

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208961

# 深海原位核探测谱仪软件设计\*

李林航<sup>1,2</sup> 曹平<sup>2,3</sup> 袁建辉<sup>2,3</sup> 杨伊<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026; 2. 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; 3. 中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

**摘要:** 深海原位核探测谱仪采集数据时,上位机软件配置和读出谱仪以及显示、保存和分析数据是重要问题。针对深海原位核辐射探测的特点和实际软件需求,设计了集成谱仪控制和读出、数据显示和分析功能的谱仪软件。谱仪读出上,基于 MODBUS 设计了谱仪通信协议,定义了谱仪工作模式和硬件统一接口,并实现了 RS-485 和雷电接口的谱仪驱动;数据显示上,设计了基于 XAML 的谱仪软件界面;数据分析上,基于小波变换和期望最大算法设计了能谱的寻峰拟合与核素识别算法。通过连接深海原位核探测谱仪采集并分析<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 平衡源和已知的深海岩石放射样品的的方式,对软件功能进行测试。结果表明,软件能够实现谱仪的配置和读出以及数据的显示和分析,数据分析效果好于谱分析软件 InterSpec。

**关键词:** 上位机软件设计;深海原位;数据读出;谱分析;寻峰;MVVM

**中图分类号:** TP319 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.4

## Software design of deep-sea in-situ nuclear radiation detector

Li Linhang<sup>1,2</sup> Cao Ping<sup>2,3</sup> Yuan Jianhui<sup>2,3</sup> Yang Yi<sup>2,3</sup>(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;  
2. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;  
3. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Detector readout and display and analysis of data are key issues to host computer software. Aiming at features and software demands in deep-sea in-situ nuclear radiation detection, this paper designs a detector software which integrates detector control and readout and display and analysis of data. A protocol based on MODBUS is designed, the work pattern of detector and a unified hardware interface are defined, and drivers for RS-485 and Thunderbolt are implemented in the software for detector readout. User interface is designed by XAML for data display. An algorithm based on wavelet transform and expectation-maximization algorithms for peak finding, fitting, and nuclide identification is designed. By connecting to detector to measure and analyze spectrum of balanced <sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra source and known radioactive samples from deep sea, the functions of the software are tested. The results shows that the software can stably realize detector configuration and readout, as well as data display and analysis, and has a better analysis result than InterSpec, a spectrum analysis software.

**Keywords:** software design of host computer; deep-sea in-situ; data readout; spectrum analysis; peak finding; MVVM

## 0 引 言

深海原位核辐射探测在地质研究、矿物勘探、海洋环境评估、放射性废物监测以及深海中微子探测等诸多领域均有不同程度的应用<sup>[1]</sup>。早期的深海核辐射探测大多采用拖曳式探测器,即采用拖缆的方式连接母船与探测器,并采用多道软件等读出、显示和保存<sup>[1]</sup>。在得到能谱等数据后,还

需要进行寻峰拟合和核素识别等工作,从而得到海底的放射性核素类型等科学数据<sup>[2-3]</sup>,以最终应用于地质研究、矿物勘探、海洋环境评估、放射性废物监测以及深海中微子探测等领域。

深海原位核探测谱仪采用自主运行的设计;探测仪在经过上位机配置后,支持自行在原位环境中运行,探测完毕后重新对接到上位机完成数据读出、显示和分析。在此

收稿日期:2022-02-03

\* 基金项目:中科院先导专项 A(XDA22020061)项目资助

设计中,如何配置谱仪和回读数据成为两个关键问题<sup>[4]</sup>。同时,受探测器外壳和海底环境限制,深海能谱数据往往存在计数率和分辨率较低、本底较高等问题。因此,如何显示和分析数据同样是两个重要问题<sup>[2]</sup>。

目前国内外使用的核辐射探测谱仪软件主要有以下几种。针对特定谱仪系统开发的嵌入式谱仪软件,如徐静等<sup>[5]</sup>设计的 $\gamma$ 谱仪。此类谱仪软件一般是为特定谱仪专门开发的多道软件,运行在谱仪的嵌入式系统上,具有基本的谱仪数据读出、显示、存储和寻峰功能,并使用自定义协议控制和配置谱仪。此类软件一般依赖硬件提供嵌入式系统支持,设计复杂、成本较高;上位机多道谱仪软件,如姚晓雨等<sup>[6]</sup>设计的 HPGe  $\gamma$  谱仪上位机软件。此类谱仪软件一般也是专门开发,采用 USB 等接口接收谱仪数据并显示和存储,部分软件有寻峰功能。拖曳式深海核辐射探测器使用的软件多为此类<sup>[1]</sup>。此类软件同样存在可移植性较差等问题,且无法支持谱仪的自主运行配置和回读;通用型谱分析和核素识别软件,如 InterSpec<sup>[7]</sup>等。此类软件不依赖特定谱仪和协议,但也无法实现谱仪控制和读出,且需要特定格式的数据和参数,易用性和移植性较差。此外,以上所有软件的能谱分析均采用光滑-寻峰算法<sup>[8]</sup>,难以适应深海能谱。

为了解决深海原位核探测谱仪上位机软件配置谱仪、回读数据、数据可视化和数据分析等问题,本文基于 .NET 平台设计了一套采用视图-模型-视图模型(model view view model, MVVM)框架的谱仪软件系统。在谱仪读出方面,制定了一套通用的谱仪工作模式和基于 MODBUS 的应用层通信协议,并在 RS-485 和雷电(thunderbolt, TBT)接口上实现;在软件界面方面,实现了基于 XAML 语言的图形界面;在数据分析方面,设计并实现了基于小波变换和期望最大(expectation maximum, EM)算法的能谱分析算法。

## 1 谱仪软件架构设计

### 1.1 谱仪工作模式定义

深海原位核探测谱仪采用统一的运行方式和工作模式定义:谱仪分为实时控制和自主运行两种运行方式,在运行方式之下又分为空闲模式、正常工作模式、回读模式、调试模式、自检模式和诊断模式等工作模式。实时控制方式下,谱仪完全受上位机控制,软件实时轮询谱仪状态并获取谱仪产生的科学数据。自主运行方式下,谱仪根据预定的配置和开始时间自动配置并执行任务,采集到的数据存储在内置的 Flash 存储中。

空闲模式下,谱仪不执行任何采集任务,上位机软件可写入谱仪的各项配置;正常工作模式下,谱仪依据时间表或者上位机指令开展任务;回读模式下,上位机可回读谱仪 Flash 中缓存的各项数据;调试模式提供谱仪一步一动的操作接口;自检模式下谱仪进行上电自检;诊断模式下谱仪

进行电子学刻度。谱仪上电后,自动进入空闲模式,谱仪可从空闲模式跳转到其他模式完成各项任务。任务完成后,谱仪跳转回空闲模式。

### 1.2 软件结构设计

软件整体采用 MVVM 的设计框架。MVVM 框架是一种分离前端用户界面和后端业务逻辑的框架<sup>[8]</sup>,被广泛用于数据可视化<sup>[9]</sup>、自动化控制<sup>[10]</sup>等领域。MVVM 框架自底层至界面分为模型、视图模型和视图 3 个层次。软件具体结构如图 1 所示。

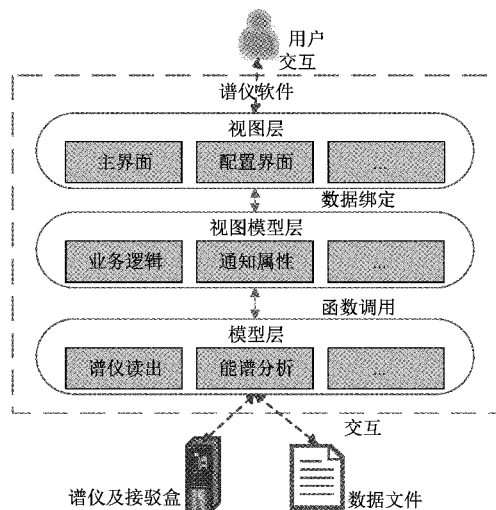


图 1 软件结构图

软件的模型层包括谱仪读出模型、数据分析模型等。其中谱仪读出模型是对谱仪及其行为的软件抽象,负责与谱仪的软件表示和软件与谱仪通信;数据分析模型是对科学数据及其分析算法的软件表示,包括能谱、波形等数据类的具体软件格式定义、通用算法库以及能谱和波形的分析算法。模型层采用原生 C++ 编写,并采用托管 C++ 封装接口,将原生 C++ 生成的 DLL 封装为 .NET 平台能够直接调用的托管 DLL 文件<sup>[11]</sup>。

软件的视图模型层采用 C# 语言开发,包括数据显示视图模型、主窗口视图模型、启动窗口视图模型等。软件的视图模型继承 C# 的 Bindable Base 类,将模型层中的元素封装为具有 Raise Property Changed 事件通知机制、可被视图层绑定显示的属性;并采用 Delegate Command 即命令属性的形式实现了数据采集、数据分析、谱仪配置等各项业务流程。

软件的视图层采用 XAML 语言开发,包括主窗口、各类配置窗口和启动窗口等。各个窗口的显示控件通过 Binding 字段分别绑定到视图模型的各个通知属性,实现各类数据的可视化和更新。用户对软件的各项操作绑定到视图模型的各个命令属性的形式在视图模型层实现。

## 2 谱仪软件功能实现

### 2.1 硬件接口和协议

谱仪连接到上位机的硬件连接方式如图 2 所示,有

RS-485 接口和接驳盒两种连接方式。为在这两种不同的物理层介质上实现谱仪与上位机的通信,本文定义了一套基于 MODBUS 协议的自定义通信协议。MODBUS 协议是一种开源的串行总线通信协议,可在 RS-485、LVDS、以太网等各类物理层上工作,且具有开放性、可拓展性等优势广泛应用于数据采集系统<sup>[12]</sup>、自动控制系统<sup>[13]</sup>、环境监测系统<sup>[14]</sup>等各类电子设备系统通信。

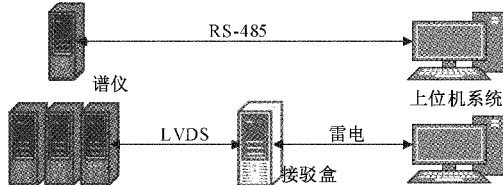


图 2 谱仪和上位机连接方式

MODBUS 采用请求-响应式的主-从 (Master-Slave) 结构。本文主要使用 MODBUS 的寄存器读写功能设计应用层协议,采用寄存器的读写操作实现命令的下发和配置、状态、科学数据的访问。

由于谱仪的能谱(4 096 道,每道 2 Byte)和波形(采样长度一般为 1 024,每点 2 Byte)长度均超过 MODBUS 协议帧长度,协议设计了以下的科学数据读取方式:上位机首先查询科学数据缓存量,再连续多次读取科学数据寄存器,直到科学数据缓存读取完毕。

### 2.2 谱仪读出模块

谱仪连接到上位机后,谱仪的软件抽象和谱仪硬件接口的读出操作的具体实现是软件读出谱仪的两个重要问题。本文设计谱仪读出模块解决这些问题,其具体结构如图 3 所示。

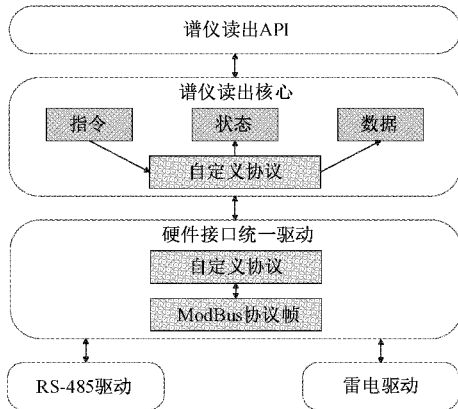


图 3 谱仪读出模块架构

谱仪读出模块由谱仪读出 API、谱仪读出核心、硬件接口统一驱动和底层的硬件驱动四个部分构成。其中,谱仪读出 API 采用托管 C++ 编写,是对谱仪读出核心的封装,提供读出模块对 .NET 平台的统一接口。读出核心采用原生 C++ 编写,定义了谱仪类以及指令、状态的软件表示和科学数据帧的缓存;硬件接口统一驱动是对硬件 IO 的抽

象,定义了统一的硬件驱动接口形式,解除了谱仪读出核心与硬件及驱动的绑定。由于 MODBUS 是一种请求-响应式协议,硬件接口统一驱动采用函数调用的形式实现,其工作流程如图 4 所示。接口驱动层实现了对 RS-485 和雷电接口的具体驱动。本文基于 Windows API 的串口驱动实现 RS-485 接口读出。针对高速的雷电接口,本文首先使用雷电驱动,将雷电接口转换为 PCIe 总线设备,之后再使用 PCIe 驱动实现读出。

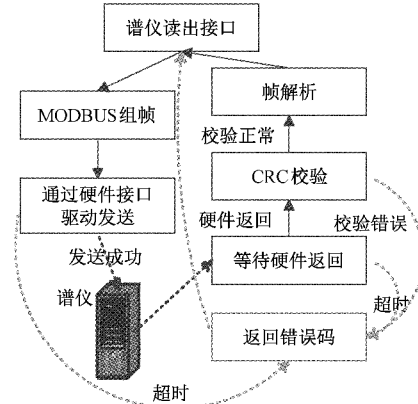


图 4 硬件接口统一驱动工作流程

### 2.3 软件主界面

软件的主界面主要实现谱仪状态、科学数据和分析结果的可视化,以及用户与谱仪软硬件的交互。主界面采用 XAML 设计,功能分区如图 5 所示,主要包括菜单栏、常用配置区、采集控制区、绘图区、状态栏、分析结果区、消息区等。软件界面的显示和操作均绑定到视图模型的对应数据或命令上,以实现数据更新和用户交互。

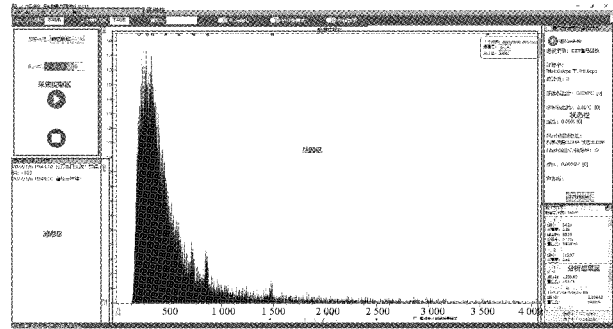


图 5 软件主界面功能分区

### 2.4 数据分析模块

#### 1) 模块结构设计

软件的数据分析模块由数据分析 API、数据分析核心和通用算法库组成,如图 6 所示。通用算法库实现了一些基本算法,数据分析核心定义了能谱和波形的软件表示,以及对应的数据处理算法。数据分析 API 是模块对 C# 的接口封装。

#### 2) 寻峰拟合算法

由于深海核探测得到的能谱计数率较低,能谱的相对

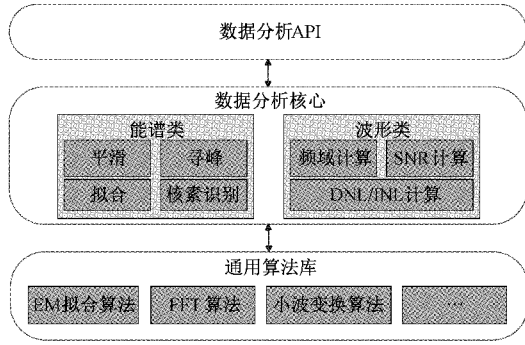


图 6 数据分析模块架构

统计涨落很大。为区别能谱中的峰和统计涨落,解决深海核探测能谱有效峰寻峰问题,本文提出了一种基于小波变换的寻峰方法。

小波变换(wavelet transform)是一种局部性的时频变换分析算法,被广泛用于信号分析<sup>[15]</sup>、音频处理<sup>[16]</sup>、图像降噪与识别<sup>[17]</sup>等领域。近年来也受到 X 射线光谱分析<sup>[18]</sup>、质谱分析<sup>[19]</sup>等领域的广泛关注。

根据能谱特征峰和噪声的特点,本文中选用 Mexican Hat 小波系,即高斯函数的二阶导数作为小波函数  $w$ ,其特点是对线性函数的响应为 0,而对近似高斯函数的能谱特征峰有较大的响应<sup>[18]</sup>。根据小波变换公式推导可知, $w$  对高斯函数  $N(\mu, \sigma)$  的响应在  $a \approx 2.247\sigma, x = \mu$  时取最大值。

实际应用时,由于谱仪得到的实际能谱有效峰的分辨率未知,故本文依据谱仪每道的理论分辨率计算  $a$ ,之后对能谱在  $a - 3a$  的尺度区间进行小波变换,再取每道对应的变换结果最大值  $F$ ,并记录对应尺度因子  $a_{real}$ 。 $F$  极大削弱了能谱本底,并通过加权平均减小了统计涨落。对  $F$  进行光滑和极值寻峰,即可得到备选的峰值点位置。

由于统计涨落,峰值点中仍有一定数量的假峰。因此,本文提出基于不确定度的判选方法:

$F$  的不确定度由能谱的统计涨落贡献,简单推导得到计算公式如下:

$$\Delta F^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta f(t)^2 \times w(x_0 - t)^2 dt \quad (1)$$

其中,  $t$  为道址,  $f(t)$  为能谱的每道计数。

能谱每道的计数累积为泊松随机过程,因此  $\Delta f(t)$  的一个优良点估计为  $\sqrt{f(t)}$ 。代入上式,有:

$$\Delta F^2 = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * w(x_0 - t)^2 dt \quad (2)$$

若峰值点  $x_0$  附近没有峰,则  $F$  的期望为 0。由中心极限定理:  $P(F > N\Delta F) = \int_N^{\infty} N(0,1)dt$ 。当  $N$  足够大时,若  $F > N\Delta F$  成立,即可认  $x_0$  附近有大概率有特征峰。本文一般取  $N=4$ 。

为准确得出寻到的峰的峰位、半高宽和净面积等信息以及分解重峰,需要对特征峰进行拟合。期望最大算法是

高斯峰拟合的重要算法之一<sup>[20]</sup>。本文的期望最大算法在王平波等<sup>[21]</sup>提出的算法的基础上额外添加了二次本底拟合项。算法依据小波变换结果设置迭代初值,即  $\sigma = \frac{a_{real}}{2.247}, \mu = x_0, A$  根据  $a_{real}$  尺度的小波函数对对应尺度高斯函数的响应计算。在重峰判定上,每个峰初值两侧  $2\sigma$  内为重峰区,若有峰在此范围内则合并重峰区,循环直到无法再合并,最后对每个重峰区内的所有峰一同进行期望最大算法拟合。

### 3)核素识别算法

得到有效峰信息后,还需要做核素识别以最终得出环境中含有的核素信息。本文设计了一套基于置信度计算的自动核素识别算法如下:

由于寻峰误差、能量刻度误差以及电子学噪声等因素的影响,由能谱计算的峰能量不可能与核素库中的能量完全相等。为解决这一问题,本文设计了如下的能窗:对能量刻度导致的误差使用固定宽度为 5 keV 的能窗,寻峰和电子学噪声产生的误差体现在峰位的不确定度上,对峰位位置信系数 0.95 的区间估计,推导得窗宽  $w = \frac{4\sigma}{\sqrt{n}}$ ,  $n$  为峰面积。

算法中使用的窗宽为二者之和。当峰位与核素的某谱线能量之差  $d$  小于窗宽,且为该谱线附近最近的峰,则认为该峰与该核素的该条谱线匹配。匹配的置信度通过理论与实际峰位的距离大于实测的峰与谱线距离的概率计算,即:

$$P_{spec} = 2 \int_d^{\infty} N(0, \frac{\sigma^2}{n}) dx \quad (3)$$

由于深海能谱探测效率较低,核素识别算法主要用于辅助人工识别,因此算法并不要求所有谱线的严格匹配。本文设计核素匹配算法如下:

根据窗宽匹配核素谱线与峰,计算置信度。

完成一轮匹配后,若某核素有专享的、发射概率大于 0.1 的峰,则计算该核素置信度  $P_{nuc} = \sum P_{spec} R_{spec}$ , 其中  $R_{spec}$  为谱线的分支比。若  $P_{nuc} > 0.2$ , 则认为此核素可能存在。完成置信度计算后,加权平均计算核素活度并扣除核素对峰的贡献,若扣除后峰面积过小,剔除该峰。

重复以上两步,直至所有峰均不被任一核素专享。计算所有剩余核素的置信度并判选,再根据核素的分支比和峰面积拟合峰与核素,排除活度过小的核素。

## 3 谱仪软件功能测试

### 3.1 谱仪读出和软件显示测试

本文主要研究对象为深海核探测谱仪读出和数据处理。为测试软件的谱仪读出以及科学数据显示和存储功能,分别使用 CZT 伽马谱仪和晶体伽马谱仪搭建测试环境如图 7 所示。

软件测试现场如图 8 所示。为验证软件的谱仪读出能力,需要使用软件配置谱仪并检查谱仪返回是否正确。为验



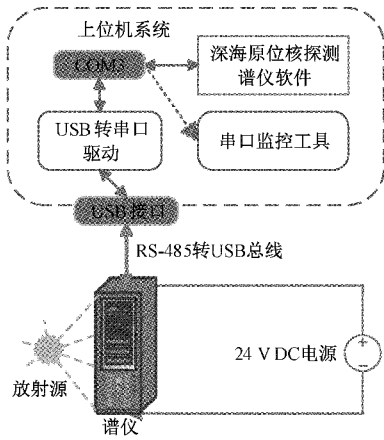


图 7 谱仪软件测试环境

证软件的数据显示功能,需要使用软件采集能谱数据并显示。

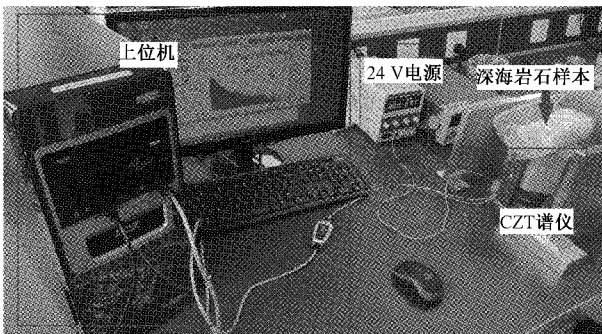


图 8 软件测试现场图

在与 CZT 伽马谱仪的联合测试中,软件配置谱仪在实时控制模式下采集深海岩石样本能谱。能谱读出间隔为 1 min,谱仪状态读出间隔为 1 s。在与晶体伽马谱仪的联合测试中,软件配置谱仪在自主运行模式下采集  $^{22}\text{Na}$  能谱,并在采集完成后通过软件回读。

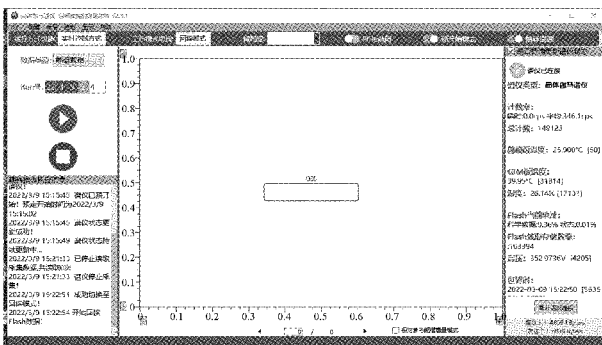


图 9 软件读出晶体伽马谱仪的显示

测试结果表明:软件能够正常读出和控制谱仪,软硬件通信符合 MODBUS 通信协议;软件界面能够显示和刷新谱仪状态和科学数据,计数率曲线和能谱增量显示等可视化控件工作正常;软件能够保存原始和结构化数据文件。

软件与便携式原位探测器上集成的多道软件<sup>[5]</sup>及能谱分析软件 InterSpec<sup>[17]</sup>的功能对比如表 1 所示,本文设计的软件包含了在深海原位核探测的谱仪读出、数据可视化和数据分析中所需的各项功能。相比于多道软件和 Interspec 等能谱分析软件,谱仪软件具有以下优势:软件能够实时控制谱仪和显示谱仪状态;计数率曲线等可视化功能能够在深海原位实时监测辐射异常;数据分析功能能够处理探测到的能谱和波形数据。

表 1 谱仪软件与部分核探测软件功能对比

功能	谱仪软件	多道软件	Interspec
谱仪读出	有	有	无
通信协议处理	有	无	无
谱仪控制	有	无	无
数据显示	有	有	有
谱仪状态显示	有	无	无
数据显示控件	多	无	较多
数据分析	能谱和波形	仅导数寻峰	能谱

### 3.2 能谱分析算法测试

为了测试本文设计的能谱分析算法的寻峰拟合效果,并与 Interspec 中的手动寻峰拟合算法做对比,分别使用两个软件分析了 CZT 伽马谱仪采集到的  $^{238}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$  平衡源能谱。

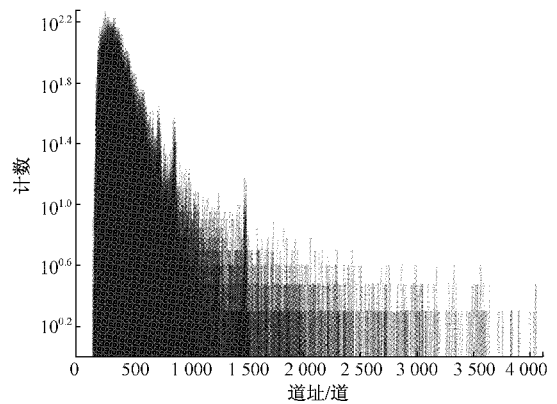


图 10 测试用的  $^{238}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$  平衡源能谱

测试用的  $^{238}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$  平衡源能谱的累积时间为 6 h,总事例数为 56 646,软件和 Interspec 手动寻峰对采集到能谱的寻峰结果如表 2 所示。其中,谱仪软件采用自动寻峰,无需设定感兴趣区域(region of interest, ROI);InterSpec 内置的自动寻峰算法未能寻到任何峰,需要手动指定 ROI 位置和大小寻峰。

为对比评价算法的效果,本文采用平均相对误差和错误拒绝率作为评价指标。在本次测试中,算法的平均相对误差为 0.59%,错误拒绝率为 14.28%,与 InterSpec 手动寻峰相当,远好于 InterSpec 自动寻峰。此外,由于高能区

表 2 软件对<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 平衡源能谱的寻峰拟合效果

<sup>238</sup> U 和 <sup>40</sup> K 谱仪软件识别 峰位/keV	相对 的峰位/keV	误差/%	InterSpec 识别 的峰位/keV	相对 误差/%
185.72	188.05	1.25	188.62	1.56
241.98	241.43	0.23	242.49	0.21
295.21	297.41	0.74	297.37	0.73
351.92	353.55	0.46	353.31	0.40
609.31	607.02	0.38	606.73	0.42
1 120.3	未检出	—	未检出	—
1 460.0	1 452.8	0.49	1 454.0	0.41

统计涨落大,InterSpec 寻峰 ROI 的选取有一定人为因素,算法则避免了这一问题。综上所述,算法能够解决深海原位核探测能谱的自动分析问题。

为测试软件的核素识别效果,使用谱仪软件分别对 CZT 伽马谱仪采集的<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 平衡源和深海岩石样本能谱进行核素识别。其中,<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 源能谱与寻峰拟合测试的能谱相同,深海岩石样本能谱的累积时间为 24 h,总事例数 140 954。



图 11 测试用的深海岩石样本

软件对<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 平衡源的核素识别结果如表 3 所示。测试证明软件能够准确从 CZT 谱仪探测得到的低事例率能谱中识别出放射源中含有的<sup>230</sup>Th/<sup>226</sup>Ra 放射系和<sup>235</sup>U/<sup>231</sup>Th 放射系,以及源于实验室环境中的建筑材料的<sup>40</sup>K。其中,<sup>230</sup>Th/<sup>226</sup>Ra 放射系来自源中<sup>238</sup>U 的衰变。<sup>235</sup>U 放射系源于放射源中的<sup>235</sup>U 同位素的衰变。但算法也出现了由<sup>238</sup>U 谱线导致的<sup>134</sup>Cs 的误识别。

表 3 软件对<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 平衡源能谱的核素识别效果

放射系名称	置信度/%
<sup>40</sup> K	74.6
<sup>230</sup> Th/ <sup>226</sup> Ra( <sup>238</sup> U)	69.0
<sup>235</sup> U/ <sup>231</sup> Th	56.9
<sup>134</sup> Cs	43.8

为对比评价软件核素识别的质量,使用 InterSpec 对手动寻出以上所有峰的该能谱的每个峰进行手动核素识别,结果如表 4 所示。可见 InterSpec 基本无法从能谱中识别

出<sup>230</sup>Th/<sup>226</sup>Ra 放射系,仅正确识别出<sup>40</sup>K。

表 4 InterSpec 对<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 源能谱的核素识别效果

峰位/keV	核素	显著度
188.62	<sup>197</sup> Pt	0.92
242.49	<sup>125</sup> Xe	0.66
297.37	<sup>78</sup> Ga	0.80
353.31	<sup>133</sup> Ba	0.63
606.73	<sup>135</sup> Xe	0.89
1 454.0	<sup>40</sup> K	1.00

软件对深海岩石样本能谱的核素识别结果如表 5 所示。为检验软件对深海岩石样本的核素识别情况,样本在安徽省环保厅采用高纯锗谱仪检测,得到所含的放射性核素结果如表 6 所示。

表 5 软件对深海岩石样本能谱的核素识别效果

放射系名称	置信度/%
<sup>40</sup> K	100.0
<sup>232</sup> Th/ <sup>228</sup> Ra	44.6
<sup>230</sup> Th/ <sup>226</sup> Ra( <sup>238</sup> U)	39.4
<sup>235</sup> U/ <sup>231</sup> Th	24.4

表 6 测试用深海岩石样本含有的放射性元素

核素名称	活度浓度(Bq/g)
<sup>228</sup> Ac	0.261
<sup>234</sup> Th	0.046 5
<sup>214</sup> Bi	0.513
<sup>40</sup> K	0.082 2

表 6 中的<sup>228</sup>Ac 是<sup>232</sup>Th 的衰变产物,<sup>234</sup>Th 和<sup>214</sup>Bi 是<sup>238</sup>U 的衰变产物。在自然界中,放射性元素一般不会单独存在,而是以放射系的形式出现。因此,可认为岩石中含有<sup>232</sup>Th/<sup>228</sup>Ra 和<sup>230</sup>Th/<sup>226</sup>Ra(<sup>238</sup>U)两个放射系。对比可知软件的核素识别算法成功识别到了岩石中含有的放射系和核素。

对比以上结果,可见软件成功给出了两次测试中的所有放射系,且对<sup>238</sup>U-<sup>226</sup>Ra 源中<sup>230</sup>Th/<sup>226</sup>Ra 放射系的识别效果好于 InterSpec。综上所述,软件识别到的放射系基本准确,具有一定的参考价值,但仍存在改进空间。

#### 4 结 论

为解决深海原位核探测谱仪上位机谱仪读出以及数据显示和分析的问题,本文基于.NET 平台和 MVVM 框架设计并实现了深海原位核探测谱仪软件。本文在实验室搭建测试平台,对软件的整体功能和数据分析的准确性进行了测试验证。测试结果表明,软件各功能能够可靠正常运转

行,能够解决深海原位核探测面临的谱仪读出以及数据显示和分析问题,相比现有的软件功能更为全面;软件能够分析 $^{238}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$ 平衡源和深海岩石样品能谱并得到较准确的特征峰和放射系结果,分析效果好于常用分析软件InterSpec。测试结果证实了本文设计的可行性。未来可利用谱仪的海试结果进一步优化软件和能谱分析算法。

### 参考文献

- [1] JONES D G. Development and application of marine gamma-ray measurements: a review [J]. Environ Radioact, Apr. 2001, 53(3): 313-333.
- [2] ADROVIC F. Gamma radiation[M/OL]. 2012-3-21 [2012-3-21]. <https://www.intechopen.com/books/gamma-radiation/environmental-gamma-ray-observation-in-deep-sea>.
- [3] TSABARIS C, ANDROULAKSKI E G, ALEXAKIS S, et al. An in-situ gamma-ray spectrometer for the deep ocean[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2018, 142: 120-127.
- [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] 徐静,王南萍. 基于FPGA和ARM的便携式 $\gamma$ 谱仪研制[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(10): 1020-1023.
- [6] 姚晓雨,庾先国,石睿,等. HPG $\gamma$ 谱仪上位机软件设计[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(1): 68-71.
- [7] ANONYMOUS. Radiation analysis software [J]. NASA Tech Briefs, 2018, 42(6): 50-50.
- [8] 温海标. MVVM模式及其应用研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(24): 92-93.
- [9] 刘珊珊,赵庆,曹豹,等. 基于WPF的油藏模型三维可视化解决方案[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2021, 36(1): 73-79.
- [10] 夏振兴,代伟,赵大勇,等. 桌面机械臂快速控制原型系统设计与开发[J]. 控制工程, 2021, 28(1): 84-92.
- [11] 冯士德. 基于C++/CLI实现托管代码与非托管代码的交互[J]. 微型电脑应用, 2013, 29(1): 38-40, 44.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王茜,田慕琴,宋建成,等. 基于经验小波变换的振动信号特征量提取[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 261-266.
- [16] 刘思玮,杜庆治,龙华,等. 一种基于DWT-DCT-SVD的鲁棒性音频水印算法[J]. 光电子·激光, 2021, 32(9): 1015-1022.
- [17] 樊博,田瑞,金旭荣,等. 基于可调Q因子小波变换的芯片图像去噪研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(12): 106-110.
- [18] 汪雪元,何剑锋,刘琳,等. 小波变换导数法X射线荧光光谱自适应寻峰研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 3930-3935.
- [19] 赵伟文,谢志军,王陈璐,等. 基于分辨率增强算法的质谱重叠峰分峰方法[J]. 质谱学报, 2020, 41(4): 386-392.
- [20] 王继虎,马文彦,翁秀峰,等. 期望最大法用于脉冲 $\gamma$ 射线解谱的理论模拟与分析[J]. 现代应用物理, 2014, 5(3): 169-173.
- [21] 王平波,蔡志明,刘旺锁. 混合高斯概率密度模型参数的期望最大化估计[J]. 声学技术, 2007(3): 498-502.

### 作者简介

李林航,硕士研究生,主要研究方向为核探测与核电子学中的上位机软件读出与数据分析算法等。

E-mail: qq975101@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