In the low-speed mode and high-speed mode, the reading data rate of the detection instrument system is 115 200 bit/s and 40 Mbit/s respectively.

**Keywords:** MODBUS; deep-sea in-situ; data readout; radiation detect

## 0 引言

深海原位核辐射探测最早开始于上世纪 50 年代,早期的深海核辐射探测仪器主要用于矿物勘探领域,但随着研究的不断深入,深海核辐射探测仪也逐渐应用于地质测绘、

沉积物运输研究、海洋环境放射性废物评估以及深海中微子探测研究等诸多方面<sup>[1-3]</sup>。深海核辐射探测工作流程一般是探测仪在经过母船配置后,可以自行在原位环境中运行,待打捞回收后,再由母船完成与之对接和数据回收功能。因此在深海核辐射探测领域中,探测仪如何与上位机

收稿日期:2020-12-03

\* 基金项目:中科院先导专项 A 子课题(XDA22020061)、安徽省杰出青年科学基金(1808085J22)、国家自然科学基金(U1832117)项目资助

(母船)间进行数据传输与读出是一个关键问题<sup>[4]</sup>。

目前国内外深海监测和探测领域使用的数据读出方式主要有 3 种。基于 RS232/485 物理层和 UART 链路层的读出架构,如日本海洋科技中心(JAMSTEC)设计的放射性测量系统<sup>[5]</sup>和杨微等<sup>[6]</sup>设计的深海检测系统。该读出架构物理层采用双绞线,设计成本较低。应用层采用自定义协议,以满足不同场景中用户的定制化需求,但一般不利于和其他平台、设备间的通信,因此设备的兼容性和可扩展性较低;基于光纤物理层和以太网链路层的读出架构,如 ANTARES 中微子望远镜<sup>[7]</sup>和 KM3NeT 深海中微子成像采集系统<sup>[8]</sup>。该读出架构底层采用成本较高的光纤,可以实现每秒几十千兆以上的读出数据率,主要适用于超高速数据采集应用场景中;基于水声通信和卫星通信的读出架构,如陈金荣<sup>[9]</sup>设计的深海原位多参数观测系统和希腊设计的 POSEIDON 监测系统<sup>[10]</sup>。该读出架构首先利用水声通信将设备数据从海底上传至水面,然后通过卫星通信将数据传输至岸上实验室上位机,适用于长期极低数据率运行的应用场景,且设计复杂度和实现成本较高。

深海核辐射探测领域中通常只需要获取能谱、剂量率等信息,采用低成本长电缆的拖曳式探测,探测器与上位机间的数据读出采用基于 RS232/485 物理层和 UART 链路层,应用层使用自定义协议的读出架构更符合需求。但由于自定义的应用层协议不利于和其他设备间的通信,谱仪的兼容性和可扩展性通常较低。此外,基于 RS232/485 的物理层数据传输速率较低,在谱仪打捞回收后离线数据的回读阶段,存在数据读出时间较长的问题。

为了解决该读出架构下,核辐射探测设备兼容性和可扩展性低,以及离线数据回读较慢的问题,本文提出了一种基于 MODBUS 协议的深海原位核辐射探测谱仪数据读出方法。应用层使用目前工业电子设备间常用的 MODBUS 协议,提高了谱仪与其他设备间的兼容性,同时具有传输可靠性高,可拓展性好的特点。物理层和数据链路层根据不同工作模式分为两种:用于在线配置和实时数据传输的低速 RS232/485 物理层和 UART 链路层;用于快速离线数据回读的高速 LVDS 物理层和 8b/10b 编解码链路层协议。通过对数据读出系统的硬件接口和谱仪整体系统进行联合测试,结果表明读出系统在提高设备兼容性的同时,可以实现深海原位核辐射探测谱仪数据的稳定传输。

## 1 数据读出系统架构设计

深海核辐射探测谱仪的读出架构如图 1 所示,探测谱仪主要由谱仪探测器模块和读出接口模块组成,图 2 所示为深海核辐射探测谱仪各模块实物图。谱仪探测器模块负责完成核辐射信号的采集和数字化流程。读出接口模块负责建立起与上位机间的 MODBUS 协议数据通道,完成与上位机间的指令和数据传输。

读出接口模块作为读出系统的基础,在谱仪工作时,上

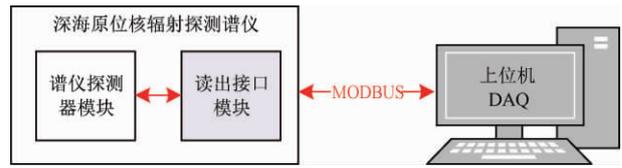


图 1 深海核辐射探测谱仪的读出架构

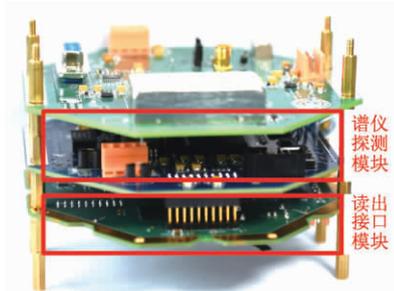


图 2 深海核辐射探测谱仪各模块实物

位机作为主控端发起 MODBUS 数据请求协议帧,通过 RS485 物理层下发至谱仪读出接口模块,由读出接口模块完成指令帧的解析后,根据指令内容将数据打包为 MODBUS 协议帧,根据配置经 RS485 或 LVDS 回传至上位机,完成一次数据传输。

整个数据读出系统的协议可以划分为 3 层:物理层、数据链路层和应用层,如图 3 所示。

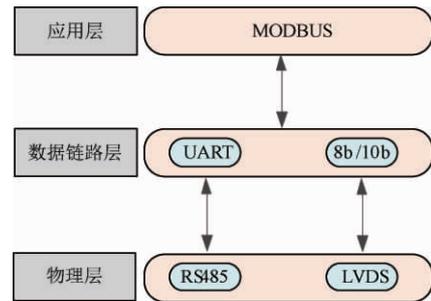


图 3 深海核辐射探测谱仪数据读出分层协议

物理层采用 RS485 和 LVDS 接口。RS485 接口使用差分双绞线传输数据,具有良好的抗干扰能力和低噪声的特性,常用于低速异步串行传输。LVDS 接口即低压差分信号,该接口除了具有差分传输的抗干扰能力外,同时由于其极低的电压摆幅可以实现高速的数据传输<sup>[11-12]</sup>,常用于高速总线的物理层接口。

数据链路层采用 UART 协议和基于 8b/10b 编解码技术的自定义传输协议。UART 协议是串行通信领域应用十分广泛的通信协议,常与 RS232、RS485 物理层配合使用。8b/10b 编解码技术解决了高速串行数据传输中的直流平衡问题,并且具有一定的纠错能力,是高速串行总线常用的编码方式。

应用层采用 MODBUS 协议。该协议由施耐德电气公司提出,可简化不同设备之间的通信,有开放性、可拓展性、可靠性等优点,目前已经成为国家标准 GB/T19582-2008,并广泛应用于数据采集系统<sup>[13]</sup>、自动化控制<sup>[14-15]</sup>、环境监控系统<sup>[16-17]</sup>等各类工业电子设备中。

## 2 数据读出系统实现

深海核辐射探测谱仪数据读出系统的实现主要包括读出接口模块硬件设计和 MODBUS 协议实现两部分。

### 2.1 读出接口模块硬件设计

读出接口模块作为整个读出系统的硬件基础,主要由数据接口单元、离线功能支持单元和 FPGA 数据处理单元 3 部分组成。

数据接口单元包括 RS485 接口和 LVDS 接口两部分。RS485 接口是读出系统低速长距离传输数据通道,考虑远距离传输可能会引入设备间较大的地电势差,因此 RS485 接口选择 ISO1450 隔离式芯片,将内部信号与外部信号进行电气隔离,提高数据传输的可靠性和安全性<sup>[18]</sup>。LVDS 接口是读出系统高速回读数据通道,为简化设计,选择使用 TI 公司生产的 LVDS 专用收发器 SN65MLLV 芯片实现数据的驱动级电路。

离线功能支持单元主要由时间表、数据 Flash 存储模块和实时时钟 RTC 模块组成,用于谱仪离线工作模式下的数据采集需求。时间表及数据存储模块负责存储谱仪离线工作模式下自主运行所需的时间表和采集到的科学数据,该模块使用 Micron 公司生产的 MT25QL256 Flash 芯片实现。实时时钟 RTC 模块负责向谱仪提供当前世界时,离线模式下与时间表配合使用,该模块使用 ABRACON 公司生产的外围电路简单的 AB-RTCMC-32.768 kHz 芯片实现,其供电由额外的纽扣电池 CR2032 提供。

FPGA 数据处理单元是读出模块的主控单元,由该单元完成与上位机间 MODBUS 协议帧的传输以及离线模式下的工作行为控制。为尽可能降低谱仪功耗,该单元采用 Flash 工艺的 M2GL025 FPGA 芯片完成读出系统的逻辑实现。读出接口模块的整体硬件电路结构及实物如图 4 和 5 所示。

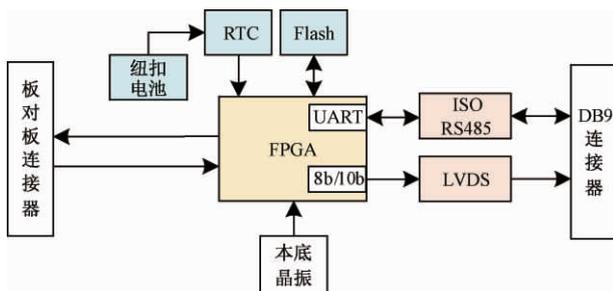


图 4 读出接口模块硬件架构

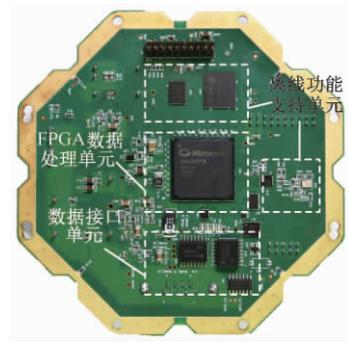


图 5 读出接口模块硬件实物

### 2.2 数据链路层协议实现

数据链路层根据数据率不同分为 UART 协议链路和基于 8b/10b 编解码技术的自定义传输链路。UART 协议可以实现低速数据的串并转换,将 RS485 接口输出的串行 UART 协议数据在 FPGA 内转换为并行输出,UART 协议的实现主要包括波特率的确定和 UART 数据帧的打包/解析。UART 数据帧分为起始位、数据位、校验位和停止位 4 部分<sup>[19]</sup>,波特率使用 115 200。FPGA 内的实现 UART 协议的状态跳转如图 6 所示。

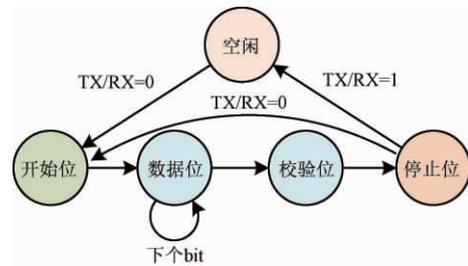


图 6 UART 协议状态机跳转

基于 8b/10b 编解码技术的自定义传输链路,可以实现数据的高速传输。自定义传输链路的实现主要分为 8b/10b 编解码部分、数据串行/解串部分。8b/10b 编解码即将 8 bit 待发送数据重新编码为 10 bit,保证传输数据的“0”、“1”平衡从而防止在高速数据传输中出现直流偏移导致数据传输错误<sup>[20]</sup>,编码方案如图 7 所示。编码后的数据根据类型可分为 256 个数据编码和 12 个控制编码。8b/10b 解码时将编码数据分为 6 和 4 bit 两部分,并按照编码规则进行解码,恢复出 8 bit 原始数据。

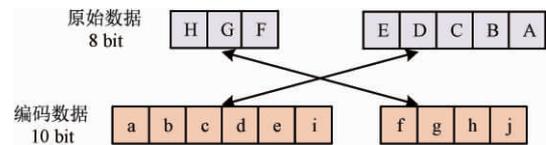


图 7 8b/10b 编码

数据串行/解串部分功能与 UART 相同,即将编码后

的并行数据转为串行数据通过 LVDS 接口进行传输,或将 LVDS 输出的编码串行数据转为并行数据。FPGA 内实现自定义传输链路的时序关系如图 8 所示,首先读出接口模块通过 LVDS 接口发送控制编码,接收端收到并连续校验正确 32 个控制编码后建立连接,之后开始正常发送有效数据,有效数据以 K28.1 为开始标志,K28.5 为结束标志。

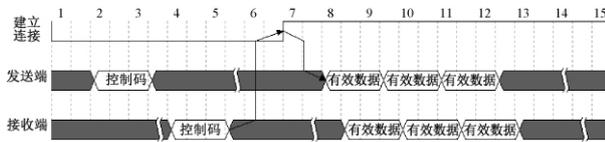


图 8 自定义传输链路实现时序图

### 2.3 MODBUS 应用层协议实现

由于 MODBUS 是一种基于寄存器的主从应答式协议,每个从设备都各自维护一段寄存器,对应于该设备的一些信息,如状态和科学数据等,主设备访问从设备信息的行为可简化为读、写某寄存器的值,因此符合 MODBUS 协议的设备只需对外提供一个寄存器列表,其他设备即可与其进行数据通信,具有很强的兼容性。

MODBUS 协议定义的数据传输帧格式分为两种:RTU 模式和 ASCII 模式。RTU 模式,数据以二进制形式传输。ASCLL 模式,数据以可见的 ASCLL 码形式传输,因此 RTU 模式传输效率较高,本文系统采用 RTU 传输模式,由从机地址、功能码、数据和 CRC 四个字段组成,具体帧格式如表 1 所示。

表 1 MODBUS 协议帧格式

从机地址	功能码	数据	CRC
1	1	252	2

从机地址为 MODBUS 组网中设备的编号,最大可支持 256 台设备。功能码用于标识该条协议帧的功能,MODBUS 协议定义了 21 个标准功能码,本系统使用了 03 和 17 两个常用功能码,03 读取一个或多个寄存器值,17 写入一个或多个寄存器值。数据字段即 MODBUS 协议定义的寄存器,该字段单次最多可传输 252 Byte 数据,本文系统定义了 31 个寄存器,如表 2 所示。

表 2 部分 MODBUS 协议寄存器

寄存器名称	寄存器个数	寄存值描述
开始采集	2	表示采集类型
通道使能	1	表示使能通道
阈值	8	表示使能阈值
科学数据	66	能谱或波形数据
状态信息	2	表示谱仪温度值

MODBUS 协议实现的状态机跳转如图 9 所示,其中虚

线为错误处理部分。

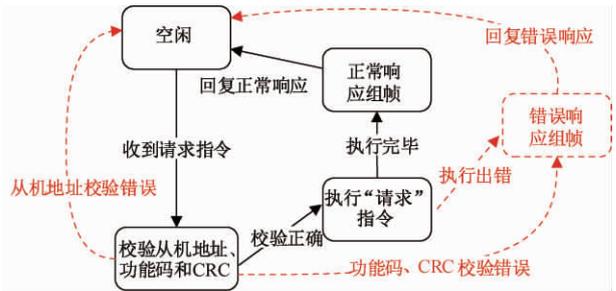


图 9 MODBUS 协议实现状态机跳转

线读出接口模块收到如表 3 所示的 MODBUS 请求指令后,首先对其进行从机地址、功能码以及 CRC 校验,若校验成功则根据指令内容执行相应操作。指令正确执行后向上位机回复如表 4 所示的正常响应帧。

表 3 MODBUS 请求指令帧格式

从机地址	功能码	读地址	寄存器数	CRC
0x01	0x03	0x08	0x01	0x05C8

表 4 MODBUS 正常响应帧格式

从机地址	功能码	字节数	寄存器值	CRC
0x01	0x03	0x02	0x0001	0x7984

若校验阶段发现从机地址错误,则不向上位机回复任何内容。若指令执行过程出错,则向上位机回复“错误”响应。错误响应帧格式如表 5 所示,错误响应码 01 表示非法功能码,02 表示非法地址,03 表示非法数据值,04 表示执行超时。

表 5 错误响应帧格式

从机地址	功能码	错误响应码	CRC
0x01	0x83	0x01	0x40F3

## 3 数据读出系统测试

为验证读出系统的性能和关键指标,在实验室搭建测试平台对读出系统的通信稳定性进行测试,并使用放射源,对深海原位核辐射探测仪整体功能进行测试验证。

### 3.1 通信稳定性测试

为验证系统传输的稳定性,采用伪随机码的方式对系统 RS485 及 LVDS 数据传输通道进行误码率测试,测试方案分别如图 10 和 11 所示。若累计传输  $N$  bit 未发生误码,则误码率  $< 4.61/N$  的置信概率为 99%<sup>[21-22]</sup>。

低速 RS485 接口的误码率测试是由上位机以 115 200 bit/s 通过 RS485 向谱仪发送 M 序列伪随机码,谱仪将数据经 RS485 回传至上位机,上位机检验发送和接收的数据得到

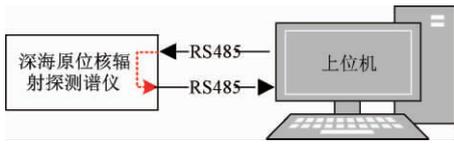


图 10 RS485 接口误码率测试方案

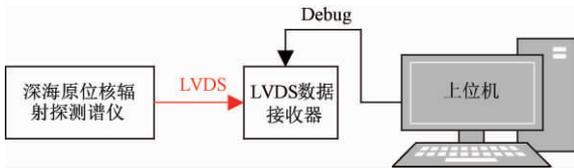


图 11 LVDS 接口误码率测试方案

误码率。高速 LVDS 接口误码率测试时由谱仪内部产生测试码,以 40 Mbit/s 数据率通过 LVDS 发送至 LVDS 数据接收器进行校验和错误统计,由上位机观察统计结果得到误码率测试结果。

经测试,使用 RS485 接口传输 19.2 Mbit 中均未出现误码,按误码率计算公式,可推导出谱仪 RS485 接口误码率  $< 2.4 \times 10^{-7}$  的置信概率为 99%。使用 LVDS 接口传输 10.3 Tbit 中均未出现误码,故其误码率  $< 10^{-12}$  的置信概率为 99%,通信稳定。

为评估高速串行数据传输的信号质量,需要对 LVDS 传输信号进行了眼图测试<sup>[23]</sup>,测试方案如图 12 所示。示波器采用安捷伦的 DSA91304A,并使用 3.5 GHz 的差分探头 N2751A 对信号进行测量,测量结果如图 13 所示,从图 13 中可以看出眼宽均值为 24.53 ns, Q 因子为 68.33,眼图抖动的 RMS 均值为 45.68 ps,信号品质较高。

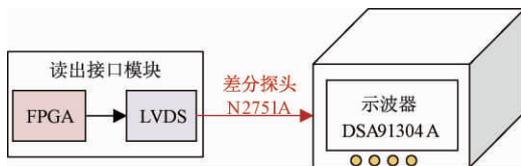


图 12 LVDS 眼图测试方案

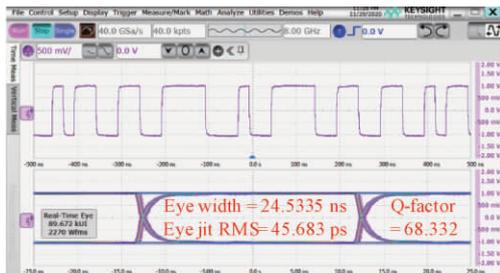


图 13 LVDS 眼图测试结果

### 3.2 谱仪系统联合测试

为验证数据读出系统整体功能,在实验室内使用 Na-22

放射源对深海原位核辐射探测系统进行联合测试,测试现场如图 14 所示。

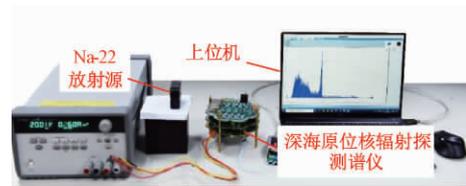


图 14 深海原位核辐射探测谱仪系统联调现场

测试时上位机通过 RS485 接口连接谱仪并进行参数和时间表配置,如图 15 所示,然后断开上位机与谱仪连接,谱仪根据时间表执行指令并将数据存储至 Flash 中。

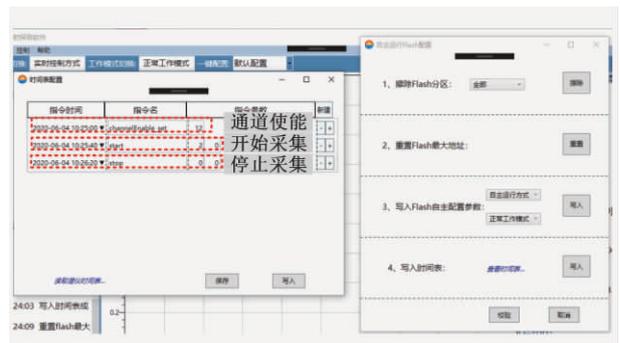


图 15 谱仪时间表配置界面

时间表执行结束后与上位机进行连接,通过高速 LVDS 接口将 Flash 数据进行回读。如图 16 所示,可以看到两个明显的全能峰,分别对应 Na-22 放射源的 511 keV 和 1 275 keV 伽马射线能量。测试结果表明,谱仪数据读出系统工作正常,实现了深海原位核辐射探测谱仪的数据稳定读出。

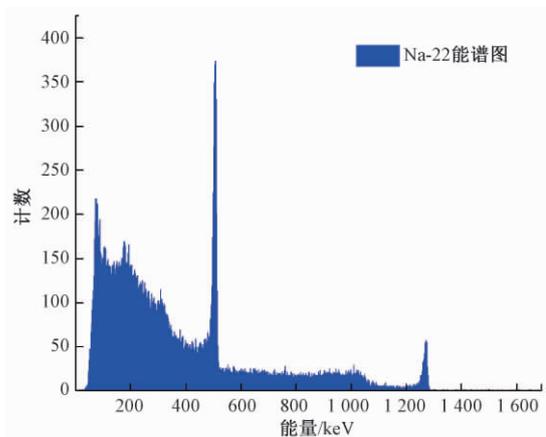


图 16 Na-22 能谱测试结果

## 4 结 论

为提高深海原位核辐射探测谱仪与其他设备间的兼容性和可扩展性,本文设计并实现了基于 MODBUS 的数据

读出系统。并在实验室搭建测试平台,对读出系统的稳定性和整体功能进行了测试验证,测试结果表明,数据读出系统各项功能指标正常,低速和高速模式下的数据率分别为115 200 bit/s和40 Mbit/s,证实了本文数据读出方法的可行性。

### 参考文献

- [1] 杨建民,刘磊,吕海宁,等.我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J].中国工程科学,2020,22(6):1-9.
- [2] 宋宪仓,杜君峰,王树青,等.海洋科学装备研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2020,22(6):76-83.
- [3] 丁忠军,任玉刚,张奕,等.深海探测技术研发和展望[J].海洋开发与管理,2019,36(4):71-77.
- [4] 夏学知,陈雁飞,曹江丽.深海信息体系构想及关键技术[J].中国工程科学,2019,21(6):102-105.
- [5] HIDENORI K, RYOICHI I, MASATAKA K, et al. Environmental gamma-ray observation in deep sea[J]. Gamma Radiation, 2012, 3(21): 56-58.
- [6] 杨微,秦华伟.基于MSP430的深海低功耗数据采集系统[J].机电工程,2009,26(5):16-19.
- [7] DONG D, XIANG X, ZHENG J, et al. Design and implementation of monitoring system for deep sea ore sampling machine [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2019, 11742: 276-288.
- [8] BELIAS A. A shore station data acquisition system for a deep-sea neutrino telescope[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 2011, 626/627: 176-179.
- [9] 陈金荣.深海原位低功耗多参数观测系统的研制[D].杭州:杭州电子科技大学,2015.
- [10] PETIHAKIS G, PERIVOLIOTIS L, KORRES G, et al. An integrated open-coastal biogeochemistry, ecosystem and biodiversity observatory of the eastern Mediterranean-the Cretan Sea component of the POSEIDON system [J]. Ocean Science, 2018, 14(5): 1223-1245.
- [11] 雷武伟,文丰,刘东海,等.基于LVDS的高可靠性远距离数据传输设计[J].电子技术应用,2019,45(6):130-134.
- [12] 朱泽琿,任勇峰,贾兴中.基于LVDS长距离高可靠性传输的优化设计[J].电子测量技术,2020,43(20):150-154.
- [13] 秦天柱,张伟刚,瞿少成.基于Modbus协议的多路数据采集器[J].电子测量技术,2017,40(11):175-178.
- [14] 孙彦赞,张瀚,吴雅婷,等.基于Modbus协议的OBD设备检测控制系统设计[J].电子测量技术,2018,41(3):102-106.
- [15] 郭敏,庄信武.基于MODBUS总线的地下工程除湿控制系统设计[J].国外电子测量技术,2019,38(6):125-129.
- [16] 范浩浩,刘新妹.基于PLC的药库多点温湿度本地监控系统设计[J].国外电子测量技术,2020,39(10):134-137.
- [17] 周焯,李沛宗,范赵鹏.基于PSOC4的浮标电池内阻监测系统设计[J].国外电子测量技术,2019,38(1):138-142.
- [18] 刘纯虎,付斌,连琰.基于STM32的水下运载器控制系统多串口远程转发器开发[J].计算机测量与控制,2013(6):1537-1540.
- [19] 张晓,胡颖毅,黄子硕,等.基于FPGA的UART的设计与实现[J].数字技术与应用,2020,38(2):99-100.
- [20] 杨佩,张丽娜,张洵颖,等.LVDS中8B/10B编码解码器的设计与实现[J].微电子学与计算机,2014,31(5):41-43,48.
- [21] 沈瀚涛,孙学聪,朱蕊蘋.一种串行通信的误码率测试方法[J].现代防御技术,2013,41(4):110-114,153.
- [22] 毛意诚,李世杰,贾宁刚.基于抖动的Serdes接口误码率量产测试评价方法[J].电子与封装,2020,20(1):21-25.
- [23] 付英华.眼图测试在串行通信系统中的应用研究[D].南京:南京大学,2016.

### 作者简介

刘朝亮,硕士在读,主要研究方向为核探测与核电子学中的信号采集处理等。

E-mail:liuzhaol@mail.ustc.edu.cn

曹平(通信作者),副教授,主要研究方向为高速数据采集、高精度时钟分发和同步、开源测控等。

E-mail:cping@ustc.edu.cn