

多方位/多波段地球临边紫外成像仪辐射特性研究

杨小虎 王淑荣* 黄煜

(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 针对多方位/多波段临边紫外成像仪的结构特点及辐射定标的难点,提出了一种分割仪器视场定标再整合定标数据的方式。通过比较仪器全视场与分割视场照明条件下探测器相同像素点输出值的大小,得出各视场之间的相互影响量基本在仪器自身的测量重复性误差1%之内,从而证明了分割视场定标方式的可行性。对临边紫外成像仪分割视场定标结果显示,紫外290、310、355 nm三个波段的合成标准不确定度分别为3.93%、3.90%、3.84%,符合目前遥感仪器紫外波段辐射定标不确定度3%~5%的范围。临边紫外成像仪分割视场定标方式的成功实施为解决超大视场以及更加复杂的遥感仪器辐射定标提供了新的指导。

关键词 遥感;临边紫外成像仪;辐射特性;辐射定标;分割视场;不确定度

中图分类号 TP706 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0801001

Research on Radiation Characteristic of the Multi-Azimuth/Multi-Waveband Earth Limb Ultraviolet Imager

Yang Xiaohu Wang Shurong Huang Yu

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

Abstract Considering the design feature and the difficulty in radiation calibration of the multi-azimuth/multi-waveband earth limb ultraviolet (UV) imager, a method which firstly calibrated the segmented field and then integrated the data has been proposed. With a radiated comparison between the whole field and the segmented field, the output of detector shows a consistence within 1% measurement reproducibility error of the instrument, which returns back to prove the calibration method feasibility. The combined standard uncertainty of the three 290 nm, 310 nm and 355 nm UV bands is 3.93%, 3.90% and 3.84% respectively, which conforms the 3%~5% range of radiation calibration uncertainty of the UV sensors presently. With the successful accomplishment of the segmented field method for the limb UV imager, radiation calibration for greater field or more complicated sensors has been made available.

Key words remote sensing; limb UV imager; radiated characteristic; radiation calibration; segmented field; uncertainty

OCIS codes 010.0280; 350.5610; 150.1488

1 引言

天基大气临边遥感是目前国际上主流的探测方式,其有效兼顾了天底探测方式的高空间覆盖范围和掩星探测方式的高精度和高垂直分辨率优势,在任务上体现出多样性,在时间上则能连续探测。多

方位/多波段地球临边紫外(UV)成像仪正是这样一种遥感仪器,能实时给出多个方位的大气临边 $70^{\circ}\sim 73^{\circ}$ 角度内的紫外光谱散射信息,同时兼顾星下点 10° 视场的天底探测数据。然而到目前为止,国内在这种大视场紫外波段遥感探测仪器的研制及辐射定标研究方面尚处起步阶段^[1-6]。

收稿日期: 2014-02-11; 收到修改稿日期: 2014-04-11

基金项目: 国家863计划(2009AA12Z151)、国家自然科学基金(41074126)

作者简介: 杨小虎(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事空间紫外遥感仪器辐射定标方面的研究。

E-mail: yangxiaohu861106@163.com

* 通信联系人。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

本文主要是针对多方位/多波段地球临边紫外成像仪的辐射特性开展的相关研究。基于其结构形式及工作原理,分析了其辐射定标的难点所在,从而在现有条件下提出了一套适用于大视场遥感仪器辐射定标的方案,完成了紫外成像仪高精度辐射定标,最后对仪器辐射定标过程中的不确定度源及大小进行了分析。

2 仪器结构及定标难点

多方位/多波段地球临边紫外成像仪是一种针对空间应用的大相对孔径、大视场和具有较高成像质量的光学系统,其主要技术指标如表1所示。

在结构形式上,其采用折反射式结构,利用视场压缩器将临边半视场角 $70^{\circ}\sim 73^{\circ}$ 压缩后进入同心光学镜头成像,而中心部分 10° 视场不通过压缩直接成像。290、310、355 nm三个波段的滤光片分别置于滤光片轮上,依据探测需要筛选进入仪器内部的波段。在轨运行期间中心视场观测天底 10° 视场角内的大气辐射或地面亮度分布,而临边视场的径向和径向垂直方向则分别代表地球临边辐射随临边高

对图1所示的临边紫外成像仪进行高精度辐射定标最大的难点在于仪器的临边视场太大。如图2所示的利用大尺寸积分球定标紫外成像仪示意图,当定标距离为100 mm时,临边 $140^{\circ}\sim 146^{\circ}$ 视场在积分球开口上投影直径约为750 mm,由积分球理论知球体直径至少为1650 mm,此时积分球开口边缘区域的非均匀性会给定标带来约4%的不确定度影响。此外,即使积分球开口足够大使得紫外成像仪临边视场的投影处于积分球开口中心区域,仪器

3 分割视场辐射定标

3.1 分割视场定标方法验证

理论上,探测器不同像素对应不同视场方向的人射辐射,紫外成像仪临边视场各方位以及中心视场之间不应相互干扰,但由于存在杂散光,且分割视场定标与仪器实际应用状态不同,为了确定分割视场定标方法的可行性,有必要通过实验确定临边视场各方位及中心视场之间是否存在相互影响。

中心视场通过引入可拆卸式挡板允许或禁止中心视场成像,临边视场则通过在各临边反射镜上分别遮盖黑纸的方法允许或禁止该临边方向成像,由于黑纸在紫外波段的反射率极低,因此某一方位的反射镜上遮盖黑纸则代表该临边方位不能成像。图3给出了临边各方位及中心视场间的相对影响实

度和方位角变化的情况。仪器整机结构及光路图如图1所示,主要由反射棱锥、滤光片、透镜组及CCD组成的光学单元、电子学控制单元、机械支撑单元及散热单元四部分构成。

表1 临边紫外成像仪主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of the limb UV imager

Item	Value
Focal length /mm	22.37
F number	3.3
Field of view /($^{\circ}$)	0~10 (center) 140~146 (limb)
Spatial resolution /km	3 290±5
Spectral range /nm	310±5 355±3
CCD pixel size / μm	13×13
CCD array size /pixel	1024×1024
Outline dimension /mm	$\Phi(240\pm 1)\times(247.5\pm 1.5)$
Mass /kg	9±0.2

$140^{\circ}\sim 146^{\circ}$ 临边视场角度范围内的积分球朗伯特特性也是一个不能忽视的不确定度源。事实上,定标距离、积分球开口大小、积分球球体直径以及其朗伯特特性相互制约,使得仪器超大临边视场定标具有相当大的不确定度,可达7%左右^[7-15]。基于此,结合紫外成像仪临边视场的光线追迹图,考虑将临边视场按反射锥进行分割,分别对单个临边视场进行高精度的辐射定标,最后将各定标数据整合从而完成整个超大临边视场的标定^[16]。

测比值,其中右侧刻度尺为以灰度表示的信号比值,图3(a)~(d)分别代表临边全视场受中心视场的影响、临边某一方位视场受中心视场的影响以及中心视场受临边全视场的影响、临边某一方位视场受临边其他方位视场的影响。

由图3可知,临边全视场在中心视场加入挡板前后的信号比值约为1.4%,而临边某一方位视场在中心视场加入挡板前后的比值却小于1%。分析两者之间的不同,在测试临边全视场受中心视场影响时,为保证临边超大全视场都能成像,需将仪器塞入积分球内部,此时,临边全视场与中心视场均观测积分球内壁,在中心视场信号不饱和的前提下,临边全视场响应较弱从而受噪声影响较大;而临边某一方位视场受中心视场影响测试时,可摆脱临边相对方位视场对光源尺寸的限制,中心视场依旧观测积

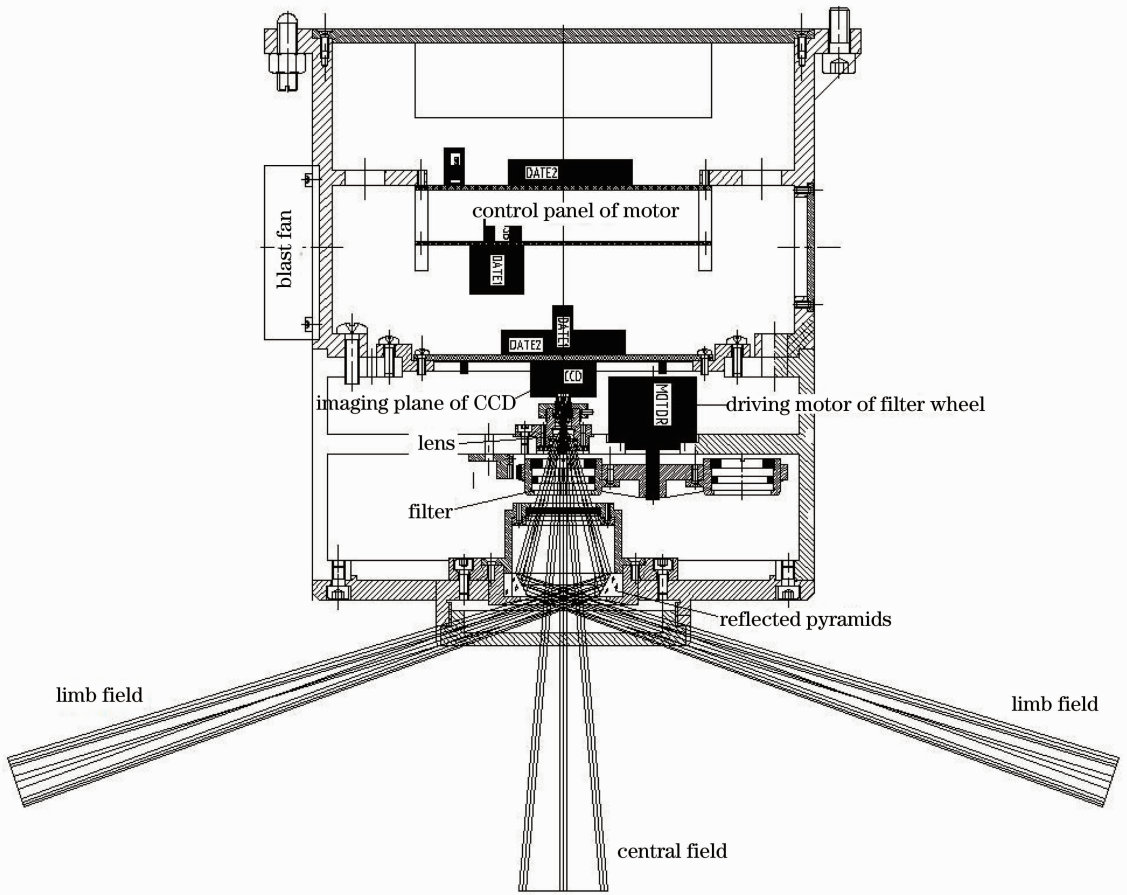


图 1 整机结构及光路图

Fig. 1 Structural and optical path drawing of the whole imager

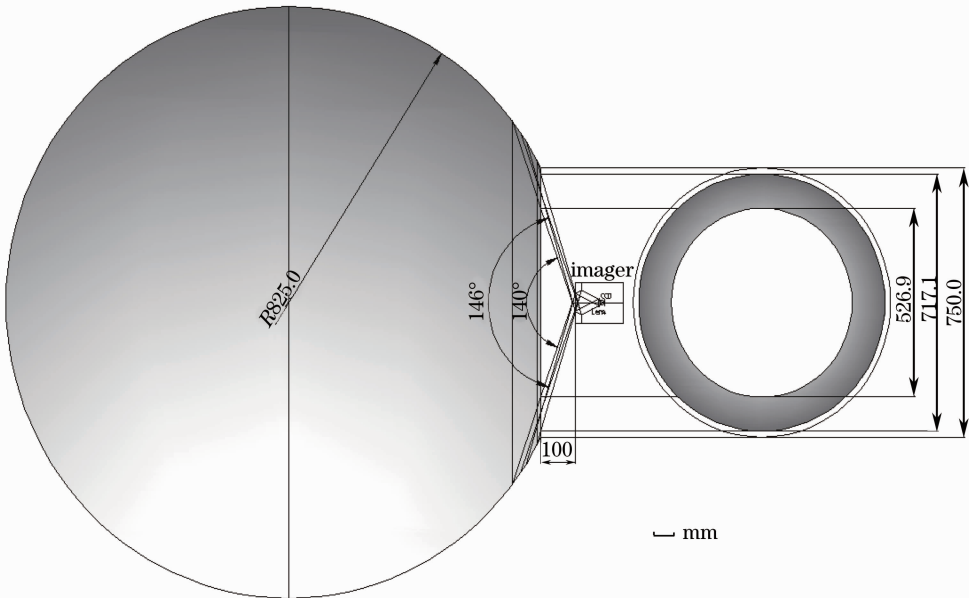


图 2 积分球定标紫外成像仪示意图

Fig. 2 Sketch map of UV imager calibrated by integrating sphere

分球, 临边某一方位则观测另一稳定的氙灯光源, 此时该临边方位与中心视场信号都能保证较大的信噪

比, 由此可见, 各视场相互影响测试过程中, 信噪比对测试结果的影响也是存在的, 各项测试的前提都

必须保证较高的信噪比条件。而中心视场受临边全视场的影响以及临边某一方位视场受临边其他方位视场的影响测试在保证足够高信噪比条件的前提下,其测试结果均显示在仪器测量重复性误差之内。

通过比较各视场的测试结果,可看出紫外成像仪临边视场各方位以及中心视场间相互干扰均可忽略,这也验证了分割视场定标仪器的可行性。

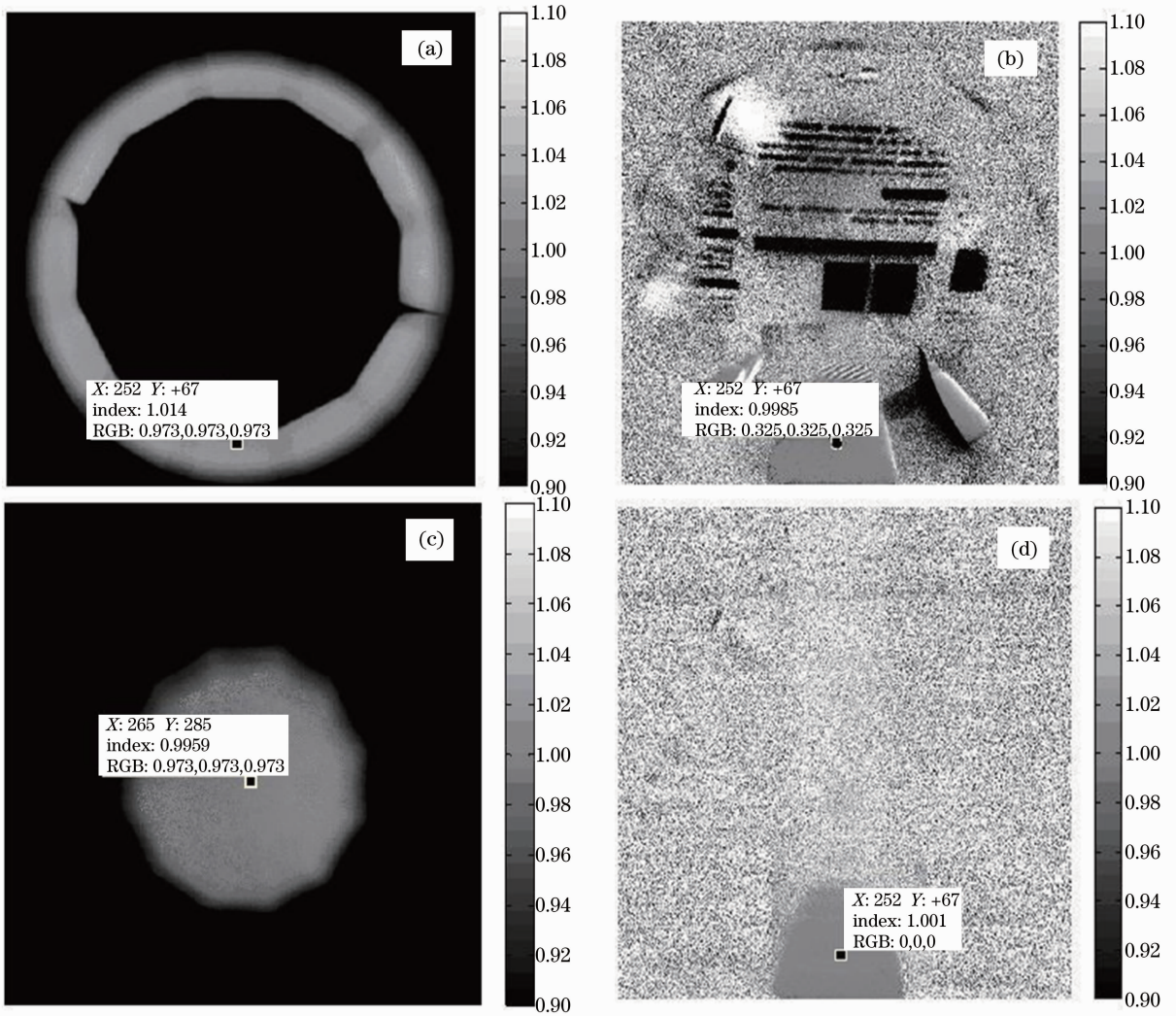


图 3 临边各方位及中心视场间的相对影响实测信号比值

Fig. 3 Measured signal ratio of relative effect among each azimuth of limb and nadir field

3.2 分割视场定标

临边紫外成像仪分割视场定标方式示意图如图 4 所示,图 4(a)主要用于仪器单独进行中心视场定标,仪器距积分球开口 300 mm,此时仪器中心视场在积分球开口面上的投影圆半径为 26.25 mm。图 4(b)用于仪器单独进行临边视场定标,依据仪器结构特点,将仪器按反射锥数进行分割,即临边视场分割为 12 个相等的子视场,定标时仪器开口中心距积分球开口 250 mm,各反射锥对应的临边视场在积分球开口面上的投影都是一个上底为 7.65 mm,下底为 10.41 mm,高为 20.89 mm 的梯形。通过高精度的转台系统控制仪器,使不同方位的反射锥依

次对准积分球中心,将各测量结果代入(1)式,从而得到一系列临边分视场的亮度响应度:

$$R_i(\lambda) = \frac{S_i(\lambda)}{B(\lambda)}, \quad (1)$$

式中 $R_i(\lambda)$ 为三通道临边各分视场的亮度响应度, $S_i(\lambda)$ 为三通道临边各分视场对应输出信号, $B(\lambda)$ 为积分球开口处的光谱辐亮度, i 为临边各分视场序号, $i = 1, 2, \dots, 12$, λ 为三通道对应波长。

由于仪器中心视场引入挡板结构,且为了固定该中心挡板,在各相邻反射锥结合部位加入挡板支撑结构,通过几何定标事先给出各临边子视场不受挡板支撑结构影响的区域即像面有效区,通过(2)式

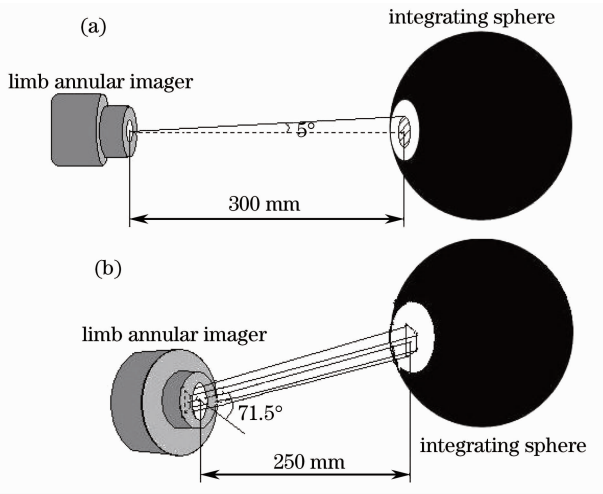


图4 临边紫外成像仪分割视场定标方式示意图

Fig. 4 Segmental field calibration method of limb UV imager

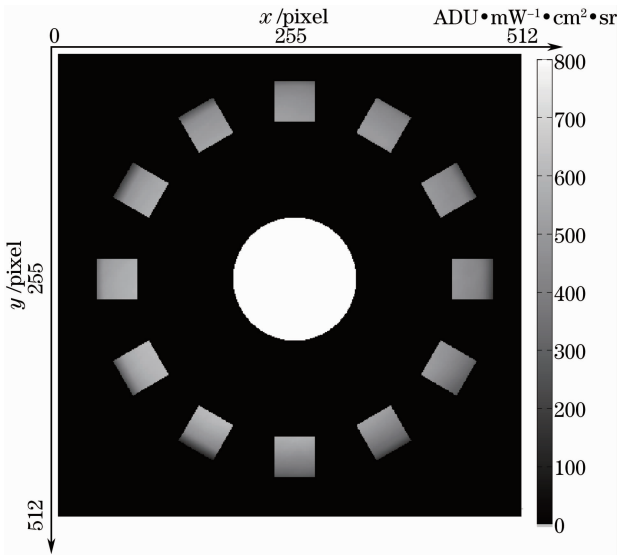


图5 临边紫外成像仪像面有效区亮度响应度定标示意图

Fig. 5 Radiance calibration result in effective area of limb UV imager

即可得到临边紫外成像仪整个像面上对应像面有效区内的亮度响应度如图5所示：

$$R(\lambda) = R_0(\lambda) \times G_0(\lambda) + \sum_{i=1}^{12} [R_i(\lambda) \times G_i(\lambda)], \quad (2)$$

式中 $R(\lambda)$ 为三通道有效区内的亮度响应度, $R_0(\lambda)$ 为三通道中心视场的亮度响应度, $G_0(\lambda)$ 为三通道中心 10° 视场对应的像面有效区域, $G_i(\lambda)$ 为三通道临边分视场由临边 $140^\circ \sim 146^\circ$ 视场及中心挡板支撑结构限制的像面有效区域。

图5中,横纵坐标均代表像素数,像面有效区内

各像素输出值代表某一方向的亮度响应度值,单位为 $\text{ADU} \cdot \mu\text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}$,其中 ADU 表示探测器输出灰度值单位,亮度响应度越大,像素亮度越高,由图5可见,中心视场比临边各子视场的亮度响应度大,这主要是由于透镜组到达像面的能量会随视场角余弦四次方衰减以及临边视场比中心视场多经过一次反射的缘故,而各临边子视场之间亮度响应度不完全相同,则主要是与各反射锥粘接装调及镀膜差别有关。

4 不确定度分析

临边紫外成像仪分割视场定标过程中不确定度源主要包括:由积分球开口光谱辐亮度引入的不确定度、由仪器自身测量重复性引入的不确定度、仪器滤光片带宽等效处理引入的不确定度以及分割视场定标相对仪器实际使用状态不一致引入的不确定度等。

积分球开口光谱辐亮度是由美国 NIST-1000W 光谱辐照度标准石英卤钨灯经光谱辐射计传递而来,其在 290、310、355 nm 处的不确定度分别为 3.55%、3.52% 和 3.50%。

仪器自身测量不确定度通过重复测量同一信号 11 次并求标准偏差得出为 0.5%。

仪器三通道滤光片实际带宽依次为 10、10、6 nm,且各滤光片透过率曲线也不完全遵从高斯分布,这样对其等效处理所引入的不确定度依次可达 0.8%、0.8% 和 0.5%。

分割视场定标尽管已证实不存在视场间相互干扰的问题,但相比仪器实际使用状态,其杂光分布、探测器 Smear 现象影响等还是略有不同,但由分割视场定标方法验证其影响不确定度最大不会超过 1.4%。

表2给出了临边紫外成像仪分割视场定标各不确定度源及大小,并依据各不确定度互不相关求出了总的合成标准不确定度^[17-18]。

表2 临边紫外成像仪分割视场定标各不确定度源及大小
Table 2 Uncertainty of dividing field calibration of the limb UV imager

Uncertainty sources	Value		
	290 nm	310 nm	355 nm
Aperture radiance of integrating sphere / %	3.55	3.52	3.50
Measurement repeatability of imager / %	0.5		
Approximate bandwidth / %	0.8	0.8	0.5

Calibration method /%	1.4		
Combined standard uncertainty /%	3.93	3.90	3.84

5 结 论

本文关于临边紫外成像仪辐射特性的研究表明,分割视场定标再整合数据是目前针对超大视场遥感仪器的一种行之有效的定标方式,其在紫外290、310、355 nm三波段合成标准不确定度分别为3.93%、3.90%和3.84%,远远小于全视场定标约7%的不确定度,同时该方法针对其他大视场遥感仪器的辐射定标工作具有通用性。从不确定度分析表中可以看出积分球开口辐亮度传递的不确定度是影响最终不确定度的主要因素,因此后续的研究需要重点针对该传递过程进行改进。

参 考 文 献

- 1 Yu Xiangyang, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Development of ultraviolet annular imager for earth limb and nadir sounding simultaneously [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1211004.
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): 1211004.
- 2 Zhang Yanna, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, *et al.*. Research on system level calibration method of multi-band filter radiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812004.
张艳娜,郑小兵,李健军,等.多波段滤光片辐亮度计的系统级定标方法研究[J].*光学学报*, 2013, 33(8): 0812004.
- 3 Xu Wenbin, Zheng Xiaobing, Yi Weining. Cross-calibration method based on hyperspectral imager hyperion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0528002.
徐文斌,郑小兵,易维宁.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*, 2013, 33(5): 0528002.
- 4 Lü Daren, Wang Pucai, Qiu Jinhuan, *et al.*. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China [J]. *Chinese J Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 552-566.
吕达仁,王普才,邱金桓,等.大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J].*大气科学*, 2003, 27(4): 552-566.
- 5 Qiu Jinhuan, Wang Pucai, Xian Xiang'ao, *et al.*. Recent progress in atmospheric remote sensing researches [J]. *Chinese J Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 841-853.
邱金桓,王普才,夏祥鳌,等.近年来大气遥感研究进展[J].*大气科学*, 2008, 32(4): 841-853.
- 6 Wang Shurong, Li Futian, Qu Yi. Space UV optical remote sensing technology and development [J]. *Chinese J Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1): 17-22.
王淑荣,李福田,曲艺.空间紫外光学遥感技术与发展趋势[J].*中国光学与应用光学*, 2009, 2(1): 17-22.
- 7 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Qu Yi, *et al.*. Research of UV spectral radiance characteristics of the integrating sphere based on calibration by the absolute radiance radiometer [J]. *Chinese J*

Lasers, 2011, 38(10): 1008007.

- 杨小虎,王淑荣,曲艺,等.基于绝对辐亮度计定标的积分球紫外光谱辐射特性研究[J].*中国激光*, 2011, 38(10): 1008007.
- 8 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Wavelength dependence of the spectral irradiance of standard lamp and bi-reflection distribution function of diffuser based on standard detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0612008.
杨小虎,王淑荣,黄煜,等.基于标准探测器研究标准灯光谱辐照度和漫反射板双向反射分布函数随波长的变化[J].*光学学报*, 2011, 31(6): 0612008.
 - 9 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101004.
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): 0101004.
 - 10 J T McLean, B W Guenther. Radiance calibration of spherical integrators [C]. *SPIE*, 1989, 1109: 114-121.
 - 11 J H Walker, C L Cromer. A technique for improving the calibration of large-area sphere sources [C]. *SPIE*, 1991, 1493: 224-230.
 - 12 Xing Jin, Wang Shurong, Li Futian. Comparison of spectral radiance calibrations of spectroradiometer for ultraviolet space remote sensing using three calibration techniques [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(4): 509-515.
邢进,王淑荣,李福田.空间紫外遥感光谱辐射计光谱辐亮度定标三种方法的比较[J].*中国激光*, 2006, 33(4): 509-515.
 - 13 D F Heath. Large aperture spectral radiance calibration source for ultraviolet remote sensing instruments [C]. *SPIE*, 2003, 4891: 335-342.
 - 14 James H Walker, Ambler Thompson. Spectral radiance of a large-area integrating sphere source [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1995, 100(1): 37-41.
 - 15 Wang Shurong, Xing Jin, Li Futian. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 185-190.
王淑荣,邢进,李福田.利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J].*光学精密工程*, 2006, 14(2): 185-190.
 - 16 Tian Yilong, Zhou Wei, Wang Weihua, *et al.*. A method of dim and small target detection in large field-of-view from coarse to fine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 011104.
田毅龙,周伟,王卫华,等.一种由粗到精的大视场弱小目标检测方法[J].*激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 011104.
 - 17 Charles K Gatebe, James J Butler, John W Cooper, *et al.*. Characterization of errors in the use of integrating - sphere systems in the calibration of scanning radiometers [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(31): 7640-7651.
 - 18 Yang Xiaohu. Study on Performance Evaluation and Radiometric Calibration of the Earth Limb Annular Imager [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. 21-103.
杨小虎.地球临边环形成像仪性能评价及辐射定标研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012. 21-103.

栏目编辑:何卓铭