

# 用于大气临边探测的紫外全景成像仪光学设计

薛庆生 王淑荣

(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** 发展紫外全景成像仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求。提出一种紫外全景成像仪光学设计思路,利用桶形畸变和光阑像差改善像面照度的均匀性,根据应用要求采用折反式结构,设计了一个中心波长在 360 nm,带宽为 10 nm,视场为  $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$ ,焦距为 5 mm,相对孔径为 1:3.3 的紫外全景成像仪光学系统。在奈奎斯特频率 38.5 lp/mm 处,调制传递函数大于 0.72,点列图半径的均方根(RMS)值小于 1/2 pixel,80% 的能量集中在一个像素内, $f-\theta$  畸变小于 0.05%,像面照度均匀性达到 89%,各项指标均满足设计要求。此系统结构紧凑,适合空间大气遥感应用。分析结果表明,该紫外全景成像仪光学设计思路是可行的,可推广到其他波段应用,对全景成像仪的设计具有指导意义。

**关键词** 光学设计;紫外;全景成像仪;光阑像差;大气遥感;临边观测

**中图分类号** TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0422001

## Optical Design of UV Panoramic Imager for Atmospheric Sounding in Limb View

Xue Qingsheng Wang Shurong

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

**Abstract** Space atmosphere remote sensing urgently requires ultraviolet (UV) panoramic imager. An optical design method of UV panoramic imagers is proposed. The uniformity of image illumination is improved by using barrel distortion and pupil aberration. Based on the requirements of application, an optical system of UV panoramic imagers is designed. The central wavelength is 360 nm, the bandwidth is 10 nm, the field of view is  $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$ , the focal length is 5 mm, and the relative aperture is 1:3.3. The modulation transfer function (MTF) is more than 0.72 at the Nyquist spatial frequency of 38.5 lp/mm. The root-mean-square (RMS) radius of spot diagram is less than half of the pixel. 80% of the energy is enclosed in a pixel, the  $f-\theta$  distortion is less than 0.05%, and the uniformity of image illumination is 89%. The design requirements are satisfied. The configuration of this system is compact and is suitable for the application in space atmosphere remote sensing. It is indicated that the optical design idea of UV panoramic imager is feasible, and the design method can be used in other wavelength ranges, which is instructional for designing panoramic imagers.

**Key words** optical design; ultraviolet; panoramic imager; pupil aberration; atmosphere remote sensing; limb view

**OCIS codes** 220.2740; 220.1010

## 1 引言

随着科技的高速发展,空间大气遥感探测技术也在快速发展和进步。根据观测方式的不同,大气探测可分为天底探测、临边探测和掩日/月探测<sup>[1,2]</sup>。临边探测与天底探测和掩日/月探测相比,

具有明显优势,它不仅空间覆盖范围大,而且垂直分辨率高,因此受到科学家的青睐<sup>[3,4]</sup>。美国研制了 OMPS<sup>[5]</sup> 临边探测仪,欧洲空间局研制了 SCHAMACHY<sup>[6]</sup> 临边探测仪,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制出了临边探测仪原理

**收稿日期**: 2012-08-23; **收到修改稿日期**: 2012-10-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(41105014)和中国科学院碳专项子课题(XDA05040103)资助课题。

**作者简介**: 薛庆生(1979—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计、空间遥感成像光谱技术和光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com

样机<sup>[7]</sup>。但现有的大气临边探测仪器每次只能对大气临边的一个方位进行探测,获得了信息量少,不能满足空间大气遥感的应用需求。因而空间大气遥感探测迫切需要研制多方位、甚至全方位的大气临边探测仪器。

为满足空间大气遥感的迫切需求,本文提出采用全景成像技术<sup>[8,9]</sup>,实现 360°全方位大气临边探测。目前,全景成像技术用于大气临边探测的研究报道较少。对 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 等大气成分敏感的波段主要在紫外(UV)波段<sup>[10]</sup>。本文在分析大气临边全景探测原理的基础上,根据空间大气临边探测的应用要求,研究了紫外全景成像系统设计问题,提出了一种紫外全景成像仪光学设计思路,设计了一个紫外全景成像仪光学系统。通过对其性能的分析与评价,证明了本文提出的设计思路的可行性。

## 2 大气临边全景探测原理

图 1 为大气临边全景探测原理图。360°全方位的大气临边辐射经过全景成像仪光学系统成像在探测器上,从而得到一个 360°的环形图像,其中环形图像的径向方向为临边高度方向,径向信号的强弱包含了 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 等大气成分随临边高度变化的信息。利用获得的环形图像信息可以反演 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 等大气成分全方位的时空分布,为大气科学、地球物理研究及天气预报等提供重要数据。

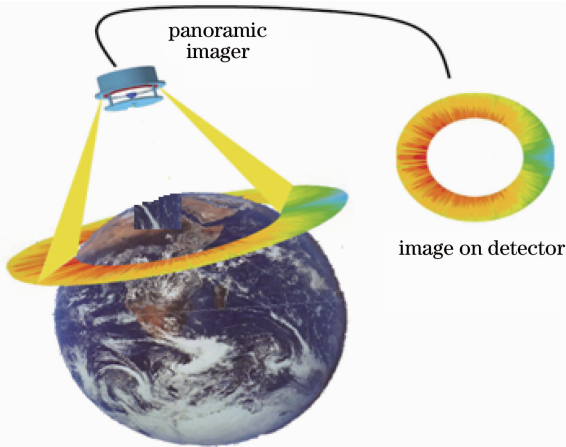


图 1 大气临边全景探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of panoramic sounding of atmosphere in limb view

## 3 应用要求及主要技术指标

紫外全景成像仪预计工作在轨道高度为 400 km 的卫星平台上,对地球临边进行 360°全景成像,探测

临边高度为 10~80 km,要求临边垂直方向的像素分辨率(GSD)为 6 km,工作中心波长为 360 nm,带宽  $\Delta\lambda$  为 10 nm。要求在典型光谱辐亮度  $L'(\lambda) = 5.0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  下的信噪比(SNR)大于等于 100。采用的探测器为英国 e2v 公司的 CCD47-20 紫外增强型探测器,像素数为 1024 pixel×1024 pixel,像素尺寸为 13  $\mu\text{m}$ 。图 2 为其量子效率(QE)曲线,可以看出在 360 nm 处的量子效率大于 50%。

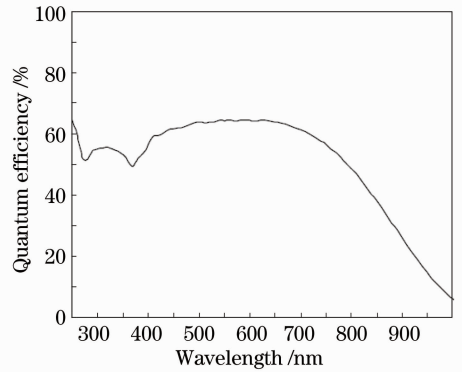


图 2 e2v CCD47-20 量子效率曲线

Fig. 2 Quantum efficiency curve of e2v CCD47-20

考虑到轨道高度  $H$  为 400 km,探测临边中心高度  $h_c$  为 45 km,仪器到临边观测点的距离  $L$  可表示为

$$L = \sqrt{(R+H)^2 - (R+h_c)^2} = 2165 \text{ km}, \quad (1)$$

式中  $R=6378 \text{ km}$  为地球半径。探测临边高度范围  $2h$  为 10~80 km,紫外全景成像仪临边高度方向的视场范围为

$$R_{\text{FOV}} = 2 \arctan \frac{h}{L} = 1.85^\circ. \quad (2)$$

这里留出余量,取  $R_{\text{FOV}}$  为  $2.4^\circ$ ,因此全景成像仪的视场(FOV)为  $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$ 。图 3 为紫外全景成像仪的观测示意图。根据大气临边垂直方向空间分辨率为 6 km 的指标要求,紫外全景成像仪光学系统的焦距为

$$f' = \frac{aL}{R_{\text{GSD}}} = 4.69, \quad (3)$$

式中  $a$  为像素尺寸,  $R_{\text{GSD}}$  为像素分辨率。这里留出余量,取焦距  $f'$  为 5 mm。

根据成像质量和信噪比要求,确定紫外全景成像仪光学系统相对孔径  $D/f'$  为 1:3.3。紫外全景成像仪的信噪比可表示为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{S_e}{\sqrt{S_e + n_{\text{dark}} + \sigma_{\text{read}}^2}}, \quad (4)$$

式中  $S_e$  为目标信号电子数,  $n_{\text{dark}}=2$  为暗电流电子数,  $\sigma_{\text{read}}=30$  为读出噪声。其中  $S_e$  可表示为

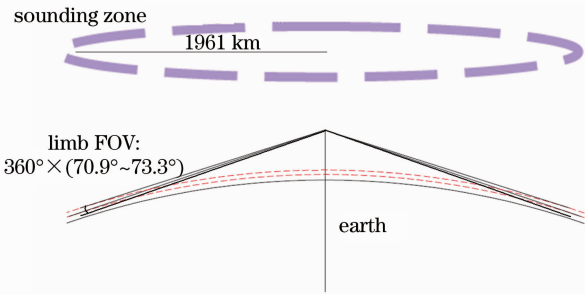


图3 紫外全景成像仪观测示意图

Fig. 3 Viewing geometry of UV panoramic imager

$$S_e = \frac{\pi A_d t_{int} \lambda}{4hc} \left(\frac{D}{f}\right)^2 L(\lambda) \tau_0(\lambda) \eta(\lambda) \Delta\lambda, \quad (5)$$

式中  $A_d = 13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$  为 CCD 探测器的像素面积,  $t_{int} = 1 \text{ s}$  为积分时间,  $\lambda$  为波长,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速。  $\tau_0(\lambda) = 0.4$ ,  $\eta(\lambda) = 0.52$  为量子效率。由(2)式和(3)式可以估算紫外全景成像仪的信噪比为 150, 满足信噪比大于 100 的指标要求。考虑到在不同时间或季节里, 由于太阳光照射角度的变化, 临边光谱辐射亮度会有所变化, 因而可通过调节积分时间来保证全景成像仪在不同探测条件下的信噪比。紫外全景成像仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示, 其中  $f$  为焦距,  $\theta$  为弧度表示的视场角, MTF 为光学调制传递函数。

表 1 紫外全景成像仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specification of UV panoramic imager optical system

Parameter	Value
Center wavelength / nm	360
Bandwidth / nm	10
Focal length / mm	5
FOV / (°)	$360 \times (70.9 \sim 73.3)$
Relative aperture	1:3.3
MTF at 38.8 lp/mm	$\geq 0.5$
$f\text{-}\theta$ / %	$\leq 0.1$
Illumination uniformity / %	$\geq 85$

## 4 全景成像仪光学设计

从第 3 节的指标要求可以看出, 紫外全景成像仪光学系统是一个广角、大相对孔径的光学系统。通常光学系统的像面照度按视场角余弦的 4 次方变化, 随着视场角的增大, 像面照度迅速下降<sup>[11,12]</sup>。若按  $\cos^4 \omega$  定律 ( $\omega$  为视场角),  $73.3^\circ$  视场的像面照度仅为中心照度的 0.68%, 而这样的像面照度无法满足成像要求, 因此需要改善像面照度的均匀性, 尽可能提高临边环形视场的像面照度。本文利用两种

方案来改善像面照度的均匀性。

1) 利用桶形畸变。通过引入桶形畸变, 可以压缩大视场物点成的像, 使得在像空间大视场物点的主光线与光轴的夹角减小, 从而缓解轴外像点照度的下降, 改善像面照度的均匀性。本文设计的紫外全景成像仪光学系统采用  $f\text{-}\theta$  投影关系, 容易实现像点位置与视场角  $\omega$  之间关系的标定, 并利用桶形畸变改善了像面照度的均匀性。

2) 利用光阑像差。在小视场光学系统中, 光阑像差较小, 可以忽略。但在广角光学系统中, 光阑像差的影响不可忽略, 会引起轴外光束和轴上点光束对应的入瞳位置和大小不同。在光阑像差中, 对改善像面照度均匀性起作用的主要是光阑彗差  $S_{IIp}$ , 它使充满近轴入瞳的轴外光束在孔径光阑平面的截面宽度比充满近轴入瞳的轴上点的光束在孔径光阑平面上的截面宽度小。换言之, 在保证轴外光束和轴上点的光束均充满孔径光阑的条件下, 在入瞳面上, 轴外光束的口径必大于轴上光束的口径。考虑到光阑像差后, 像面照度可以表示为

$$E'(\omega) = E'_0 \frac{S_\omega}{S_0} \cos^4 \omega, \quad (6)$$

式中  $S_\omega$ 、 $S_0$  分别为轴外光束和轴上点的光束在入瞳面上的截面积。通过引入大量的光阑彗差, 利用反复迭代法, 保证各视场的主光线都充满孔径光阑的中心, 并使轴外光束充满孔径光阑, 产生有效像差渐晕来改善像面照度的均匀性。

紫外全景成像仪工作在紫外波段, 可选择的透镜材料非常少。在紫外波段, 物理和化学特性稳定、性能良好, 适合空间应用的材料仅有熔融石英。为了减小色差的影响, 紫外全景成像仪光学系统采用折反式结构, 主要由反射镜组和中继透镜组组成。大气临边环形视场的光束, 经光学系统的入瞳入射到反射镜组上, 经反射镜组反射后入射到中继透镜组上, 最后由中继透镜组成像在 CCD 焦平面探测器上。

### 4.1 反射镜组设计

反射镜组的设计考虑到光学加工和镀膜的工艺要求, 采用的面型均为球面, 主镜为凹球面镜, 次镜为凸球面镜, 并在次镜前引入一个壳形的负透镜, 次镜的背面胶合在壳形负透镜上, 并需要保证胶合区域不会遮拦光线。负透镜的引入可以使入射到系统内轴外光束的口径减小, 对轴外像差的校正非常有利。另外, 负透镜还引入了大量的桶形畸变和光阑彗差, 有利于改善像面照度的均匀性。由于两反射镜的面型均为球面, 可优化的结构参数少, 设计时让

两个反射面接近同心,可以减小像散和场曲。反射镜组的结构如图 4 所示,大气临边环形视场的光束,经壳形负透镜入射到凹面反射镜上后,再入射到凸面反射镜上,经凸面反射镜反射的光束从凹面反射镜的中孔射出,入射到中继透镜组上。

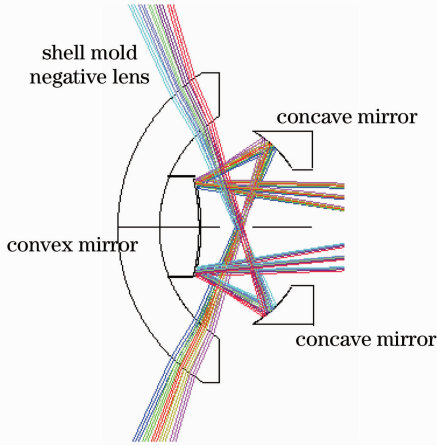


图 4 反射镜组光学结构图

Fig. 4 Optical path of reflecting mirror

#### 4.2 中继透镜组设计

中继透镜组的设计要与反射镜组实现光瞳衔接,把反射镜组所成的虚像成像在 CCD 探测器上,并与反射镜组产生的像差相平衡。透镜组属于中等视场、大相对孔径光学系统,光学结构采用建立在三片型基础上的复杂化结构。为满足空间环境的应用要求,透镜的光学材料均为熔融石英。为减小滤光片的入射角度,滤光片放在最后一块透镜之后,滤光片的最大入射角小于  $10^\circ$ 。图 5 为中继透镜组的结构图,由 6 片熔融石英透镜组成,最后一块为滤光片。

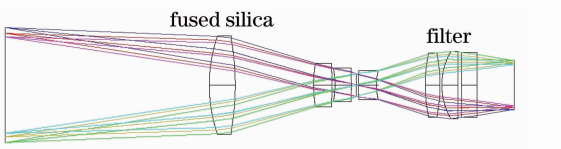


图 5 中继透镜组光学结构图

Fig. 5 Optical path of relay lens

### 5 设计结果

把反射镜组和中继透镜组连接,利用 Zemax 光学设计软件进行了像差平衡和优化设计。图 6 为优化设计的紫外全景成像仪的光学结构图,其最大光学口径为  $\Phi 93\text{ mm}$ ,光学长度为  $152\text{ mm}$ ,光学结构参数如表 2 所示。

图 7 为紫外全景成像仪光学传递函数曲线,在奈奎斯特频率  $38.5\text{ lp/mm}$  处,光学传递函数大于

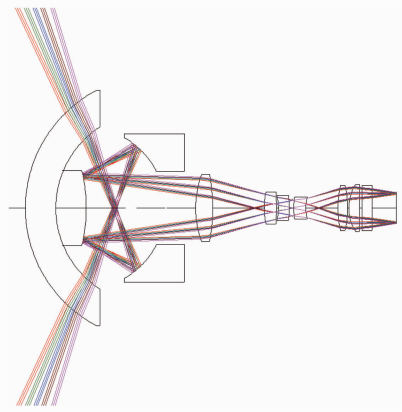


图 6 紫外全景成像仪光学结构图

Fig. 6 Optical path of UV panoramic imager

表 2 气溶胶探测仪光学结构参数

Table 2 Optical parameters of aerosol imager

Surface number	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
Object	Infinity	Infinity	
1	55	12.5	Fused silica
2	40	45	
3	-33.38	-32.5	Mirror
4	-65	45	Mirror
5	41.05	7	Fused silica
6	-72.54	21.21	
7	35.28	5	Fused silica
8	-74.34	0.81	
9	-22.83	21.719	Fused silica
10	-42.19	1.30	
Stop	Infinity	0.5	
12	24.54	5	Fused silica
13	17.62	13.18	
14	40.94	4	Fused silica
15	-44.03	0.5	
16	18.16	4.36	Fused silica
17	Infinity	1	
18	Infinity	4.2	Fused silica
19	Infinity	10	
Image	Infinity		

$0.72$ ,满足在奈奎斯特  $38.5\text{ lp/mm}$  处光学传递函数大于等于  $0.5$  的指标要求。图 8 为紫外全景成像仪  $f-\theta$  畸变曲线,从图中可以看出  $f-\theta$  畸变小于  $0.05\%$ ,即成像点的位置与视场  $\omega$  基本呈线性关系,容易标定,满足  $f-\theta$  畸变小于等于  $0.1\%$  的指标要求。图 9 为像面相对照度曲线,其像面照度均匀性达到  $89\%$ ,满足像面照度均匀性大于等于  $85\%$  的指标要求,并且轴外像点的照度大于轴上像点的照度,这对紫外全景成像仪非常有利,因为全景成像仪的有效视场恰好为轴外,在紫外全景成像仪的观测



视场  $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$  内, 像面照度均匀性达到 99%。综上, 全景成像仪光学系统各项指标均满足设计要求。

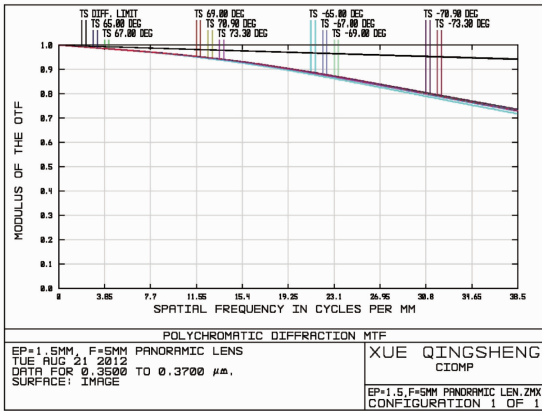


图 7 紫外全景成像仪光学系统传递函数曲线  
Fig. 7 MTF curves of UV panoramic imager

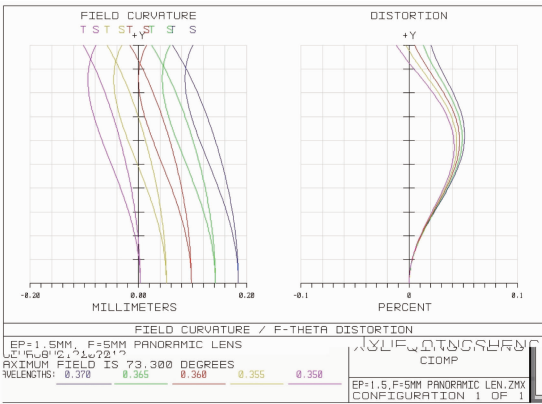


图 8 紫外全景成像仪  $f-\theta$  畸变曲线

Fig. 8  $f-\theta$  distortion curves of UV panoramic imager

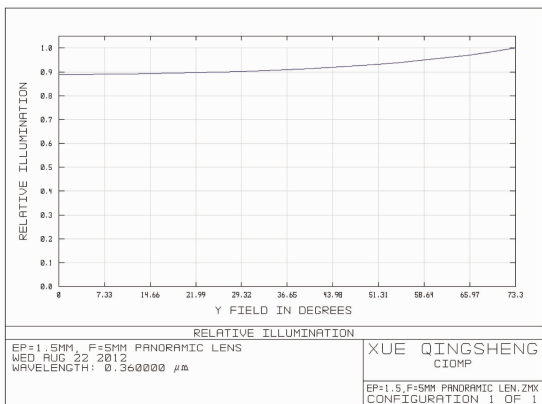


图 9 紫外全景成像仪像面相对照度曲线

Fig. 9 Relative illumination of UV panoramic imager

## 6 结 论

通过分析大气临边全景成像探测的原理, 根据空间大气遥感的应用要求, 设计了一个用于大气临边探

测的紫外全景成像仪光学系统, 视场为  $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$ , 相对孔径为 1:3.3, 可对 10~80 km 的大气临边进行  $360^\circ$  环形成像。根据应用条件, 计算了光学系统的指标要求, 并估算了系统的信噪比。提出了一种紫外全景成像仪光学设计思路, 利用桶形畸变和光阑像差改善像面照度的均匀性, 采用折反式结构完成了紫外全景成像仪光学系统设计, 光学系统传递函数在奈奎斯特频率 38.5 lp/mm 处大于 0.72,  $f-\theta$  畸变小于 0.05%, 像面照度均匀性达到 89%, 各项指标均满足设计要求, 并且结构紧凑, 适合空间大气探测应用, 对紫外全景成像仪的设计具有指导意义。

## 参 考 文 献

- Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1516~1521
- 薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1516~1521
- Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122001
- 吴雁, 唐义, 刘健鹏等. 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0122001
- Albert Fleig, Didier F. Rault. Ozone vertical profiles in the upper troposphere and stratosphere from OMPS limb sensor [C]. *SPIE*, 2011, **8177**: 81770A
- Didier F. Rault, Robert Spurr. The OMPS limb profiler instrument two-dimensional retrieval algorithm [C]. *SPIE*, 2010, **7827**: 78270P
- Michael G. Dittman, James Leitch, Michael Chrisp *et al.*. Limb broad-band imaging spectrometer for the NPOESS ozone mapping and profiler suite (OMPS) [C]. *SPIE*, 2002, **4814**: 120~130
- Chao Wang, Runhe Shi, Cong Zhou *et al.*. Comparison of SCIAMACHY and AIRS CO<sub>2</sub> measurements over China from 2003 to 2005[C]. *SPIE*, 2011, **8156**: 81560N
- Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 823~830
- 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
- Xiao Xiao, Yang Guoguang. A present and development of panoramic imaging technique [J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(4): 84~89
- 肖潇, 杨国光. 全景成像技术的现状和进展[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(4): 84~89
- Lu Haiping, Liu Weiqi, Kang Yusi *et al.*. Design of compact optical system in panoramic three-dimensional head mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0522002
- 卢海平, 刘伟奇, 康玉思等. 全景三维立体头盔显示光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0522002
- Jianguo Niu, Lawrence E. Flynn. South Atlantic anomaly filter for satellite UV observation [C]. *SPIE*, 2011, **8153**: 81531E
- Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong *et al.*. Discussion of illuminance formula in optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1364~1368
- 屈恩世, 张恒金, 曹剑中等. 对光学设计中照度公式的讨论[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1364~1368
- Wang Chao, Zhang Xin, Qu Hemeng *et al.*. Design of novel catadioptric elliptical dome optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0822002
- 王超, 张新, 曲贺盟等. 新型折反射式椭球形整流罩光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0822002

栏目编辑: 韩峰