

doi:10.3788/gzxb20154405.0522001

# 星载天底/临边大气紫外全景探测仪光学设计

薛庆生<sup>1</sup>, 李杨<sup>1</sup>, 段民征<sup>2</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

**摘要:**星载紫外全景探测仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求,根据天底和临边同时探测的研究目标,提出了一种天底视场和临边视场共像面的全新紫外全景探测仪光学系统结构,设计了一个中心波长 360nm、带宽 20nm、中心视场 10°、环形视场 360°×(70.31°~72.71°)、焦距 5mm、相对孔径 1/3.3 的全景探测仪光学系统.利用光学系统的畸变增加边缘视场的能量,同时利用光阑像差产生的有效像差渐晕来提高边缘视场的像面照度,边缘视场的相对照度达到 98% 以上.将天底视场光路和临边视场光路建立多重结构,利用 ZEMAX-EE 软件的多重结构优化功能同时优化设计天底视场光路和临边视场光路,设计结果表明,天底和临边视场的光学传递函数均大于 0.6@38.5lp/mm,满足设计指标要求,且体积和质量小,适合空间应用.

**关键词:**光学设计;全景探测仪;天底;临边;光阑像差

**中图分类号:**O433.1; TN744.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2015)05-0522001-6

## Optical Design of Space-based UV Panoramic Sounder for Nadir and Limb Viewing

XUE Qing-sheng<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, DUAN Min-zheng<sup>2</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 13033, China)

(2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Space-based atmospheric remote sensing urgently require UV panoramic imager. The research objective is sounding nadir and limb atmosphere simultaneously. Based on this research objective, a new optical system construction of UV panoramic imager is proposed, in which, the nadir Field of View (FOV) and limb FOV use a common image plane. An optical system of panoramic imager is designed, the central wavelength is 360nm, the bandwidth is 10nm, the nadir FOV is 10°, the limb FOV is 360°×(70.31°~72.71°), the focal length is 5mm, and the relative aperture is 1:3.3. The energy of margin FOV is increased by using the distortion of the optical system, and the image irradiance is increased by using the effective aberration vignetting caused by pupil aberration. The relative illumination of margin FOV is more than 98% of that of central FOV. The multi-configuration is established with the optical paths of nadir FOV and limb FOV. The optical paths of nadir FOV and limb FOV is optimized by using multi-configuration optimization function of ZEMAX-EE software. The design result shows that the MTF of nadir and limb FOV are both more than 0.6@38.5lp/mm, The design requirements are satisfied. The volume of the panoramic imager is small, and is suitable for application in space.

**Key words:** Optical design; Panoramic sounder; Nadir; Limb; Pupil aberration

**OCIS Codes:** 220.0220; 120.4820; 280.4788

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 41105014)和中科院长春光机所领域前沿创新项目资助

**第一作者:**薛庆生(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学设计、航空航天遥感成像光谱技术及光谱辐射定标. Email: qshxue2006@163.com

**收稿日期:**2014-12-01; **录用日期:**2015-02-16

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

空间紫外大气遥感是大气环境监测的重要手段之一,其原理是通过在紫外波段测量太阳光经大气散射和吸收的光谱辐射,并利用反演算法来反演臭氧、二氧化硫等大气成分分布信息<sup>[1~4]</sup>.空间紫外大气遥感按探测方式的不同分为天底探测方式、临边探测方式和掩星探测方式<sup>[5]</sup>.天底探测方式的空间覆盖范围大,临边和掩星探测方式的垂直分辨率高.天底探测方式和临边探测方式各有其优缺点,天底探测方式主要用于探测大气痕量气体的总量分布,临边探测主要用于探测大气痕量气体的分层廓线.综合利用天底探测方式和临边探测方式可实现探测数据互补,可以实现更好的科学观测目的.因此,将多种探测方式结合起来的多模式紫外大气遥感成为空间大气遥感领域的迫切需求<sup>[6]</sup>.

目前,国内外现有的紫外探测仪器多为单模式的探测仪器.采用天底探测方式的有:2004年,欧空局研制的臭氧监测仪(OMI)<sup>[7]</sup>,2008年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的FY-3紫外臭氧垂直探测仪(SBUVS)<sup>[8]</sup>;采用临边探测方式的有美国研制的臭氧绘图和廓线仪(OMPS)<sup>[9]</sup>和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的紫外临边成像光谱仪<sup>[10-11]</sup>.这些天底和临边紫外探测仪器在大气环境监测方面发挥了重要作用,但缺点是探测模式单一,临边探测的水平覆盖范围小,只对临边的某一方位进行探测,全球覆盖的时空代表性差,对中小尺度的大气成分变动特征和规律无法很好地揭示和表征.

为满足多模式空间大气成分探测的迫切需求,本文提出一种天底和临边大气同时探测的全新紫外全景探测仪光学系统,同时具备星下点 $10^\circ$ 和临边全方位观测能力.紫外全景探测仪采用 $360^\circ$ 全方位环形瞬时成像方式,不但具有很宽的水平覆盖范围和很高的垂直分辨率,因为具有环形重叠交叉观测能力,通过层析技术可提高水平空间分辨率.更进一步由于沿轨观测的多方位、多角度相互交叉,可实现比一般临边探测更高水平分辨率的层析反演,同时可以为军事领域所关注的临近空间提供三位立体的紫外辐射背景信息,为将来我国紫外预警提供大气背景辐射信息.

本文首先分析了天底和临边大气同时探测原理,根据应用要求,设计了一个临边视场和天底视场共像面的紫外全景探测仪光学系统,利用光学系统畸变和光阑像差产生有效像差渐晕提高了边缘视场的像面照度,利用光学设计软件ZEMAX-EE的多重结构优化功能同时完成了天底视场光路和临边视场光路的优化设计,设计结果满足指标要求,为下一步紫外全景探测仪的研制奠定了技术基础.

## 1 天底/临边大气全景探测原理

如图1所示,全景探测仪同时收集天底视场和临边视场的光辐射能量,天底视场(星下点)的入射光线在全景探测仪的像面中心形成一个圆斑,中心圆斑内的图像信号大小反映了星下点 $10^\circ$ 视角内大气辐射亮度分布.临边视场的入射光线在全景探测仪的像面边缘形成一个圆环.圆环的某一半径方向的图像信号的变化反映了该方位上大气亮度分布随临边高度的变化.圆环上每个同心圆上的图像信号的变化反映了同一临边高度上大气亮度分布随方位的变化.根据获得的大气辐射亮度分布信息,大气科学家可以利用反演算法反演出大气成分的时空分布信息,进一步可为大气动力学研究、大气化学过程研究、地球物理学研究等提供必要的观测数据信息.

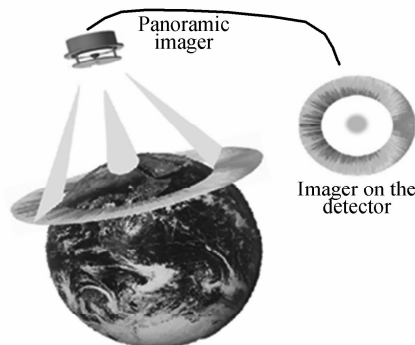


图1 天底/临边大气全景探测原理

Fig. 1 Schematic diagram of panoramic sounding nadir/limb atmosphere

## 2 主要技术指标

搭载紫外全景探测仪的卫星预计为低轨卫星,卫星飞行高度 $H=400\text{km}$ ,天底视场覆盖宽度 $GW=70\text{km}$ ,临边高度的探测范围为 $10\sim 90\text{km}$ ,临边水平方向的探测范围为 $360^\circ$ 全方位.中心波长取 $360\text{nm}$ ,带宽为 $20\text{nm}$ ,要求天底视场的像元分辨率 $GSD_1 \leq 1\text{km}$ ,临边视场的像元分辨率 $GSD_2 \leq 6\text{km}$ .由于工作在紫外波段,为了提高能量利用率,要求探测器在紫外波段具有高量子效率,因此,选择背照式紫外增强型CCD探测器,探测器像元数为 $1\text{K} \times 1\text{K}$ ,每个像元尺寸为 $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$ ,要求光学设计传函 $MTF \geq 0.5 @ 38.5\text{lp/mm}$ .

天底视场角 $FOV_1$ 为

$$FOV_1 = \arctan\left(\frac{GW}{2H}\right) = 10^\circ \quad (1)$$

紫外全景探测仪的临边视场中心对准地球临边 $50\text{km}$ 高度,仪器与临边观测点的距离为 $L=2150\text{km}$ ,再根据临边高度探测范围确定临边视场 $FOV_2$ 为 $360^\circ \times (70.31^\circ \sim 72.71^\circ)$ ,天底/临边观测示意图如图2所示.由天底视场的像元分辨率要求,确定全景探测仪

光学系统焦距为

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

由临边视场的像元分辨力的要求,确定全景探测仪光学系统焦距为

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

式中, $a=13\mu\text{m}$ ,为探测器的像元宽度.为保证天底视场和临边视场的像元分辨力均满足指标且留出一定余量,全景探测仪光学系统焦距 $f'$ 取 $5\text{mm}$ .地球天底/临边大气紫外光谱辐亮度模拟数据及 CCD 探测器的参数,确定系统的 $F$ 数为 $3.3$ ,即相对孔径为 $1:3.3$ .另外,为保证各个视场均获得较高的信噪比,要求全景探测仪的像面照度均匀性优于 $90\%$ ,光学系统主要技术指标汇总见表 1.

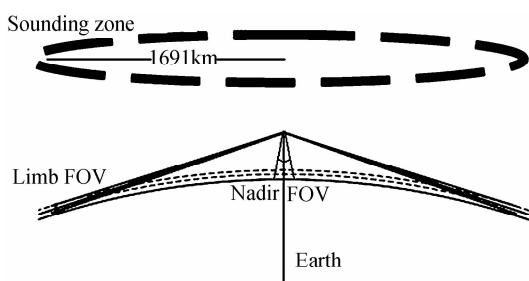


图 2 天底/临边观测示意图

Fig. 2 Viewing geometry of nadir / limb viewing

表 1 光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of optical system

Parameter	Value
Central wavelength	360nm
Waveband	20nm
Focal length	5mm
Limb FOV	$360^\circ \times (70.31^\circ \sim 72.71^\circ)$
Nadir FOV	$10^\circ$
Relative aperture	$1:3.3$
MTF	$\geq 0.5 @ 38.5\text{lp/mm}$
Relative illumination	$\geq 90\%$

### 3 全景探测仪光学设计方法

从光学系统技术指标要求可知,紫外全景探测探测系统的特点是:临边视场大,且要求天底视场和临边视场共像面,使用同一 CCD 探测器实现天底和临边大气同时探测;相对孔径大.大视场和大相对孔径的光学系统具有大信息容量,众多周知,光学系统的信息容量越大,设计难度越大.

临边视场的光线先经全景环形透镜成一虚像,中继转像透镜组再把所成的虚像进行二次成像在 CCD 探测器上,CCD 探测器前放置带通选择滤光片.图 3 为全景探测仪临边视场的光路图,全景环形透镜有 4 个工作表面,表面 1 和表面 4 为透射面,表面 2 为内反射

面,表面 3 的边缘区域为内反射面,表面 3 的中心区域为透射面,用于透射天底视场的光线,表面 2 和表面 4 具有相同的曲率半径.临边视场的光线从全景环境透镜的表面 1 入射,经表面 2 内反射后入射到表面 3 的边缘区域,经边缘区域内反射后,从表面 4 出射,进入中继转像透镜组,经中继转像透镜组和带通滤光片成像在 CCD 探测器上.

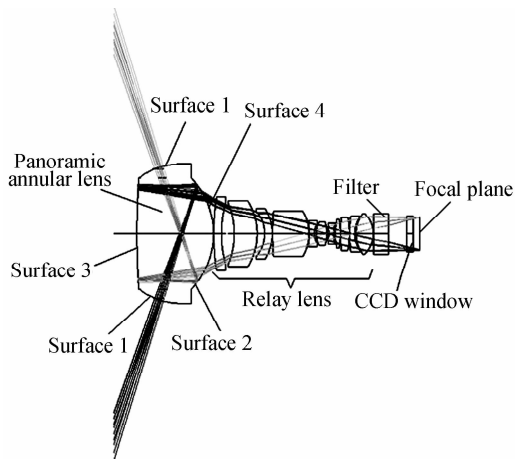


图 3 全景探测仪临边视场光路

Fig. 3 Optical path of limb FOV of Panoramic sounder

图 4 为天底视场光路图.天底视场的光线首先经过前置透镜组压缩光束口径,然后经全景环形透镜的表面 3 的中心区域进入全景环形透镜,经全景环形透镜从表面 4 出射进入中继转像透镜,经中继转像透镜组和带通滤光片成像在 CCD 探测器上.天底视场和临边视场共像面,共用全景环形透镜和中继转向透镜组.天底视场的光线经过的全景环形透镜的两个表面均为透射面,因此,对于天底视场而言,全景环形透镜可看作一个厚透镜.

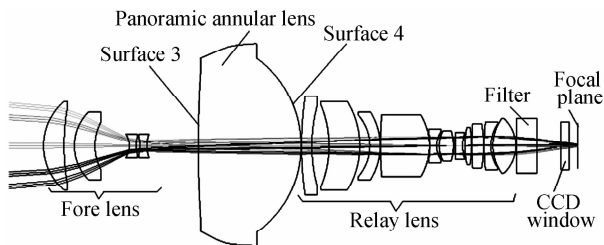


图 4 全景探测仪天底视场光路

Fig. 4 Optical path of nadir FOV of panoramic sounder

设计时要保证前置透镜组、全景环形透镜和中继转像透镜之间光瞳匹配,即前组的出瞳要与后组的入瞳匹配.另外还要保证前组出射的光束口径与后组入射的光束口径匹配、前组的像高与后组的物高匹配.

视场边缘的像面照度一般情况下按视场角 $\omega$ 的余弦的 4 次方下降<sup>[10]</sup>.本系统临边视场 $\omega$ 达到了 $72.71^\circ$ ,因此必须考并解决像面照度均匀性问题.紫外全景探测仪属于用 CCD 探测器凝视成像的光学仪器,本文利

用光学系统的畸变增加边缘视场的能量,即利用畸变使轴外视场的缩小倍率比轴上视场的缩小倍率大,使轴外一个 CCD 像元接收比轴上一个 CCD 像元更大的目标的光.本系统的视场大,像面照度均匀性要求高,只利用光学系统的畸变还不能满足像面照度均匀性的要求,因此,还需要利用光阑像差产生的有效像差渐晕来提高边缘视场的像面照度.

初级光阑像差可以表示为<sup>[12-13]</sup>

$$W_p = \frac{1}{8}V_{lp}(\eta^2 + \zeta^2)^2 + \frac{1}{2}V_{llp}(\eta y + \zeta z)(\eta^2 + \zeta^2) + \frac{1}{2}V_{mip}(\eta y + \zeta z)^2 + \frac{1}{4}(V_{mip} + V_{lvp})(\eta^2 + \zeta^2)(y^2 + z^2) + \frac{1}{2}V_{vp}(\eta y + \zeta z)(y^2 + z^2) \quad (4)$$

式中,  $V_{lp}$ 、 $V_{llp}$ 、 $V_{mip}$ 、 $V_{lvp}$  和  $V_{vp}$  分别为由光阑产生的球差、彗差、像散、场曲和畸变.  $\eta$ 、 $\zeta$  表示物面上一点坐标,  $y$ 、 $z$  表示光阑面上一点的坐标. 式(4)两边分别对  $\eta$  和  $\zeta$  进行微分并整理得到光阑垂轴几何像差为

$$nu_p(TA_\eta)_{\zeta=0} = \left(\frac{\partial W_p}{\partial \eta}\right)_{\zeta=0} = \frac{1}{4}V_{lp}\eta^3 + \frac{3}{2}V_{llp}\eta^2 y + V_{mip}\eta y^2 + \frac{1}{2}(V_{mip} + V_{lvp})(y^2 + z^2)\eta + \frac{1}{2}V_{vp}(y^2 + z^2)y \quad (5)$$

$$nu_p(TA_\zeta)_{\eta=0} = \left(\frac{\partial W_p}{\partial \zeta}\right)_{\eta=0} = \frac{1}{2}V_{lp}\eta^2 z + V_{mip}\eta y z + \frac{1}{2}V_{vp}(y^2 + z^2)z \quad (6)$$

从式(5)和式(6)可知,利用光阑彗差  $V_{mip}$  可以提高轴外视场的光能量,这时使轴外视场的光阑倍率要比轴上视场的光阑倍率大,这样,通过轴外视场的入射光实际口径要比轴上入射光口径大.此时,实际像面照度可表示为

$$E'(\omega) = E'_0 \frac{S_\omega}{S_0} \cos^4 \omega \quad (7)$$

式中,  $E'_0$  为中心视场的像面照度,  $S_\omega$  为轴外视场的光束口径,  $S_0$  为轴上视场的光束口径.

## 4 设计结果

分别将天底视场光路和临边视场光路在光学设计软件 ZEMAX-EE 中建立多重结构,组合成紫外全景探测仪光学系统,全景环形透镜、中继透镜组、带通滤光片和像面为天底视场和临边视场共用. 中继透镜组采用三片型的复杂化结构,前置透镜组由两片正透镜和两片负透镜组成,用于压缩进入全景环形透镜的入射光线角度. 利用 ZEMAX-EE 软件的多重结构优化功能同时优化天底视场光路和临边视场光路,使天底视场

和临边视场均获得良好的成像质量. 图 5 为紫外全景探测仪光学结构图,图 6 为天底视场的光学传函(MTF)曲线,可以看出天底视场  $MTF \geq 0.63 @ 38.5lp/mm$ ,图 7 为临边视场的光学传函(MTF)曲线,临边视场  $MTF \geq 0.60 @ 38.5lp/mm$ ,天底视场和临边视场均满足  $MTF \geq 0.50 @ 38.5lp/mm$  的指标要求. 最大光学通光口径为  $\Phi 54\text{ mm}$ ,系统长度为 155mm,体积小,结构紧凑,重量约为 2kg.

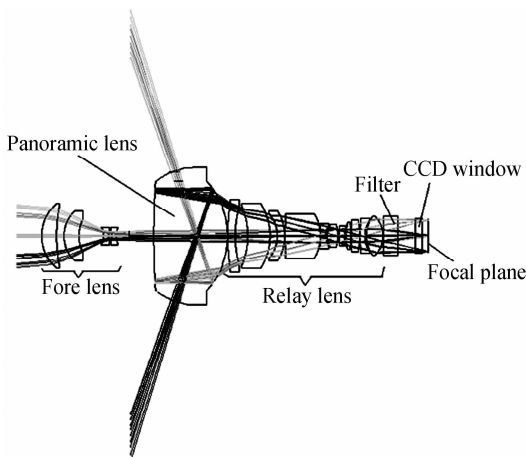


图 5 紫外全景探测仪光学结构图

Fig. 5 Optical scheme of UV panoramic imager

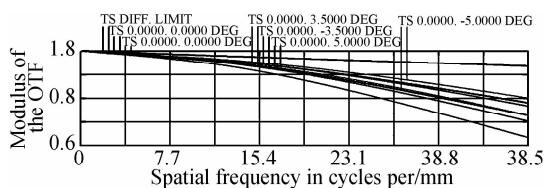


图 6 天底视场光学传递函数曲线图

Fig. 6 MTF Curve of nadir FOV

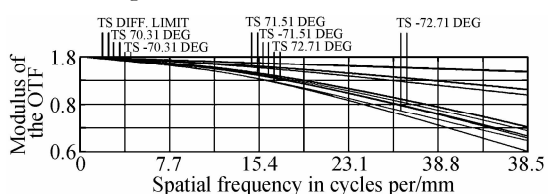


图 7 临边视场光学传递函数曲线

Fig. 7 MTF curve of limb FOV

紫外全景探测仪的畸变如图 8 所示,系统的  $f-\theta$  畸变控制在 4.1% 以内,在畸变曲线给定的条件下,容易标定像点位置与视场角  $\omega$  之间的关系. 为了产生大量的光阑像差来提高轴外视场的光能量,在光学设计软件中,把渐晕系数设为负值,在优化设计时,利用反复迭代的方法来标定主光线,保证各视场的主光线都通过孔径光阑的中心,各个视场的边缘光线都通过孔径光阑的边缘.

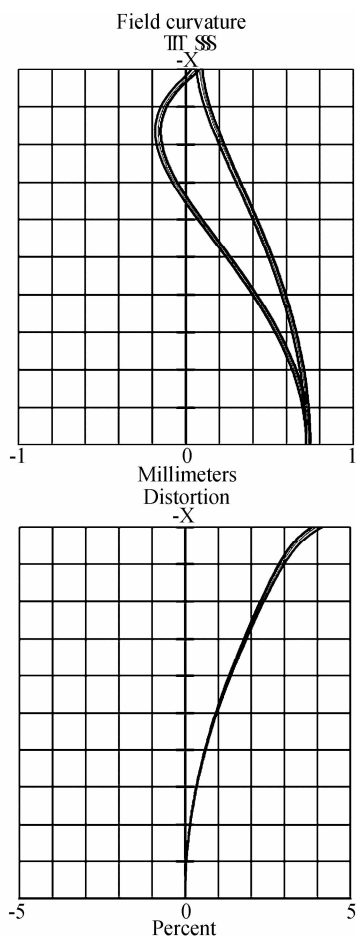
图8 全景探测仪临边视场  $f-\theta$  畸变曲线Fig. 8  $f-\theta$  distortion of limb FOV of panoramic sounder

表2给出了临边视场的渐晕系数,从表2可以看出,临边视场的渐晕系数均为负值,且视场越大,负渐晕越大.这表明,视场越大,入射光实际口径越大,从而达到提高边缘视场能量的目的.图9为像面上相对照度分布曲线,由图可知,边缘视场照度为中心视场照度的98%,满足像面照度均匀性大于98%的指标要求.

表2 临边视场渐晕系数

Table 2 Vignetting factors of limb FOV

FOV	+Y	-Y
70.31°	-2.1324	-1.9329
-70.31°	-1.9329	-2.1324
71.51°	-2.4237	-2.2070
-71.51°	-2.2070	-2.4237
72°71	-2.8122	-2.6142
-72.71°	-2.6142	-2.8122

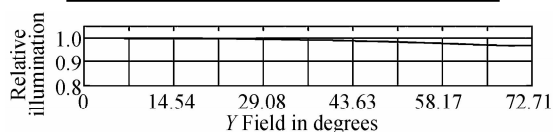


图9 像面上相对照度曲线

Fig. 9 Relative illumination curve on the image plane

本文设计的紫外全景探测仪的水平视场为 $360^\circ$ ,目前国际最先进的临边探测仪OMPS的水平方向视场为3个 $0.02^\circ$ 的窄视场,探测区域为对应临边水平方向的3个窄条,3个窄条间距250km,也没有 $360^\circ$ 环形探测的能力.可以看出,本文设计的紫外全景探测仪在临边水平方向覆盖范围上具有明显优势.

## 5 结论

对天底/临边大气全景探测原理进行了分析,提出了一种天底视场和临边视场共像面的全新紫外全景探测仪光学系统结构,利用光学系统的畸变增加边缘视场的能量,同时利用光阑像差产生的有效像差渐晕来提高边缘视场的像面照度,边缘视场的相对照度达到98%以上.将天底视场光路和临边视场光路建立多重结构,利用ZEMXA-EE软件的多重结构优化功能同时优化设计了天底视场光路和临边视场的光路,设计结果表明,天底和临边视场的光学传递函数均大于0.6@38.5lp/mm,满足设计指标要求,且具有体积小和质量小的特点,适合空间应用,为下一步全景探测仪的研制奠定了技术基础.本文设计的大气紫外临边探测仪采用的是目前课题组现有的紫外增强型E2VCCD 47-20,像元数 $1024 \times 1024$ ,像元尺寸: $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$ ,探测器光敏区的面积为 $13.3\text{mm} \times 13.3\text{mm}$ ,由于该探测仪器的视场大,受探测器光敏区面积的限制.目前,该系统的焦距为5mm,将来,引进更大面阵的探测器后,系统的焦距还可进一步增大,从而,天底和临边方向的空间像元分辨率还可进一步提高.

### 参考文献

- [1] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne broadband limb sounder for detecting atmospheric trace gas [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 631-637.  
薛庆生. 星载大气痕量气体临边探测仪光学设计 [J]. 光子学报, 2012, **41**(6): 631-637.
- [2] QIAN Lu-lu, XIANG-LI Bin, LÜ Qun-bo, et al. Analysis and simulation of effect of spectral line bending on computational imaging spectrometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 897-901.  
钱璐璐, 相里斌, 吕群波, 等. 谱线弯曲对计算光谱成像影响的分析与仿真 [J]. 光子学报, 2013, **42**(8): 897-901.
- [3] ZHENG Yu-quan, GAO Zhi-liang. Optical system design of CO<sub>2</sub> sounder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(12): 2645-2653.  
郑玉权, 高志良. CO<sub>2</sub> 探测仪光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2012, **20**(12): 2645-2653.
- [4] CHEN Wei, XUE Chuang. Design of wide field-of-view three-mirror telescope for imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 950-955.  
陈伟, 薛闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计 [J]. 光子学报, 2013, **42**(8): 950-955.
- [5] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong. Optical design of UV panoramic imager for atmospheric sounding in limb view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **33**(4): 0422001.  
薛庆生, 王淑荣. 用于大气临边探测的紫外全景成像仪光学设计

- 计[J]. 光学学报, 2013, **33**(4): 0422001.
- [6] XUE Qing-sheng. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for space-based atmospheric remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(8): 0822005.  
薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, **34**(8): 0822005.
- [7] JOHAN D V, GIJSBERTUS H J, VAN D O, *et al.* Ozone monitoring instrument (OMI) [C]. SPIE, 2002, 4480: 315-325.
- [8] WANG Shu-rong, LI Fu-tian, SONG Ke-fei. Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2590-2593.  
王淑荣, 李福田, 宋克非, 等. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2590-2593.
- [9] Glen Jaross, Grace Chen, Mark Kowitt, *et al.* Suomi NPP OMPS limb profiler initial sensor performance assessment [C]. SPIE, 2012, 8258: 825805-1~825805-9.
- [10] XUE Qing-sheng. Design and study of limb sounder of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 271-277.  
薛庆生. 空间遥感大气痕量气体临边探测仪设计与研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(3): 271-277.
- [11] XUE Qing-sheng, Duan Min-zheng. Development of limb imaging spectrometer for atmospheric trace gas sounding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(5): 0522001.  
薛庆生, 段民征. 用于大气痕量气体探测的临边成像光谱仪[J]. 光学学报, 2013, **33**(5): 0522001.
- [12] QU En-shim, ZHANG Heng-jin, CAO Jian-zhong, *et al.* Discussion of illuminance format 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.
- [13] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, CHEN Wei. Development of spaceborne wide-angle aerosol imager with low-distortion and uniform image surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 456-461.  
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.