

文章编号 1004-924X(2016)09-2101-08

## 星载多谱段双视场紫外大气探测仪

薛庆生

(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:** 针对天底和临边综合紫外大气探测的需求, 分析了天底和临边双视场观测原理和技术指标, 设计和研制了多谱段双视场紫外大气探测仪原理样机。该样机光学系统由前透镜组、环形透镜、中继透镜组和窄带滤光片组成, 3 个工作谱段的中心波长分别为 265 nm、295 nm 和 360 nm, 带宽均小于 20 nm, 天底视场为  $10^\circ$ , 临边视场为  $360^\circ(141.8^\circ\sim 146.6^\circ)$ , 焦距为 5 mm, F 数为 3.3, 通过切换窄带滤光片完成 3 个谱段的探测。多谱段双视场紫外大气探测仪整机质量约为 3 kg, 体积为  $\Phi 90\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。对样机的静态传递函数和像面照度均匀性进行了测试。测试结果表明, 在特征频率 38.5 lp/mm 处, 天底视场的静态传递函数为 0.24, 临边视场的静态传递函数为 0.22, 像面照度均匀性为 94%, 均优于设计指标要求。该原理样机体积小、重量轻, 满足空间光学遥感仪器小型化和轻量化的要求。

**关键词:** 光学设计; 紫外大气探测仪; 多谱段双视场紫外探测仪; 紫外滤光片

**中图分类号:** V447.1; V476 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162409.2101

## Spaceborne multiband UV atmospheric sounder with two fields

XUE Qing-sheng

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

\* Corresponding author, E-mail: qsh.xue2006@163.com

**Abstract:** To comprehensively implement the UV atmospheric sounding of nadir and limb fields, the principle of simultaneously sounding of nadir and limb fields was analyzed and technical specifications were analyzed. Then a prototype of multiband UV atmospheric sounder with two fields was designed and developed. The optical system of the prototype is composed of a fore of lens, an annular lens, a relay of lens, and a narrowband filter. The central wavelengths of three working spectral ranges are 265 nm, 295 nm, and 360 nm, the bandwidth is less than 20 nm. The nadir field and the limb field are  $10^\circ$ , and  $360^\circ(141.8^\circ\sim 146.6^\circ)$ , respectively, the focal length is 5 mm, and the F number is 1 : 3.3. Three wavebands were detected individually by switching UV narrowband filters. The total mass of the prototype is approximately 3 kg, and its volume is about  $\Phi 90\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ . The spatial resolution and illuminance uniformity of image plane of the prototype were tested. The test result demonstrates that the static MTFs of nadir field and limb field are 0.25 and 0.22 respectively at a characteristic frequency of 38.5 lp/mm and the illuminance uniformity of image plane is 94%. Both MTFs and illuminance uniformity are better than that of design requirements. The prototype shows a

收稿日期: 2016-01-14; 修订日期: 2016-03-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41575023, No. 41105014); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所科技前沿领域创新项目

smaller volume and a lighter weight, and satisfies the miniaturized and lightened requirements of spaceborne instruments.

**Key words:** optical design; UV atmospheric sounder; multiband two field UV sounder; UV filter

## 1 引言

空间紫外大气探测是全球空气质量和气候探测的重要途径之一。根据观测路径的不同,空间紫外大气探测分为天底观测方式、临边观测方式和掩星观测方式。其中,天底观测方式易于获得较宽的空间覆盖,对于大气成分的柱总量的反演有优势;临边和掩星观测方式易于获得较高的垂直分辨率,对大气成分垂直廓线的反演有优势<sup>[1-4]</sup>。天底和临边观测方式的综合应用能够实现两种观测方式的优势互补,达到最优化探测的目的<sup>[5-6]</sup>,因此,将天底和临边观测方式同时应用的双视场紫外大气探测成为国际大气探测领域发展的前沿和热点课题之一。

目前,国内外现有的紫外大气探测仪多为单视场的探测仪器。典型的天底视场探测仪器有 1978 年美国研制的太阳后向散射紫外探测仪 (Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer, SBUV)<sup>[7]</sup> 和 2004 年欧空局研制的臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI)<sup>[8]</sup>,典型的临边视场探测仪器有 2003 年美国研制的臭氧临边探测试验仪 (Shuttle Ozone Limb Sounding Experiment, SOLSE)<sup>[7]</sup> 和临边臭氧反演试验仪 (Limb Ozone Retrieval Experiment, LORE)<sup>[9]</sup>。这些紫外大气探测仪的视场单一,临边视场的覆盖范围小,只对大气临边的一个窄条观测,时空覆盖率很低,无法很好地揭示出大气成分的小尺度变化。多谱段紫外探测通过不同波长的配对使用提高了大气痕量气体和大气密度的反演精度,典型的多谱段紫外探测仪为美国的 LORE<sup>[9]</sup>。

为满足天底和临边综合紫外大气探测的需求,本文分析了双视场综合原理,根据技术指标设计并研制了一种多谱段天底和临边双视场紫外大气探测仪原理样机。对样机的静态传函、像面照度均匀性进行了测试,测试结果表明该样机具有天底  $10^\circ$  和临边  $360^\circ \times (141.8^\circ \sim 146.6^\circ)$  的综合观测能力,优于设计指标要求。多谱段双视场紫外大气探测仪的成功研制,提高了空间大气综合观测能力,为多谱段紫外探测技术在全球空气质

量和气候监测中的应用奠定了技术基础。

## 2 观测原理与技术指标

多谱段双视场紫外大气探测仪搭载于 400 km 高度的卫星平台上,具有天底和临边两个视场。天底视场的光线经过紫外大气探测仪成像在像面上,形成一个中心亮斑,临边视场的光线经过紫外大气探测仪成像在像面上形成一个圆环,观测原理和像面图像如图 1 所示。根据在轨测得的天底视场和临边视场的光谱辐射信号并结合地面的光谱辐亮度定标数据,可以获得在轨实测的大气光谱辐亮度数据,大气科学家可据此反演出大气成分的时空分布信息,从而为空气质量和大气环境监测、大气光化学过程研究等服务。

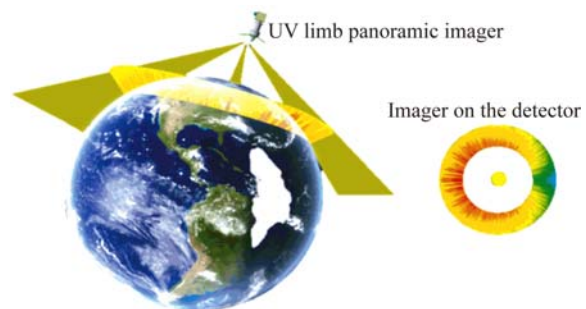


图 1 紫外大气探测仪探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of UV sounder detection

紫外大气探测仪的 3 个中心波长选取 265, 295 和 360 nm,带宽均小于 20 nm。其中,265 nm 和 295 nm 对  $O_3$  吸收较为敏感,因此,双波长结合用以反演中间层的  $O_3$ ;360 nm 由于  $O_3$  吸收很弱,只有分子和气溶胶粒子的散射贡献,因此可以用来反演遥感器的高度,而且遥感器高度的精确定位是决定反演精度的关键。该波长也可以与上述两个波长配对使用,进行气溶胶和云影响的订正。天底视场幅宽为 70 km,即  $GW=70$  km,天底视场为:

$$FOV_1 = 2\arctan(GW/2H) = 10^\circ. \quad (1)$$

临边视场高度方向覆盖 10~90 km,临边视场水平方向覆盖  $360^\circ$ 。临边视场中心对准地球

临边 50 km 高度,仪器与临边观测点的距离  $L=2\ 150\text{ km}$ ,再根据临边高度探测范围确定临边视场  $FOV_2$  为  $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$ 。天底视场和临边高度的空间分辨率要求分别为优于 1 km 和 6 km。探测器选择在紫外波段具有高量子效率的紫外增强型 CCD 探测器,单个像素尺寸为  $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$ ,像素总数为  $1\ \text{K} \times 1\ \text{K}$ ,探测器的量子效率曲线如图 2 所示。

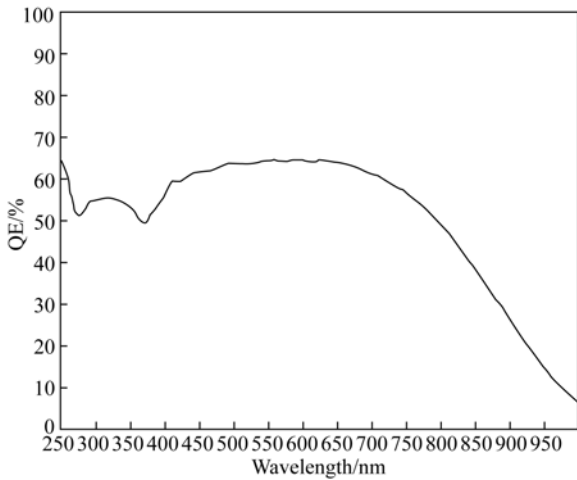


图 2 CCD 探测器的量子效率曲线

Fig. 2 Quantum efficiency curve of CCD detector

根据天底视场的空间分辨率要求,紫外大气探测仪光学系统的焦距为:

$$f'_1 = \frac{a \cdot H}{\text{GSD}_1} = 4.33\ \text{mm}. \quad (2)$$

根据临边视场的空间分辨率要求,紫外大气探测仪光学系统的焦距为:

$$f'_2 = \frac{a \cdot L}{\text{GSD}_2} = 4.69\ \text{mm}, \quad (3)$$

其中  $a=13\ \mu\text{m}$ ,为探测器的像元宽度。为保证天底视场和临边视场的空间分辨率均满足指标且留出一定余量,紫外大气探测仪光学系统的焦距  $f'=5\ \text{mm}$ 。

仪器在特征频率 38.5 lp/mm 处的静态传递函数优于 0.2,光学系统的主要技术指标如表 1 所示。利用临边辐射传输模式 LGLTRAN 对紫外大气临边的光谱辐亮度进行仿真计算。考虑到大气水平的不均匀性,在一定入射太阳天顶角下,以太阳方位角方向为参考方向,辐射具有  $360^\circ$ 方位角的变化。图 3 为不同谱段的紫外光谱辐亮度曲线。

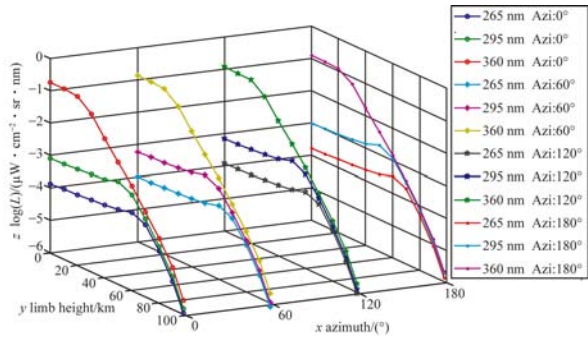


图 3 不同谱段的光谱辐亮度曲线

Fig. 3 Curves of spectral radiance in different bands

根据紫外临边大气光谱辐亮度信号和探测器的性能特点,确定光学系统的  $F$  数为 3.3。由于临边视场大,为了在全视场范围内获得高信噪比,要求像面照度均匀性优于 90%。多谱段双视场探测仪的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 双视场紫外大气探测仪的主要技术指标

Tab. 1 Specifications of UV atmospheric sounder with two field of views

Parameters	Value
Nadir FOV/(°)	10
Limb FOV/(°)	360(141.8~146.6)
Central wavelength/nm	265, 295, 360
Focal length/mm	5
Relative aperture	1 : 3.3
MTF of optics	$\geq 0.5@38.5\ \text{lp. mm}$
Static MTF	$\geq 0.2@38.5\ \text{lp. mm}$
Relative illumination/%	$\geq 90$

### 3 光学系统设计

从技术指标可以看出,多谱段双视场紫外大气探测仪的光学系统要实现天底视场和临边视场共像面,其相对孔径必须较大,这给设计带来了很大的难度。光学系统结构如图 4 所示,天底视场的光线经前透镜组、环形透镜中心区域、中继透镜组和窄带滤光片成像在像面中心区域。临边视场的光线经环形透镜、中继透镜组和窄带滤光片成像在像面的边缘区域,天底视场和临边视场所成的像用同一 CCD 探测器接收,通过旋转滤光片轮实现不同谱段的探测。

一般光学系统的像面照度按视场角  $\omega$  的余

弦的 4 次方下降<sup>[10]</sup>, 临边半视场达到 73.3°, 若按余弦的 4 次方关系, 边缘视场照度仅为中心视场照度的 0.68%, 远不能满足像面照度均匀性优于 90% 的指标要求, 因此, 必须提高像面照度的均匀性。这里利用两种方法来提高大视场像点的照度, 从而达到提高像面照度均匀性的目的。第一种方法: 优化设计时控制系统的畸变为桶形畸变<sup>[11]</sup>, 减小大视场的主光线与光轴的夹角, 提高大视场的像面照度。第二种方法: 优化设计时, 利用光阑像差中的光阑彗差<sup>[12-13]</sup>标定主光线的位置, 使大视场光束充满孔径光阑口径, 此时大视场光束的实际口径大于中心视场光束的实际口径, 从而提高大视场的像面照度。实际像面照度为:

$$E'(\omega) = E_0 K_1 K_2 \cos^4 \omega, \quad (4)$$

式中:  $K_1$  为几何渐晕系数,  $K_2$  为光阑像差渐晕系数,  $E'(\omega)$  是视场角为  $\omega$  光束的像面照度,  $E_0$  为中心 0° 视场的像面照度。优化设计时, 在光学设计软件中控制渐晕系数为负值, 使  $K_1 > 1, K_2 > 1$ , 提高像面照度均匀性。

优化设计的双视场紫外大气探测仪光学系统如图 4 所示, 光学系统的传递函数如图 5 和图 6 所示。265, 295 和 360 nm 3 个谱段天底视场和临边视场的光学传递函数在特征频率

38.5 lp/mm 处均大于 0.8, 满足光学系统 MTF  $\geq 0.5$  的指标要求。如图 7 所示, 265, 295 和 360 nm 3 个谱段系统的  $f-\theta$  畸变小于 0.5%, 像点的实际位置与视场角  $\omega$  之间的关系容易标定。图 8 为像面的相对照度随视场角的变化关系曲线。可以看出, 265, 295 和 360 nm 3 个谱段的像面照度均匀性达到 94%, 满足像面照度均匀性  $\geq 90%$  的要求。

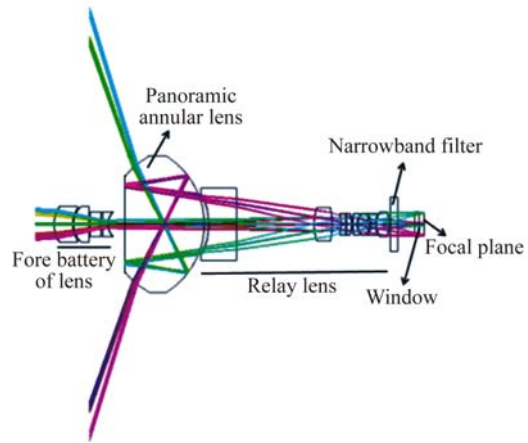


图 4 紫外大气探测仪的光学结构图

Fig. 4 Optical scheme of UV atmospheric sounder with two field of views

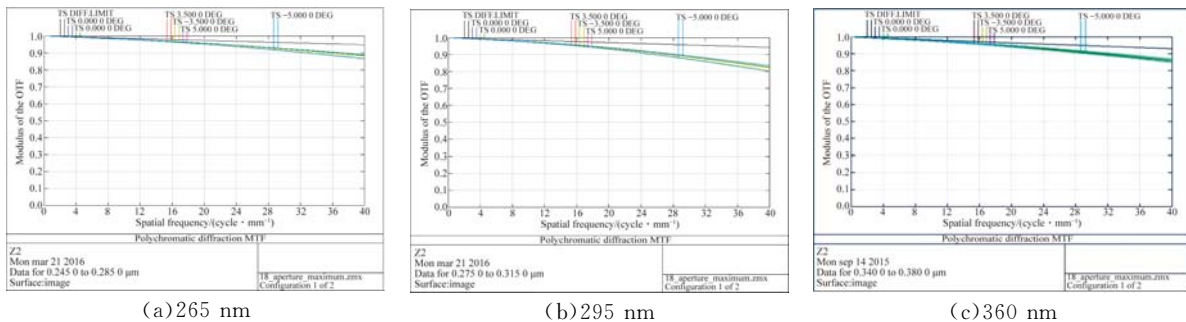


图 5 天底视场的光学传递函数曲线图  
Fig. 5 MTFs of optics in nadir FOV

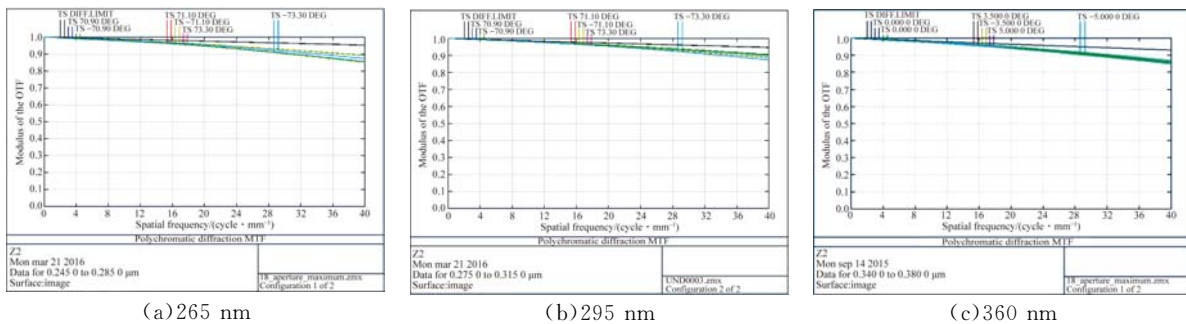


图 6 临边视场的光学传递函数曲线  
Fig. 6 MTFs of optics in limb FOV

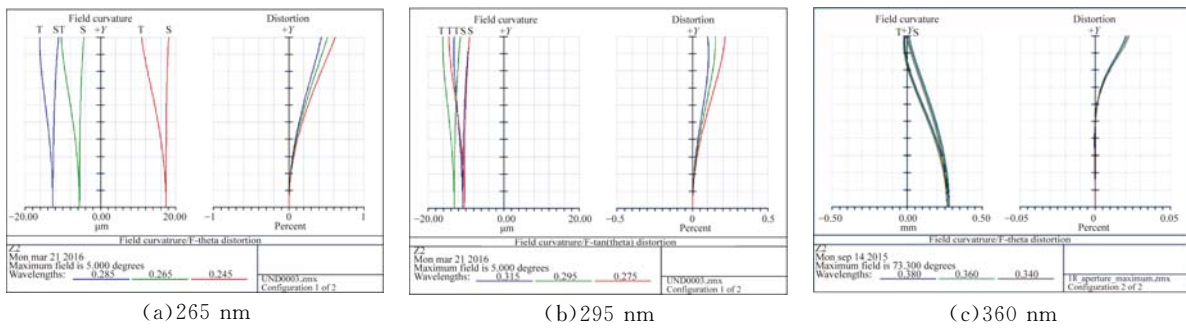


图 7 临边视场  $f-\theta$  畸变  
Fig. 7  $f-\theta$  distortion in limb FOV

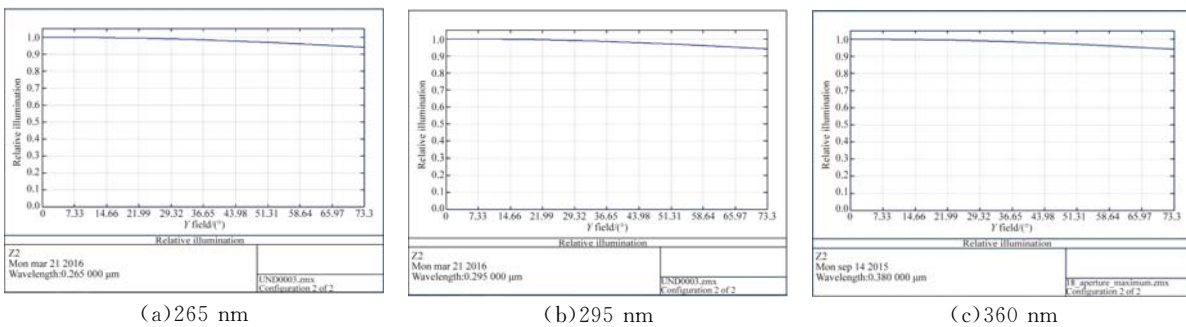


图 8 像面的相对照度随视场角的变化关系曲线  
Fig. 8 Variation of relative illumination with FOV on image plane

#### 4 样机研制及性能测试

空间紫外辐射为微弱信号,为了极大限度地提高系统的信噪比和探测精度,本课题组完成了紫外窄带滤光片膜层的设计和制备,带外截止深度达到 OD6,可有效地抑制带外的杂光干扰。图 9 为 3 种窄带滤光片的透射率曲线,图 10 为 3 种窄带滤光片的实物照片。3 种窄带滤光片固定在滤光片轮上,通过旋转滤光片轮进行切换,滤光片轮结构如图 11 所示。图 12 为多谱段双视场紫外大气探测仪镜头的机械结构模型。如图 12 所示,透镜元件采用镜座周边支撑方式。装配时,首先把透镜元件粘接在镜座内,利用定心车车削加工镜座保证组件同心,然后再利用定心车把镜座定心装配在镜筒内。图 13 为紫外大气探测仪的镜头照片,紫外大气探测仪的整机体积为  $\Phi 90\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ,质量约为 3 kg。

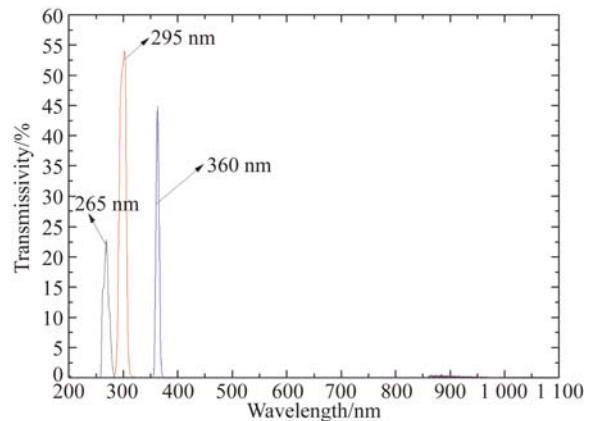


图 9 三种滤光片的透射率曲线  
Fig. 9 Transmissivities of three narrowband filters

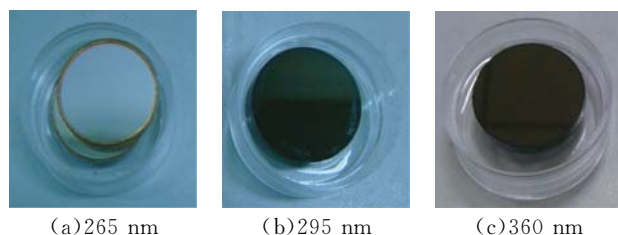


图 10 三种滤光片的实物照片  
Fig. 10 Photos of three narrowband filters

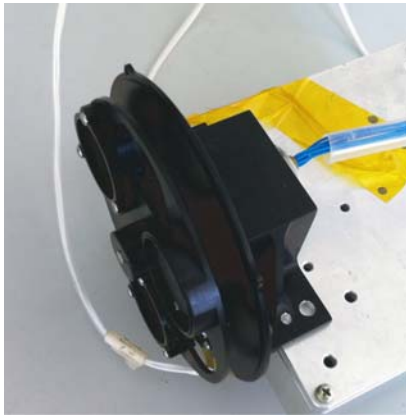


图 11 滤光片轮结构图  
Fig. 11 Configuration of filter wheel

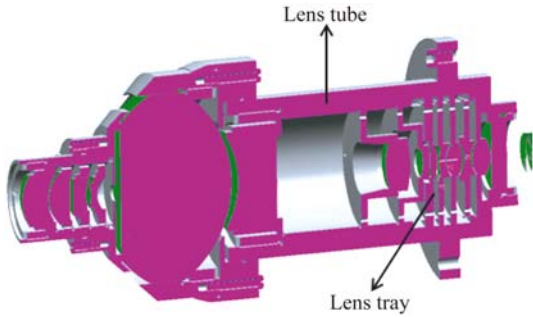


图 12 紫外大气探测仪的机械结构模型  
Fig. 12 Optical-mechanical mode of UV atmospheric sounder



图 13 紫外大气探测仪镜头照片  
Fig. 13 Photo of UV atmospheric sounder

利用氙灯光源、紫外平行光管和目标模拟板组成双视场紫外大气探测仪整机静态传递函数测试装置。探测器的像元尺寸  $a=13\ \mu\text{m}$ , 紫外大气探测仪的焦距  $f=5\ \text{mm}$ , 平行光管的焦距  $f_c=507.16\ \text{mm}$ , 对应目标模拟板的条纹间距为:

$$d = \frac{a \cdot f_c}{f} = 1.32\ \text{mm}. \quad (5)$$

图 14 为双视场紫外大气探测仪整机静态传递函数测试现场, 目标模拟板为带有 4 条亮纹的

条形板。这里以 360 nm 谱段为例, 给出天底视场和临边视场目标板的强度轮廓, 分别如图 15 和图 16 所示。整机的静态传递函数为:

$$MTF_{\text{Static}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (6)$$

式中:  $I_{\text{max}}$  和  $I_{\text{min}}$  分别为条形板亮条纹的强度和暗条纹的强度。根据强度轮廓计算出 360 nm 谱段天底和临边视场的静态传递函数分别为 0.24 和 0.22。旋转滤光片轮到 265 nm 谱段和 295 nm 谱段, 测得 265 nm 谱段天底和临边视场的静态传递函数分别为 0.23 和 0.22, 测得 295 nm 谱段天底和临边视场的静态传递函数分别为 0.22 和 0.21, 均满足静态传递函数  $\geq 0.2$  的指标要求。

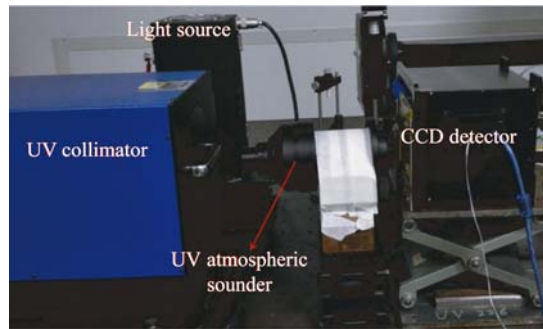


图 14 静态传函测试照片  
Fig. 14 Photo of static MTF test

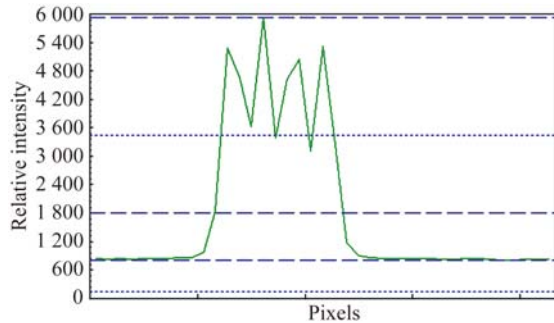


图 15 天底视场目标模拟板的强度轮廓  
Fig. 15 Intensity profile of test target in nadir FOV

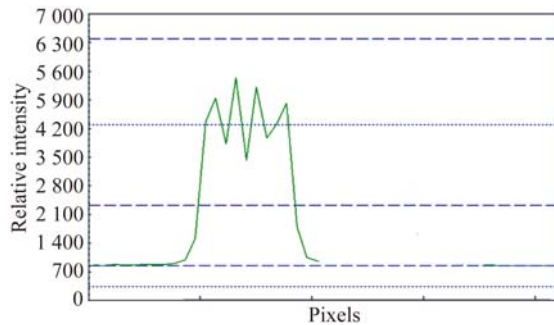


图 16 临边视场目标模拟板的强度轮廓  
Fig. 16 Intensity profile of test target in limb FOV

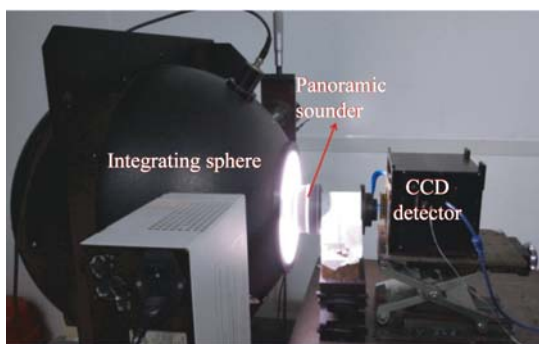


图17 像面照度均匀性测试照片

Fig. 17 Photo of image illumination uniformity test

如图17所示,利用紫外积分球光源照明双视场紫外大气探测仪原理样机,测试其像面照度的均匀性,得到265,295和360 nm谱段的像面照度均匀性分别为93.5%,93.8%和94%,满足像面

照度均匀性优于90%的设计指标要求。

## 5 结 论

为满足天底和临边综合紫外大气探测的需求,本文设计并研制了一种多谱段天底和临边双视场紫外大气探测仪原理样机。该样机具有天底 $10^\circ$ 和临边 $360^\circ \times (141.8^\circ \sim 146.6^\circ)$ 的综合观测能力,焦距为5 mm。对样机的性能进行了测试,天底视场和临边视场的整机静态传递函数均大于0.2,像面照度均匀性为94%,均满足设计指标要求。多谱段双视场紫外大气探测仪原理样机的研制成功,提升了紫外大气探测能力,为下一步它在空间紫外大气探测领域中应用奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 薛庆生. 星载宽波段临边臭氧廓线探测仪光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8):0822002.  
XUE Q SH. Optical design of spaced-based broadband limb ozone profile sounder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8):0822002. (in Chinese)
- [2] 薛庆生. 星载扫描层析临边成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4):0422001.  
XUE Q SH. Optical design of space-based scanning tomographic limb imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4):0422001. (in Chinese)
- [3] 张晶, 王淑荣, 黄煜, 等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 692-700.  
ZHANG J, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Status and development of limb imaging spectrometers [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 692-700. (in Chinese)
- [4] DIDIER F R, ROBERT S. The OMPS limb profiler instrument two-dimensional retrieval algorithm [J]. *SPIE*, 2010, 7827(78270P):78270P-1-78270P-12.
- [5] 于向阳. 双视场多通道成像仪的光机结果[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10):2870-2876.  
YU X Y. Opto-mechanical structure of imager with two field of views and multiple channels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):2870-2876. (in Chinese)
- [6] HEARTH D F, KRUEGER A J, ROEDER H A, *et al.*. The Solar Backscatter Ultraviolet and Total Ozone Mapping Spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUS G [J]. *Optical Engineering*, 1975, 14(4):323-331.
- [7] de VRIES J van den, OORD G H J, HILSEN RATH E, *et al.*. Ozone Monitoring Instrument (OMI) [J]. *SPIE*, 2002, 4480: 315-325.
- [8] RICHARD D M, SCOTT J J. The retrieval of  $O_3$  profiles from limb scatter measurements: results from the shuttle ozone limb sounding experiment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(17): 2597-2600.
- [9] DAVID E F, SCOTT J J, ERNEST H, *et al.*. Stray light characterization of the limb ozone retrieval experiment [J]. *SPIE*, 2004, 5526(5):220-227.
- [10] 薛庆生, 王淑荣, 陈伟. 星载均匀像面低畸变广角气溶胶探测仪的研制[J]. 光子学报, 2013, 42(4): 456-461.  
XUE Q SH, WANG SH R, CHEN W. Development of spaceborne wide-angle aerosol imager with low-distortion and uniform image surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4): 456-461. (in Chinese)
- [11] 薛庆生, 陈伟. 星载紫外全景成像仪光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 517-522.  
XUE Q SH, CHEN W. Optical system design of space-based UV panoramic imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 517-522. (in Chinese)
- [12] 吕振伟, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 大屏幕投影显示光学系统的超薄化设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2021-2025.

LÜ ZH W, LIU W Q, WEI ZH L, *et al.*. Design of ultra-thin optical system in large screen projection display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (8): 2021-2025. (in Chinese)

[13] 王红. 大相对孔径大视场紫外告警相机光学系统

[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(12): 3212-3216.

WANG H. Optical system for ultraviolet warning camera with wide field of view and large relative aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (12): 3212-3216. (in Chinese)

作者简介:



薛庆生(1979—),男,山东梁山人,博士,副研究员,2010年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光学系统设计、航空、航天成像光谱技术及光谱和辐射定标方面的研究。E-mail: qshxue 2006@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)