

紫外遥感光谱仪地检系统的设计与实现

蒋雪, 侯汉, 马庆军, 林冠宇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为了给紫外遥感光谱仪的研制提供测试环境, 充分测试紫外遥感光谱仪的功能和性能, 基于光谱仪的实际测试需求设计了紫外遥感光谱仪地检系统; 紫外遥感光谱仪地检系统由一块通讯数传板卡、一台高性能计算机和两个地检软件组成, 适用于光谱仪单机、整机、整星等多种研制状态; 硬件方面, 通讯数传板卡选用的 FPGA 芯片是 spartan-6 系列的 XC6SLX25; 软件方面, 两个地检软件分别是异步 422 控制软件和同步 422 快视软件, 均在 QT 平台, 使用 C 语言, 采用多线程的编程思想实现; 异步 422 控制软件不仅可以控制光谱仪执行功能还可以实时监视光谱仪状态; 同步 422 快视软件除提供基础的数据储存解析和显示功能外, 还具有比特位移除判别遥感包、图像伪彩色、时变线、光谱曲线高斯拟合等数据处理功能; 经过多次试验验证, 紫外遥感光谱仪地检系统运行稳定功能齐全, 提高了仪器装调、定标和测试效率。

关键词: 地检系统; 异步 422; 同步 422; 快视; 伪彩色; 高斯拟合

Design and Implementation of Ground Detection System for Ultraviolet Remote Sensing Spectrometer

JIANG Xue, HOU Han, MA Qingjun, LIN Guanyu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to fully test the function and performance of an ultraviolet remote sensing spectrometer, which provides test environment in the development of the ultraviolet remote sensing spectrometer, a ground detection system based on the actual requirement of the spectrometer is realized. The ground detection system consists of a communication data transmission board, a high-performance computer and two sets of software above ground test. This system is suitable for a variety of testing environments to meet various requirements such as single spectrometer, complete spectrometer and whole-spacecraft. In terms of hardware, the FPGA chip selected on the communication data transmission board is XC6SLX25 of spartan-6 series. In terms of software, the asynchronous 422 control software and synchronous 422 data quick view software are achieved by using C language in QT Creator platform. The asynchronous 422 control software can not only control the execution function of the spectrometer, but also monitor the state of the spectrometer in real time. Then the data quick view software not only has the basic data storage and display functions, but also has the data processing functions of discrimination remote sensing package, pseudo color, real line, Gaussian fitting and so on. The test results show that the ground detection system for the ultraviolet remote sensing spectrometer runs stably and has complete functions, which raises the efficiency of instrument installation, calibration and testing.

Keywords: ground detection system; asynchronous 422; synchronous 422; data quick view; pseudo color; Gaussian fitting

0 引言

紫外遥感光谱仪是搭载在风云系列卫星上的探测仪器^[1-3], 通过两个紫外波段和一个可见光波段通道^[4-6], 观测大气臭氧、甲醛、气溶胶等微量气体的分布情况, 获得的光谱信息对于农业、气候、军事等方面的发展具有重要意义^[7-8]。在发射前, 为了在地面能够快速准确地对仪器的性能和功能充分验证, 设计了紫外遥感光谱仪的地面检测系统^[9-10]。地面检测系统内含两个软件: 控制软件和快视软件。控制软件的功能是与光谱仪的成像单机通讯, 控制成像单机工作, 测试成像单机的功能; 快视软件的功能是接

收成像单机或光谱仪整机的遥感数据, 实时存储解析并显示曲线或图像, 实时处理遥感数据, 评价光谱仪的性能。

1 系统结构及原理

紫外遥感光谱仪由成像单机和主控单机这两个单机组成。成像单机内含三个独立的探测通道, 其中一个通道观测可见光波段, 另两个通道观测紫外波段。三个探测通道的电子学设计相同, 并且相互独立, 各自都有独立的通讯通道与主控单机通讯, 也有独立的数传通道向主控单机下传遥感数据。成像单机的探测模式由主控单机控制执行。主控单机可控制成像单机的三个探测通道同时工作或单独

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-11-09。

基金项目: 国家自然科学基金(62005268)。

作者简介: 蒋雪(1992-), 女, 吉林长春人, 硕士, 研究实习员, 主要从事航天遥感仪器电子学设计和图像处理方面的研究。

通讯作者: 林冠宇(1976-), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 主要从事空间紫外遥感仪器方向的研究。

引用格式: 蒋雪, 侯汉, 马庆军, 等. 紫外遥感光谱仪地检系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 90-95.

工作, 并接收其产生的遥感数据^[11]。

主控单与成像单机的探测通道之间采用异步 422 的方式通讯, 主控单机作为主, 向探测通道发送命令帧, 探测通道作为从, 收到命令帧后向主控单机发送返参帧^[12-13]。

如图 1 所示, 成像单机的三个探测通道产生的遥感数据分别通过各自的同步 422 数传接口以 3 Mbps 的码速率发送给主控单机, 主控单机将三个探测通道的遥感数据列队后, 通过一个同步 422 数传接口以 3 Mbps 的码速率发送给卫星数据管理系统, 卫星数据管理系统通过网络将紫外遥感光谱仪的遥感数据发送给地面接收站^[14]。

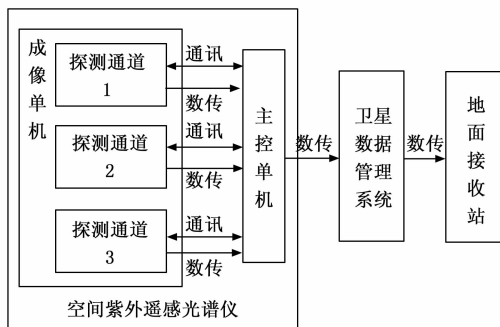


图 1 紫外遥感光谱仪数据流向图

为了在地面测试紫外遥感光谱仪的功能和性能, 设计了地面检测系统^[15]。地面检测系统由异步 422 控制软件、同步 422 快视软件两个软件, 一块自主研发的具有通讯和数传功能的板卡和一台高性能计算机组成, 地面检测系统的结构如图 2 所示。其中, 异步 422 控制软件用于测试光谱仪的功能实现情况; 同步 422 快视软件用于接收解析遥感数据, 检验光谱仪的性能。

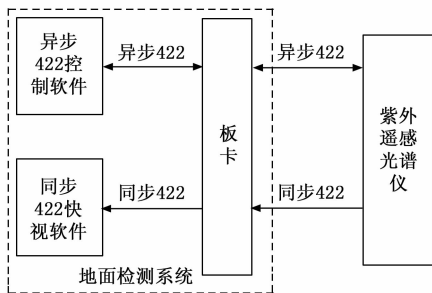


图 2 地面检测系统结构图

2 系统硬件设计

紫外遥感光谱仪地面检测系统在硬件上由一块自主研发的通讯数传板卡和一台高性能计算机组成。通讯数传板卡具有三组异步 422 通讯收发接口和三组同步 422 数据接收接口。三组异步 422 通讯收发接口, 用于分别与成像单机的三个探测通道通讯; 三组同步 422 数据接收接口, 用于分别接收成像单机的三个探测通道产生的遥感数据。每路异步 422 通讯接口需要一根数据接收线和一根数据发送线。每路同步 422 数据接收接口需要一根数据接收线和一根时

钟接收线。由于同步数传接口只用于下传光谱仪的遥感数据, 所以只需要接收接口不需要发送接口^[15-16]。板卡与光谱仪通过一根 SCSI-68 转 J14A-26ZJB 的转接线连接。通讯数传板卡的原理如图 3 所示。

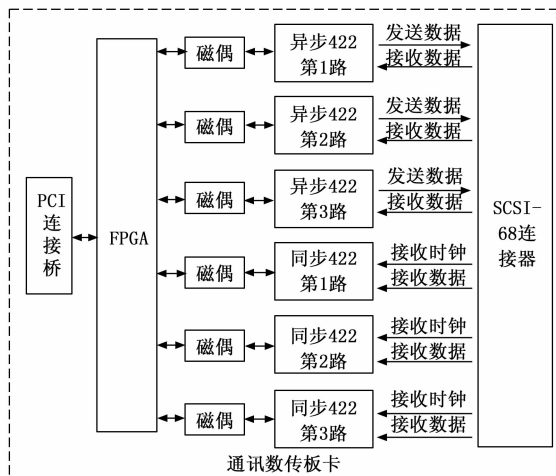


图 3 通讯数传板卡原理图

通讯数传板卡在设计时使用了隔离电源。使用的 PCI 接口总线为 32 bit/33 MHz 总线。选用的差动线路接收器是四路的 AM26C32, 选用的是差动线路驱动器是四路的 AM26C31, 用于同步和异步 422 电平转换。选用的 FPGA 是 spartan-6 系列的 XC6SLX25, 主频率为 50 MHz。最终实现的板卡的单通道码速率最高可支持 10 Mbps, 满足了同步 422 数传要求的 3 Mbps 码速率, 也满足了异步 422 通讯要求的 115 200 bps 波特率需求。此外, 异步 422 的波特率可配置, 支持常用波特率, 并且具有波特率微调功能; 数据位、停止位、奇偶校验位均可配置。同步 422 可接收的时钟信号的占空比为 0.45~0.55, 时钟上升沿对齐码字跳变沿, 有数据时有时钟, 无数据时无时钟, 时钟信号为低电平。

3 系统软件设计

紫外遥感光谱仪地面检测系统在软件上由异步 422 控制软件和同步 422 快视软件组成。两个软件均是在 QT 平台使用 C 语言开发, 基于多线程的思想实现^[17-18]。

3.1 异步 422 控制软件

异步 422 控制软件的主要功能是, 模仿主控单与成像单机的探测通道通讯, 向探测通道发送命令帧, 接收存储解析探测通道发送的返参帧, 判断通讯状态, 并对返参帧中的重要参数实时绘制曲线。

由于光谱仪成像单机的探测通道有三个, 为满足三个探测通道同时或单独工作的多种情况的测试, 异步 422 控制软件可以通过在界面配置, 同时与三个或其中任意两个或一个探测通道通讯。成像单与主控单之间的异步 422 通讯帧有两种类型: 周期参数帧和即时命令帧。周期参数帧的通讯周期为 500 ms, 用于循环给探测通道更新时间、轨道等信息, 同时主控单可通过返参帧持续获取探测通

道当前的电压、电流、温度等状态。即时命令帧的作用是控制探测通道执行成像开始、成像停止、制冷等功能。控制软件的通讯时序如图 4 所示。所有要送给探测通道的周期参数帧或即时命令帧的内容，均在异步 422 控制软件的界面可输入^[19]。

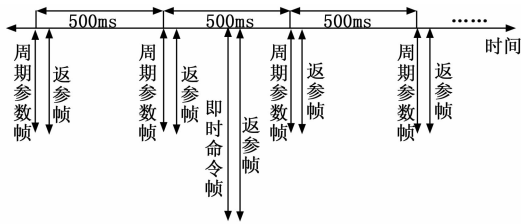


图 4 控制软件通讯时序图

为了在使用过程中，方便快捷地判断通讯帧的发送和接收情况，软件界面实时显示正在发送和接收的通讯帧，并且实时判断返参帧的完整性，实时解析显示返参帧中的发送状态，以便及时判读通讯帧的发送和接收情况，对通讯状态异常的通讯帧及时分析处理^[20]。

返参帧内包含了探测头部的状态参数：数字 5 V 电压、模拟 5 V 电压、探测器温度、制冷电流、制冷电压等。异步 422 控制软件通过周期帧，持续获得探测头部的状态，并对这些状态参数实时绘制曲线，观察三个探测通道的状态变化情况。

在光谱仪研制过程中，为了便于复查问题，异步 422 控制软件自动储存已发送和已接收的通讯帧原码，并对返参帧中的重要参数解析存储，提供数据分析效率。为了保证异步 422 控制软件运行稳定、数据存储可靠，软件在设计时，使用了两个线程：数据存储线程和数据处理线程，并且数据存储线程的优先级高于数据处理线程^[21]。

3.2 同步 422 快视软件

同步 422 快视软件主要功能是接收存储并实时处理光谱仪的遥感数据，实时显示光谱曲线或图像。为了保证快视软件在处理数据时运行流畅，数据存储准确可靠不丢失，设计时软件通过三个线程实现：数据存储线程、界面显示线程和数据处理线程。其中，数据存储线程优先级最高。数据存储线程主要实现的是对数据的接收和存储，为了使快视软件适用于光谱仪内部的单机间、光谱仪与卫星数管之间、卫星数管与地面接收站之间，快视软件设计了同步 422 接口接收功能和网络接口接收功能。当使用同步 422 快视软件直接接收三个探测通道的遥感数据时，由于每个通道的数据传输速率为 3 Mbps，当三个通道的遥感数据同时下传时，传输瞬时速率将达到 9 Mbps，单独使用一个线程实现数据的接收和存储，可以保证遥感数据接收的可靠性。界面显示线程主要实现的是将遥感包中的包序号、时间、位置等参数信息显示到界面的辅助数据列表控件中，将遥感包中的光谱信息绘制成曲线显示到界面或将遥感包中的图像信息绘制成图像显示到界面。同步 422 快视软件还对遥感数据进行了处理，伪彩色、位段、拉伸、暗背景去除、

时变线、行曲线、列曲线、高斯拟合等等，数据处理线程的功能就是对遥感包中的数据进行上述处理。同步 422 快视软件对于上述功能的执行流程如图 5 所示。其中，虚线框是需通过软件界面选择才执行的功能，实线框是快视软件启动后一定会执行的功能。

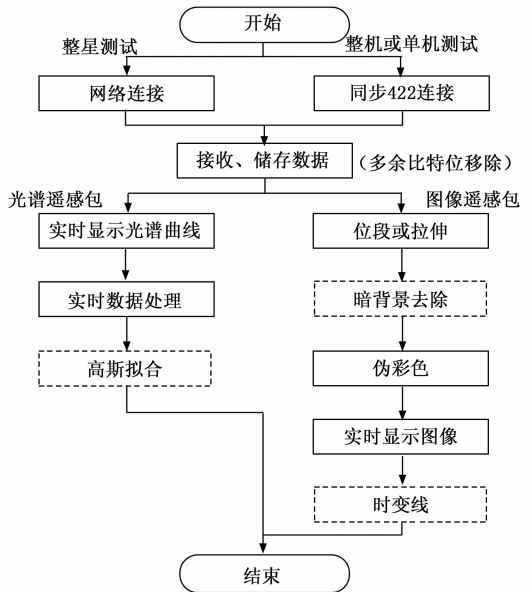


图 5 快视软件实现流程图

3.2.1 网络接口接收

为了能够在地面整星测试和在轨时从卫星数管接收遥感数据，同步 422 快视软件除可以从同步 422 接口接收数据外，还设计了网络接口接收功能。通过与服务器之间建立应答形式的连接，接收经卫星数管下传的遥感数据。服务器 IP 地址、客户端 IP 地址和端口号，均可通过配置文件配置。

快视软件与服务器的通信流程如图 6 所示。

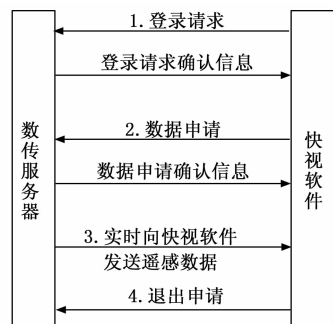


图 6 网络连接通信流程

首先，快视软件向数传服务器发送登录请求。然后，数传服务器向快视软件返回确认信息。然后，快视软件向数传服务器发送数据申请请求，数传服务器向快视软件发送数据申请确认信息。此时，快视软件成功与数传服务器建立了连接，当数传服务器有遥感数据时，实时向快视软件发送遥感数据，快视软件实时接收存储解析显示。最后，当快视软件想结束网络接收时，向数传服务器发送退出申请，然后，退出即可。

3.2.2 自动移除多余比特位

光谱仪的遥感数据传输采样的是同步 422 的方式。在谱仪上下电时, 由于电压的变化, 这种传输方式可能会导致软件识别到多余的数据, 这些数据并非是遥感包的内容, 并且这种数据的值完全随机, 会以比特的形式产生。即使是快视软件的网络接口接收, 由于数据在光谱仪内部和光谱仪与卫星数管之间仍然是由同步 422 方式传输的。所以, 网络接口接收时, 这种多余比特数据的情况也仍然存在。快视软件设计时, 对于从同步 422 接口或网络接口接收的数据, 均具有自动去除多余比特数据, 准确识别遥感包的功能。

紫外遥感光谱仪的遥感包有两种格式: 光谱数据遥感包和图像数据遥感包。每种遥感包的格式不完全相同, 但具有相同的基本格式, 如表 1 所示。

表 1 遥感包格式

序号	项目	内容
1	包头	包标识、包计数等
2	辅助数据同步头	固定值
3	辅助数据	时间、温度等
4	科学数据同步头	固定值
5	科学数据	图像或曲线数据
6	遥感包结束标识	固定值
7	校验和	校验和

快视软件在接收遥感数据的过程中, 将接收到的数据按照比特移位, 判断其是否为遥感包的包标识。当科学数据或辅助数据中出现与包标识相同的数据, 快视软件为避免将其误判为遥感包的包标识, 识别时将以辅助数据同步头、科学数据同步头、遥感包结束标识为标志字, 成段缓存遥感数据, 多个标志字联合判定, 即, 当指定长度数据后的数据为辅助数据同步头或科学数据同步头或遥感包结束标识, 才确认为一个完整遥感包, 然后再对遥感数据解析处理。

紫外遥感光谱仪内含三个探测通道, 每个通道都会产生上述两种格式的遥感包, 为了区分探测通道与包类型, 六种遥感包的包标识均不同, 快视软件可根据遥感包的包标识判别遥感包所属通道和类型, 用于界面指定位置显示和解析。6 种遥感包的包标识如表 2 所示。

光谱仪的探测模式有两种: 光谱模式和图像模式。光谱模式时, 探测通道每拍摄一幅图像将下传一个光谱数据遥感包。每个光谱数据遥感包内包含拍摄时刻的状态参数和将图像合并后的光谱数据, 可绘制一条光谱曲线; 图像模式时, 探测通道每拍摄一幅图像, 将下传 N 个图像数据遥感包, 每个图像数据遥感包内包含拍摄时刻的状态参数和图像的一行数据。拍摄一幅行数为 N 的图像, 将产生 N 个图像数据遥感包, 提取每个图像数据遥感包中的图像数据可绘制一幅行数为 N 的图像。紫外遥感光谱仪使用的探测器像面的大小是 2048×2048 , 由于光路上不同挡光板的狭缝不同, 光源在探测器上成像的大小和位置也不同, 为

了节省数据量, 图像在下传时, 只下传被照射到的位置上的有效图像数据。具体的成像位置和区域大小均可以通过异步 422 控制软件控制。图像行数最多是 2048, 例如此时拍摄一幅图像, 探测通道将按序下传第 1 行至第 2048 行图像的图像数据遥感包, 2048 个遥感包内的图像数据可绘制成一幅行数为 2048 的完整图像。

表 2 遥感包类型

序号	探测通道号	包类型	包标识
1	探测通道 1	光谱数据遥感包	A1A1A1
2	探测通道 2		B2B2B2
3	探测通道 3		C3C3C3
4	探测通道 1	图像数据遥感包	D4D4D4
5	探测通道 2		E5E5E5
6	探测通道 3		F6F6F6

3.2.3 光谱数据实时处理

快视软件接收光谱数据遥感包时, 将遥感包内的光谱数据提取出来, 绘制成曲线显示在界面中。为了便于及时判读出光谱的响应情况, 快视软件对光谱数据进行了实时处理, 显示当前光谱曲线的平均值、标准偏差、强度最大值、强度最小值。

平均值公式:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

其中: x_i 为光谱数据, i 为光谱数据个数。

标准偏差公式:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

其中: \bar{x} 为光谱数据平均值。

计算强度最大值和强度最小值采用的是循环比较法。快视软件在接收数据时, 将需要显示到界面上的光谱数据另存一个数组, 显示时提取此数组内的数据绘制曲线。所以, 此数组即对应当前界面显示的光谱曲线, 实时数据处理也是访问该数组, 对数组里面的数据进行计算, 实现了对光谱数据的实时处理。

3.2.4 光谱曲线高斯拟合

在分析光谱数据时, 需要对光谱曲线高斯拟合, 传统方式是将光谱数据提取出来, 用 Matlab 对其进行高斯拟合。为提高数据分析的效率, 快视软件设计了高斯拟合功能, 一次光谱数据接收完成后, 可直接选择对其进行高斯拟合, 大大节省了数据处理的时间。通过软件界面选择要进行高斯拟合的曲线, 选择曲线中要进行拟合的曲线段, 快视软件将此段数据保存至数组, 对其进行高斯拟合计算。

高斯拟合公式:

$$y = X_1 + X_2 \times I^{-1/2(a - X_3/X_4)^2} \quad (3)$$

其中: X_1, X_2, X_3, X_4 是拟合参数。拟合后还需计算曲线的特征参数: 中心波长和半高宽。中心波长即为参数 X_3 , 半高宽即为 $2\sqrt{2\ln 2}X_4$ 。为了更直观地观察拟合效果, 快视

软件将原始光谱曲线和拟合后的曲线显示在同一坐标系中，如图 7 所示。

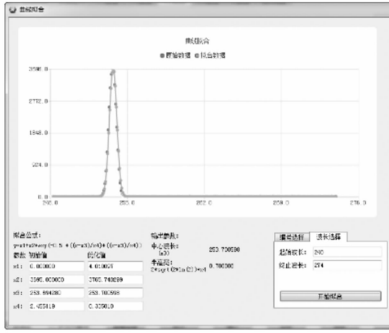


图 7 高斯拟合曲线图

3.2.5 图像暗背景去除

由于探测器本身具有一定噪声，在研制过程中为了可以更准确地观察标准光源的响应，想要将拍摄标准光源得到的图像去除掉探测器本身的影响。光谱仪在无光情况下拍摄，即可得到探测器本身的噪声响应。将标准光源下得到的图像与暗背景下得到的图像相减，即可实现对图像暗背景去除。为了保证暗背景去除的可靠性，实际是在无光情况下，拍摄多帧，快视软件将对这多帧图像在相同位置上的像素值取平均，最终得到一帧图像数据，即为暗背景图像，并将其缓存。后续对于需要进行暗背景去除的图像，可以选择将其与事先计算好的暗背景图像做差，即可得到去除暗背景的图像。暗背景图像可以通过实时拍摄获取，也可通过回放以往数据获取，设置灵活，适用于使用同一暗背景的对比试验，也适用于去除当前环境暗背景的试验。

3.2.6 图像伪彩色映射

紫外遥感光谱仪使用的探测器是 14 位比特量化，快视软件将每个像元按照像素值采用位段或拉伸的方式显示出来，显示出的图像是黑白的。为了更加直观高效地判读图像的细节，提高装调和定标的效率，快视软件设计了图像伪彩色功能，将黑白图像实时映射成彩色的。伪彩色映射效果有：gray、pink、hot、hsv、jet 等，默认为 gray 项，即原始的灰度图。每种映射效果都对应一种计算方法，将原始的像素值通过计算映射到一个指定的 RGB 颜色，然后显示出来。同一幅图像在各种映射效果下的图像如图 8 所示，可见图像在不同映射下的边缘或峰值效果相比灰度图更明显。

3.2.7 时变线

在测试过程中，受位置、光源、温度等因素的影响，图像会有微小的变化，为了定量的观察图像某一行、某一列或某一点的微小变化情况，通常需要对一段时间内的像素值对比分析。因此，快视软件设计了时变线的功能，可以实时绘制某一行、某一列的曲线，或者对某一点绘制其随时间变化的曲线。在拍摄多帧的情况下，通过某一行的行曲线、某一列的列曲线或某点的时变线，可以很容易地观察到该行或列或点随位置或温度等的微小变化情况，对分析图像具有重要意义。

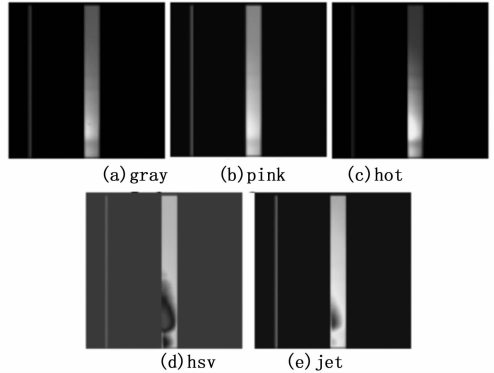


图 8 图像伪彩色效果图

4 实验结果与分析

在成像单机的装调、定标和热真空等环境实验中，使用地检系统的异步 422 控制软件控制成像单机工作，同步 422 快视软件接收成像单机三个探测通道的探测数据，并实时储存解析处理显示，测试环境原理如图 9 所示。

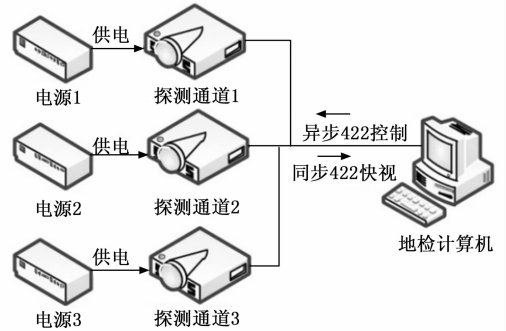


图 9 成像单机测试环境原理图

在光谱仪整机环境实验中，使用地检系统的同步 422 快视软件接收电控单机输出的遥感数据，并对数据实时存储解析和显示，测试环境原理如图 10 所示。

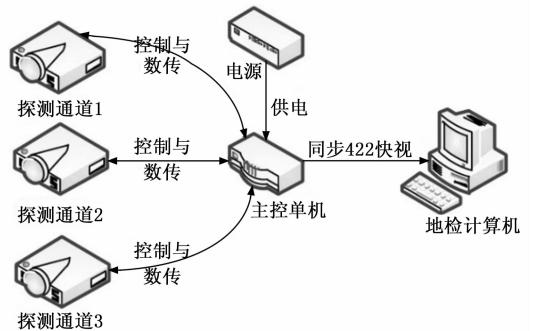


图 10 整机测试环境原理图

在整星实验中，使用地检系统的同步 422 快视软件接收卫星数管平台通过网络下发的遥感数据，测试环境原理如图 11 所示。

在上述三种环境的测试中，异步 422 控制软件和同步 422 快视软件均运行稳定流畅不卡顿。多次大型环境实验和整星测试可以验证，异步 422 控制软件可以有效的执行对

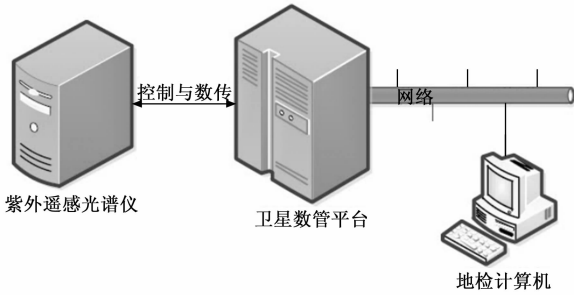


图 11 整星测试环境原理图

探测通道的控制功能, 并且对重要参数实时绘制曲线; 同步 422 快视软件, 网络接口和同步 422 接口都可以稳定地接收识别遥感数据并存储, 并且可以实时解析和显示, 并对数据进行数据处理, 整星测试时快视软件解析的光谱曲线和图像如图 12 和图 13 所示。

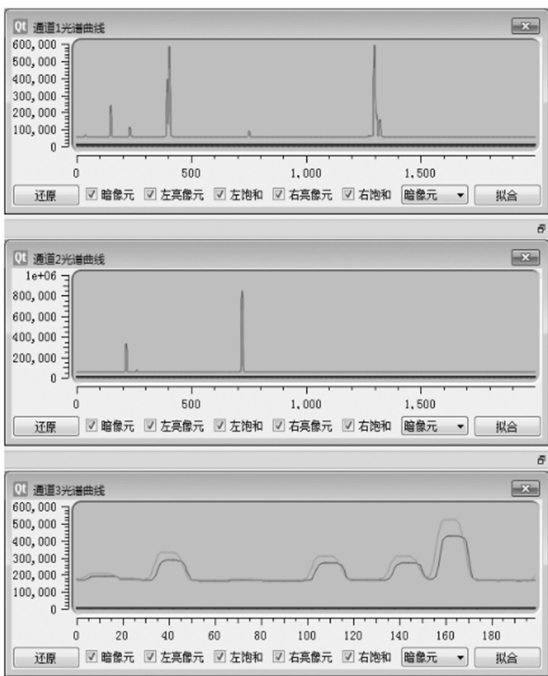


图 12 整星测试光谱曲线

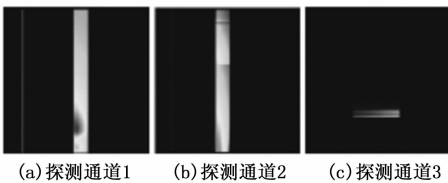


图 13 整星测试图像

5 结束语

紫外遥感光谱仪地检系统对紫外遥感光谱仪的研制和检验具有重要作用。紫外遥感光谱仪地检子系统的设计适用于实际需求的多种测试条件, 满足对光谱仪单机、整机、整星的测试要求。通过多次试验可以验证, 紫外遥感光谱仪地检系统运行稳定流畅, 不仅具有数据实时接收存储解

析显示的功能, 还可对数据进行高斯拟合、伪彩色处理、暗背景去除、实时绘制时变线, 对提高光谱仪的研制效率起到重要作用。

参考文献:

- [1] 薛庆生, 王淑荣, 李福田. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪 [J]. 光学精密工程, 2010, 18 (4): 823-830.
- [2] 杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 大气-真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究 [J]. 光学学报, 2012, 32 (1): 30-35.
- [3] 吴伟平, 闫得杰, 孙天宇, 等. 紫外臭氧廓线探测仪快视系统的设计与实现 [J]. 力学季刊, 2015, 23 (6): 2220-2222.
- [4] 于向阳, 王淑荣, 黄煜, 等. 地球临边/天底同时探测的紫外环形成像仪 [J]. 光学学报, 2012, 32 (12): 153-159.
- [5] 夏巧桥, 胡正文, 张青林. 遥感相机快视高速可靠传输系统的设计与实现 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (4): 971-979.
- [6] 赵静文. 遥感卫星地面接收系统总体设计探讨 [J]. 现代雷达, 2004, 26 (7): 14-16.
- [7] 远远, 陈雷霆. 异步多通道 CCD 图像实时快视技术研究 [J]. 微计算机信息, 2009, 25 (4): 114-115.
- [8] 夏巧桥, 汪鼎文, 张立国, 等. 高速多通道遥感相机快视系统的实现 [J]. 光学精密工程, 2013, 21 (1): 158-166.
- [9] 王雪, 宋克非. 广角极光电成像仪图像采集与快显多功能检测系统 [J]. 液晶与显示, 2014, 29 (4): 637-643.
- [10] 陈涛, 赵金字, 贾建禄. 基于 FT600 的 USB3.0 接口设计 [J]. 液晶与显示, 2018, 33 (1): 61-66.
- [11] 吴伟平, 金龙旭, 王栋, 等. 基于命令集的空间光学遥感器功率特性分析方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43 (5): 1549-1554.
- [12] 薛盼盼, 王晓东, 曲洪丰. 极紫外光子计数成像仪图像快显系统设计与实现 [J]. 激光与红外, 2011, 41 (12): 1378-1382.
- [13] 王岩, 杨小虎, 王金玲, 等. 空间遥感光谱仪器光学性能地面检测系统 [J]. 液晶与显示, 2017, 32 (3): 206-212.
- [14] 胡君, 王栋. 空间相机地面实时动态集成测试技术 [J]. 光学精密工程, 2011, 19 (9): 2177-2185.
- [15] 胡君, 王栋, 孙天宇. 现代航天光学成像遥感器的应用与发展 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3 (6): 519-533.
- [16] 何玲平, 尼启良, 李敏, 等. 楔条形阳极光子计数探测器成像性能的检测 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (11): 2699-2704.
- [17] 王德江, 匡海鹏, 周刚, 等. 一种红外探测器的图像采集系统 [J]. 液晶与显示, 2009, 24 (3): 429-432.
- [18] 王永成, 王金玲, 宋克非. 月基极紫外相机图像采集与实时显示系统 [J]. 液晶与显示, 2013, 28 (3): 435-439.
- [19] 崔春雷, 冯建, 李锋. 基于叠加级联长周期光纤光栅的温度和应变传感的理论分析 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 280-285.
- [20] 郭小焯, 王洋. 基于 STM32 的手持式气体检测仪 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 265-271.
- [21] 王加朋, 王淑荣, 徐领娣, 等. 紫外辐射计的波长定标及不确定度分析 [J]. 光电工程, 2008, 35 (6): 42-47.