

文章编号:1007-2780(2017)05-0387-07

星载紫外环形光谱仪科学数据处理的设计与实现

吴伟平,孙海江*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:为将环形光谱仪下传的原始数据快速转换为待反演的亮度数据,建立了紫外环形光谱仪科学数据处理系统。采用文档-视图的数据流架构,保证数据流之间的无干扰处理;采用暗像素均值对探测器噪声进行校正;采用比例法将像元响应换算为标准积分时间和增益条件下的响应值;采用无须通道光谱响应函数满足高斯函数的光谱积分法将像元响应换算为亮度,并提供指定区域的相对标准偏差统计作为图像转换正确性的快速判据。实验结果表明:系统在测试环境中用 352 s 时间内流畅处理了环形光谱仪在 987 s 内产生的 2.19 GB 图像数据,生成 4.96 GB 亮度数据,亮度换算后精度为 10^{-7} lm。系统为卫星运控中心与用户之间提供了快速、准确的数据接口链路,保证了数据反演的准确性和实效性。

关键词:紫外光谱;光谱积分法;暗噪声;环形光谱仪;数据处理

中图分类号:TH73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173205.0387

Design and realization of data processing of satellite-borne ultraviolet annular imager

WU Wei-ping, SUN Hai-jiang*

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

Abstract: In order to convert the original data of the ultraviolet annular imager to the brightness data quickly, the ultraviolet data processing system of the ultraviolet annular imager is established. The system adopts the document view architecture to process the data-flow to ensure no interference between data channels. The noise of detector is corrected by the mean value of dark pixels, and the proportion method is used for converting the pixel values under the standard integral time and gain conditions; the pixel values are converted to luminance brightness with the spectral integral method without restriction that the channel spectral response function must meet Gaussian function, and provide the relative standard deviation statistics of the specified region as a rapid judgment of image conversion. The experimental results show that, only in 352 s, the system can process the 2.19 GB image data product by ultraviolet annular imager in 987 s with our test conditions, and convert 4.96 GB brightness data with the precision of 10^{-7} lm. The system can provide the standard lines with pixel level precision alignment, and can extract the standard spectral line. The system provides a fast and

收稿日期:2016-11-16;修订日期:2017-01-02.

* 通信联系人, E-mail: shunhaijiang@126.com

accurate data link interface between the satellite and the user, which ensures the accuracy and effectiveness of the data retrieval.

Key words: ultraviolet spectrum; method of spectrum integral; dark noise; ultraviolet annular imager; data process

1 引言

紫外环形光谱仪通过 3 个通道的同心光学系统、分光棱镜和滤光片,分别将 265 nm、295 nm 和 360 nm 为中心波长的地球临边大气散射光谱辐射成像在 3 片 1 024×1 024 像元的制冷 CCD 上,以获取反演大气中臭氧、二氧化氮等气体垂直分布的信息^[1-2]。为了将卫星下传的环形光谱仪原始数据提供给用户进行大气数据反演,作为光谱仪的研制方需研究对原始数据进行噪声去除、积分时间和增益的标准化、亮度换算等后期处理方法,为用户提供包含上述功能的、快速、准确、友好的数据处理系统,满足用户快速获取待反演数据的任务需求^[3-4]。

根据紫外环形光谱仪下传数据的格式特点,结合环形光谱仪数据的定标结果和修正要求,本

文通过研究其数据解包过程和后续处理方法,设计并实现了星载紫外环形光谱仪的科学数据处理系统,为卫星运控中心与用户之间提供了快速、准确的数据接口链路。

2 科学数据处理原理

2.1 环形原始数据格式

环形成像仪下传的数据包括图像数据和辅助数据,每种数据由多个数据帧连续构成。每个辅助数据的数据帧按顺序依次对应图像数据中的一个数据帧。一个图像数据帧中包括 765 个环形图像数据包,一个辅助数据帧包括 1 个环形辅助数据包。辅助数据包中主要包括探测器成像时的积分时间、增益、卫星姿态、卫星速度、时间码、光谱仪温度等信息,图像数据包中主要包括有效图像数据信息、包标示和包计数等信息,其格式如图 1 所示。

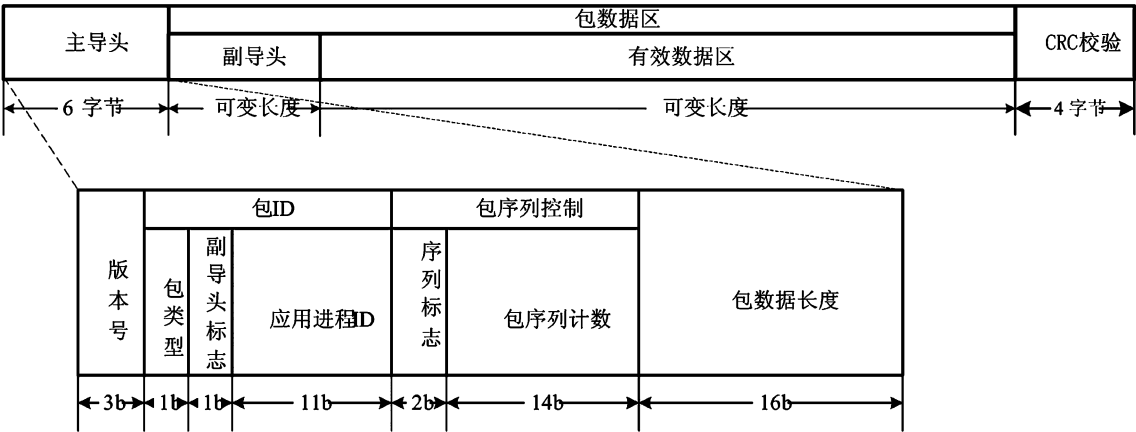


图 1 环形光谱仪数据包格式
Fig.1 Data package format of annular imager

为了节约卫星带宽,光谱仪对图像数据采取了无效区域裁剪和字节密集存储的方式减小下传的数据量。无效区域裁剪是指在光谱仪成像的视场中,只保留用户关心的有效观测区域,将有效观测区域的数据进行组包下传而将其余无效区域的数据丢弃的处理方式。环形光谱仪的有效观测区

域为天底大气区域和临边大气区域,如图 2 中左图的阴影区所示区域,中心的正方形阴影区域为天底大气观测区域,四周的矩形阴影区域为地球临边大气区域,正方形 ABCD 为视场区域。因此将有效数据区域其确定为如图 2 中右图所示的白色区域,而右图中黑色区域的数据将被丢弃。

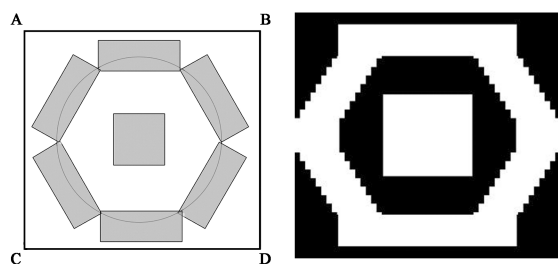


图2 环形有效视场及裁剪区域示意图

Fig.2 Scheme of valid field and clipping field

字节密集存储方式是指采用移位存储的方式避免存储中 bit 位的浪费。由于环形光谱仪所采用探测器的量化位数为 14 bits,如果采用传统的存储方式需要 1 个字的长度,并在字的高 2 位补 0;而采用密集存储的方式,能够将第一个像素存储在第一个字的高 14 bits 中,将第二个像素的高 2 bits 存储在第一个字的第 2 bits,第二个像素的其余 12 bits 存储在第二个字的高 12 bits,以此类推如图 3 所示。通过密集存储的方式能够将 8 个像素存储在 7 个字中,节约 12.5% 的带宽。

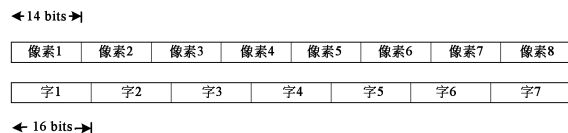


图3 密集存储方式示意图

Fig.3 Scheme of dense storage

2.2 科学数据处理的方式

科学数据处理系统采用高性能处理工作站将环形光谱仪下传的原始数据包处理成反演所需的亮度信息。系统首先对获得的图像数据包和辅助数据包进行校验,保证数据的完整性;将 3 个通道的图像包和辅助包对应起来,去掉主导头、副导头等传输控制信息,将图像数据由密集存储方式转换为传统存储方式,填充到图像显示缓冲区中并实时显示出来。然后,通过探测器边缘暗像元的信号响应来估计整个探测器的暗噪声和 Smear 水平,从而采用图像处理的方法去除探测器的主要噪声;根据光谱仪探测时所采用的积分时间和增益,将探测器响应值换算为标准积分时间和标准增益下的响应值;通过地面标定获得的光谱仪标定矩阵将信号值换算成为亮度信号,为反演提供数据输入。

为了使用户能够清晰地分析所处理的数据,科学数据处理系统对处理过程中的每个过程都提供实时显示和数据导出功能,使用户能够准确定量地进行数据分析。这些高实时性地处理要求也对系统设计提出了更高的要求,需要系统在完成功能性需求的同时采用高效地数据处理方法,以满足用户的数据处理需求。

3 科学数据处理系统的设计

3.1 总体结构设计

科学数据处理系统采用 Doc-View 的架构实现数据流的处理^[5],如图 4 所示。环形光谱仪 3 个波段的图像数据包和辅助数据包都由 CFrame 框架类读入,进行先期的数据校验,验证数据的正确性;然后,根据数据包的主导头和辅导头,将有效数据区的数据分发到对应的 265 nm、295 nm、360 nm 的 CDoc 类中。

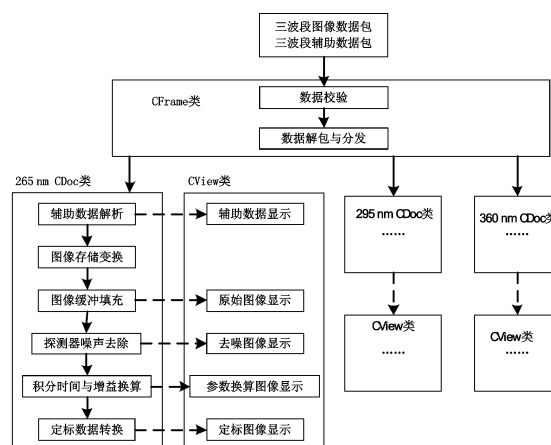


图4 数据处理系统的结构设计

Fig.4 Design of data process system scheme

针对不同波段的 CDoc 类是同一个类的不同对象,它们具有完全相同的实现方式。CDoc 类主要负责数据的处理,CView 类可根据用户的选择决定对哪一步骤的处理数据进行实时显示,并对图像进行何种标准线的绘制和计算。各波段独立处理的架构保证了各数据流处理的独立性,增加了对不同数据包处理的可靠性。

3.2 数据处理中的关键技术

3.2.1 探测器噪声的去除和参数换算方法

环形光谱仪采用行转移式的 CCD 作为探测元件,其主要的噪声包括背景暗噪声和 smear 噪

声。由于环形光谱仪所采用的 CCD 在行方向上的像元具有相似的读出电路和暗噪声,因此在原始图像缓冲区中,对图像中每行边缘的暗像素进行算术平均,求出每行数据所对应的暗噪声响应。然后,对全部有效数据区中的像素,减去其所在行的暗噪声响应得到暗噪声修正后的像元响应值。去除探测器的 Smear 噪声有多种不同的方法^[6-8],对于环形光谱仪所采用的行转移式 CCD 而言,相同列像元具有程度相似的 Smear 现象,该 CCD 的非曝光区具有 3 行暗参考像元区域,此 3 行暗参考信号的均值能够反映当前图像中发生 Smear 现象,因此可以用 CCD 的像元响应减去 Smear 均值来去除 Smear 噪声^[9]。

由于积分时间、增益与入瞳处接收的光辐射成线性关系,因此将像元响应去除噪声的影响后,可以通过比例关系可以将不同积分时间和增益下的像元响应换算成为标准积分时间和增益下的像元响应。

3.2.2 亮度换算方法

为了将探测器输出的像元响应值换算为光谱仪探测区域的辐射亮度值,科学数据处理系统以实验中标定的通道光谱响应函数为准,通过积分将像元响应换算为亮度,该方法不采用高斯拟合获取光谱响应函数,而直接使用各波长的实验标定值,因此在通道光谱响应函数不符合高斯分布的情况下更具有理论优势。但所有波长都通过文件读入并参与计算,增加了数据处理系统的计算量 and 处理难度。

设 S_c 为定标时的像元响应, S_c 为实际探测时的像元响应, $L_c(\lambda)$ 为定标时积分球光谱辐亮度, $L_m(\lambda)$ 为实际探测时外界未知光谱辐亮度, $R_a(\lambda)$ 为通道绝对光谱响应函数, λ_1 为通道光谱下限, λ_2 为通道光谱上限。则定标中像元响应满足公式(1),而实际探测时的像元响应满足公式(2):

$$S_c = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_c(\lambda) \times R_a(\lambda) \times d\lambda, \quad (1)$$

$$S_m = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_m(\lambda) \times R_a(\lambda) \times d\lambda, \quad (2)$$

其中:;通道绝对光谱响应函数 $R_a(\lambda) = c_1 \times R_r(\lambda)$, 外界未知光谱辐亮度 $L_m(\lambda) = c_2 \times L_R(\lambda)$, 其中 c_1 为通过辐射定标给定的常数, $R_r(\lambda)$ 为通

过光谱定标给定的通道相对光谱响应函数,即归一化的通道光谱响应, c_2 为待求解常数, $L_R(\lambda)$ 为实际探测时外界未知相对光谱辐亮度,由经验值给出。

将 $R_a(\lambda)$ 代入公式(1)中,可得:

$$c_1 = \frac{S_c}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_c(\lambda) \times R_r(\lambda) \times d\lambda}, \quad (3)$$

将 $R_a(\lambda)$ 与 $L_m(\lambda)$ 代入公式(2)中,可得:

$$S_m = c_1 \times c_2 \times \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_R(\lambda) \times R_r(\lambda) \times d\lambda, \quad (4)$$

则:

$$c_2 = \frac{S_m}{c_1 \times \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_R(\lambda) \times R_r(\lambda) \times d\lambda}, \quad (5)$$

将式(3)及式(5)代入 $L_m(\lambda)$ 表达式中即可得到外界未知光谱辐亮度值,如公式(6)所示:

$$L_m(\lambda) = \frac{S_m \times \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_c(\lambda) \times R_r(\lambda) \times d\lambda}{S_c \times \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L_R(\lambda) \times R_r(\lambda) \times d\lambda} L_R(\lambda), \quad (6)$$

其中的积分运算采用累加求和实现,如公式(7)所示:

$$L_m(\lambda) = \frac{S_m \times \sum_{\lambda_2}^{\lambda_1} (L_c(\lambda) \times R_r(\lambda))}{S_c \times \sum_{\lambda_2}^{\lambda_1} (L_R(\lambda) \times R_r(\lambda))} L_R(\lambda), \quad (7)$$

其中:每个通道的波长间隔 $\lambda_2 - \lambda_1$ 均为 41 nm, 3 个通道的波长间隔共计 123 nm。每个波长对应 $L_m(\lambda)$ 、 $R_a(\lambda)$ 、 $L_R(\lambda)$ 三个 $1\,024 \times 1\,024$ 的参数表。通过参数预先求解和掩码的方式降低存储量和计算量。

公式(7)中的参数除了 S_m 以外均可在数据处理前预先获得,但为保证计算精度,处理系统不对除法进行预选求解,并且分子以 10^{-7} lm 为单位进行求解,保证反演数据的精度。选取图像中心面积为 100 像素的区域,通过计算区域内数据相对

标准偏差(Relative Standard Deviation,简称RSD)的变化,分析各处理过程中数据的有效性。如图5所示,可以看到暗噪声与Smear现象的发生源于电子学器件本身的特点,而与探测器接收的光辐射无关。因此,当去除暗噪声和Smear现象后,数据的相对标准偏差发生了较大的变化,其中暗噪声对数据的影响最大,Smear现象在亮度比较均匀的情况下表现并不突出。而积分时间、增益和亮度换算均不改变数据与探测器接收光辐射的对应关系。因此,可以看到图像经过积分时间、增益和亮度换算后,其相对标准偏差几乎没有变化。

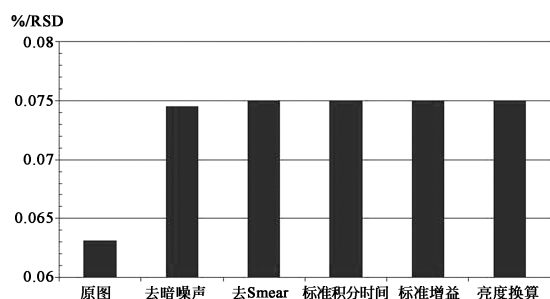


图5 处理过程的图像中心区域相对标准偏差比较

Fig.5 Comparison of the relative standard deviation of the image center area in the process of processing

在环形光谱仪的数据处理过程中涉及到大量地参数输入工作,并且随着卫星在轨运行和在轨标定工作的进行,数据处理的参数会经常发生变化。一旦发生参数的输入错误,后期的处理将很难发现和及时的修正。本系统提供了数据有效区的相对标准偏差验证方式,直观地表示了处理过程中的数据特点,为保证数据正确性提供了直观、快速、有效的方式。

4 数据处理实验及结果

为了定量地反映数据处理系统的数据处理性能,在表1所示环境下对环形3个通道的共计2.19 GB图像和辅助数据进行处理,导出最终的亮度数据,并在处理过程中实时地显示图像、解析的辅助数据、标准线和标准谱线^[10]。其中图像数据文件3个,每个750 MB,辅助数据文件3个,每个116 KB。

表1 测试环境参数

Tab.1 Parameters of test environment

项目	CPU	内存	硬盘	操作系统
参数	Inter I5 3.2 GHz	4GB DDR3	希捷 2T 7 200 转	Win7 64 位

环形光谱仪科学数据处理系统将三通道的图像与辅助数据处理为亮度数据共耗时352 s,通过辅助数据的解析,可知环形光谱仪用了987 s的时间产生了上述2.19 GB的数据,处理的效率满足用户对星载数据及时处理的要求。系统产生的亮度数据共计4.96 GB,其中每个亮度值用32 bits,精度可达 10^{-7} lm。数据处理过程中图像、标准线及标准谱线的显示流畅,图像的均值、方差和相对标准偏差等统计信息更新准确,软件对用户的数据响应迅捷。

各数据处理过程后的图像如图6所示,可以看到去除暗噪声和Smear使图像的对比度发生了较大的变化,增益积分的标准化和亮度换算只对整体的亮度产生影响,而不改变对比度。在亮度变换中,系统对用户观测区域之外的数据进行了屏蔽处理,按照用户观测区整理了有效数据区域的范围,清晰地标示出了有效观测区的边界。

系统将采用光谱修正法换算后的亮度值与采

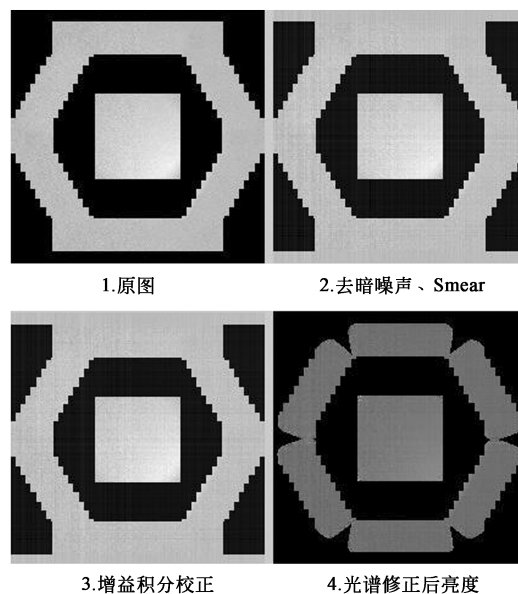


图6 数据处理后的效果图

Fig.6 Effect chart of data processing

用传统的高斯拟合算法换算后的图像^[11]进行了对比,结果如图 7 所示。

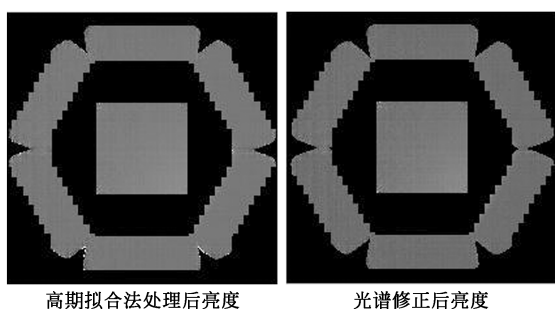


图 7 光谱修正法与高斯拟合法的比较

Fig. 7 Comparison between spectral correction method and Gauss fitting method

可以看出,在数据连续平稳变化的区域,二者的亮度换算结果基本相同;但在视场边缘图像不连续时,高斯拟合法处理的亮度产生较多的亮点,

这是不符合观测实际条件的,而光谱修正法换算的亮点仍然很均匀。这验证了光谱修正法在亮度换算方面比高斯拟合法具有更好的适应性。

5 结 论

本文设计的星载紫外环形光谱仪科学数据处理系统实现了科学数据的快速转换接口,用 352 s 时间内流畅处理了环形光谱仪在 987 s 内产生的 2.19 GB 图像数据,通过对原始数据的解码、校验、图像填充、去噪、参数换算和亮度换算等诸多处理步骤生成了 4.96 GB 亮度数据,亮度换算后精度为 10^{-7} lm,完全满足用户对高时效性的处理要求。作为卫星数据链路的重要一环,环形光谱仪科学数据处理在功能和性能上均满足用户的需求,为数据反演提供了准确而迅捷的保障。

参考文献:

- [1] 杨小虎.地球临边环形成像仪性能评价及辐射定标研究[D].北京:中国科学院研究生院,2012.
YANG X H. Study on performance evaluation and radiometric calibration of the earth limb annular imager [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [2] 张晶.用于中层大气临边探测的紫外全景成像仪研究[D].北京:中国科学院研究生院,2014.
ZHANG J. The study on UV panoramic imaging system for middle atmosphere sounding in limb view [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [3] 高晓惠.高光谱数据处理技术研究[D].北京:中国科学院研究生院,2013.
GAO X H. Research on technologies of hyperspectral data processing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [4] 张贵祥,金光,郑亮亮,等.高速多通道 CCD 图像数据处理与传输系统设计[J].液晶与显示,2011,26(3):397-403.
ZHANG G X, JIN G, ZHENG L L, et al. Design of high-speed and multi-channel CCD image data processing and transmission system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 397-403. (in Chinese)
- [5] 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.
WU W P, JIN L X, WANG D, et al. Power characteristic analysis method of optical remote sensor based on command sets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1549-1554. (in Chinese)
- [6] 柳红岩,孙慧婷,李岩,等.漂移扫描 CCD 星图的 smear 现象快速消除方法研究[J].液晶与显示,2016,31(3):310-316.
LIU H Y, SUN H T, LI Y, et al. Fast Smear effect removal algorithm of CCD drift-scan star image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 310-316. (in Chinese)
- [7] 孙瑾秋,周军,朱宇,等.天文观测 CCD 相机中 Smear 效应的消除[J].光学精密工程,2011,19(10):2527-2532.
SUN J Q, ZHOU J, ZHUY, et al. Smear removal of CCD camera in astronomic observation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2527-2532. (in Chinese)
- [8] 张宇,张立国,张星祥.行间转移大面阵 CCD 相机的 Smear 噪声实时去除[J].光学精密工程,2013,21(9):2388-2394.
ZHANG Y, ZHANG L G, ZHANG X X. Real-time elimination of Smear noise for large interline transfer area CCD

- camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 21(9): 2388-2394. (in Chinese)
- [9] TOSHIHICO Y, KAZUYUKI K. Digital camera comprising smear removal function; U.S., 123828[P]. 2006-11.
- [10] 吴伟平, 闫得杰, 孙天宇, 等. 紫外臭氧廓线探测器快视系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(6): 2220-2222, 2236.
- WU W P, YAN D J, SUN T Y, *et al.* Design and realization of quick displaying system of ultraviolet ozone profile detector [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(6): 2220-2222, 2236. (in Chinese)
- [11] 陈明星, 朱灵, 张龙, 等. 基于 LabVIEW 的光纤傅里叶变换光谱仪数据处理技术[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 488-492.
- CHEN M X, ZHU L, ZHANG L, *et al.* Data processing technique for optical-fiber Fourier transform spectrometer based on LabVIEW[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(3): 488-492. (in Chinese)

作者简介: 吴伟平(1980—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 2006 年于吉林大学获得硕士学位, 2015 年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事航天光学遥感器的设计和研发工作。E-mail: rainciomp@sina.com