

基于一种透镜材料的宽谱段紫外成像仪光学设计

李寒霜¹, 李 博^{1*}, 李昊晨², 林冠宇¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 紫外探测技术已广泛应用于人类生产生活的各个方面, 宽谱段紫外成像仪系统的研究具有重要意义。本文通过推导色差理论公式, 提出了单一透镜材料的宽谱段紫外成像仪光学系统色差校正方案。结合高灵敏度大动态紫外成像探测器的性能指标要求, 设计了仅一种透镜材料且所有透镜均为球面的 210~400 nm 宽谱段紫外成像仪光学系统, 并运用光学设计软件 CODE V 进行系统优化及像质评价。结果表明: 在奈奎斯特频率 40 lp/mm 下, 全视场全波段系统的调制传递函数优于 0.6, 系统点列图 $RMS < 7.8 \mu m$, 具有良好的成像质量。该系统不含非球面等光学元件, 不仅易于加工装调, 而且降低了研制成本, 该方法将为宽谱段紫外成像光谱仪的设计奠定技术基础。

关键词: 紫外成像仪; 宽谱段; 光学设计; 色差校正

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0127

Optical design of a wide-spectrum ultraviolet imager based on a single material

LI Han-shuang¹, LI Bo^{1*}, LI Hao-chen², LIN Guan-yu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: libo0008429@163.com

Abstract: Ultraviolet detection technology is widely used in various fields of production and human life. It is thus greatly significant to study wide-spectrum ultraviolet (UV) imager systems. Through deducing the theoretical formula of chromatic aberration, a scheme for correcting the chromatic aberration of the optical system of the wide-spectrum UV imager with the lenses made of single material was proposed. Combined with the performance index of a high-sensitivity dynamic UV imaging detector, the optical system of the 210~400 nm wide-spectrum UV imager with only one lens material and all lenses being spherical was designed. The optical design software CODE V was used to optimize the system and evaluate the image quality. The results demonstrate that the Modulation Transfer Function (MTF) in the entire field of view and waveband of the system is better than 0.6 at the Nyquist frequency of 40 lp/mm and $RMS < 7.8 \mu m$. Thus, the system has good

收稿日期: 2021-06-05; 修订日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62005268)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62005268)

imaging quality. The system does not contain aspheric optical elements, which makes it not only easy to process and assemble, but also reduces its cost and lays a technical foundation for the development of a wide-spectrum UV imaging spectrometer.

Key words: ultraviolet imager; wide spectrum; optical design; chromatic correction

1 引言

紫外探测技术作为一项成熟的技术,已受到各国的广泛关注。该技术广泛应用于空间大气遥感探测、天文紫外星体观测、环境监测、海洋溢油污染监测、武器告警、武器预警、公安侦查以及电力巡线等领域,其对军事应用及人类的生产生活均具有重要的指导意义^[1-6]。紫外波段涵盖 10~400 nm 的光谱范围,介于可见光与 X 射线之间,小于 200 nm 波段的紫外光谱辐射容易被大气吸收,定义为真空紫外-极紫外波段,200~400 nm 波段的紫外光谱辐射可用于大气窗口探测,是目标探测的重要波段。

为了提高对目标的探测能力,并获取目标的不同特征,成像仪一般要求宽谱段或多波段,因此,宽谱段光学系统具有更广泛的应用空间。但随着谱段变宽,光学系统的色差校正变得更具挑战性。由于紫外波段可供选择的光学透镜材料较少,尤其是考虑到实际应用中光学材料的理化性能、加工性能及抗辐射性能,并且波长越短,光学材料的色散越大,这使得光学系统的像差校正,特别是色差校正,相比可见/红外波段光学系统难度增大,相关文献^[7-10]对紫外成像仪的色差校正,均采用两种或两种以上光学材料。

本文基于色差校正理论,采用折反射式光学系统^[11-12],设计了仅一种透镜材料且所有透镜全部为球面波段范围为 210~400 nm 宽谱段紫外成像仪,该成像仪在奈奎斯特频率 40 lp/mm 下,全视场全波段系统的调制传递函数优于 0.6,接近衍射极限,具有良好的成像质量,该系统的设计方案将为宽谱段成像光谱仪的设计提供参考。

2 宽谱段紫外成像仪系统技术指标

紫外探测器是紫外探测技术实现的基础,由

于紫外目标信号很弱,而观测的动目标速度极快,故停留在像元内的积分时间很短,使得常规探测器 CCD 及 CMOS 观测的目标在紫外波段的信噪比小,因此,紫外成像探测器无法使用常规 CCD 或 CMOS 探测器。本系统采用英国 E2V 公司生产的电子倍增型 CCD,不仅满足对微弱光的成像要求,而且具有极高的探测灵敏度及大动态范围,其像素为 1024 pixel×1024 pixel,像元尺寸为 $a=13\ \mu\text{m}$ 。

宽谱段紫外成像仪的主要指标如表 1 所示,该成像仪为卫星搭载对动目标进行探测,其空间分辨率要求 $GSD=30\ \text{m}$,在轨轨道高度 $s=760\ \text{km}$,由此可得到紫外成像仪的系统焦距约为 $f=330\ \text{m}$ 。根据紫外波段的能量及估计的光学系统传输效率,取光学系统的相对孔径 $D/f=1/6.6$,则系统的入瞳直径 $D=50\ \text{mm}$ 。由探测器给出的数据指标,可得到探测器像面约为 13.3 mm,则探测器像面的对角线尺寸 $h\approx 18.82\ \text{mm}$,根据视场角 $\tan \theta = h/f$,从而得到紫外成像仪的全视场为 3.2° ,这里取视场角 2.2° 。为实现紫外宽谱段探测的需求,选取紫外波段且不被大气所吸收的谱段,波段范围取 210~400 nm。

表 1 宽谱段紫外成像仪系统参数

Tab. 1 Parameters of wide-spectrum UV imaging system

项目	参数
轨道高度/km	760
空间分辨率/m	30
系统入瞳直径/mm	50
系统焦距/mm	330
系统F数	$F/6.6$
视场角/(°)	2.2
光谱范围/nm	210~400
像素/pixel	1024×1024
像元尺寸/ μm	13

3 宽谱段紫外成像仪光学系统设计

3.1 色差校正理论

通常用两种指定波长光线的像平面位置之差表示轴向色差,用两种指定波长光线在同一像面上主光线的透射点高度之差表示垂轴色差;最常用的是波长为 486.13 nm 的 F 光和波长为 656.28 nm 的 C 光。

轴向色差,一般用 C 和 F 两种颜色光线的像面间距离 $\Delta l'_{FC}$ ($\Delta l'_{FC} = l'_F - l'_C$) 表示。

从单个折射球面的色差公式进而推导透镜组的色差公式,单个折射面如图 1 所示。其中, n 为物方折射率, n' 为像方折射率, i 为近轴光线入射角, i' 为近轴光线折射角, u 为近轴光线物方孔径角, u' 为近轴光线像方孔径角^[13]。

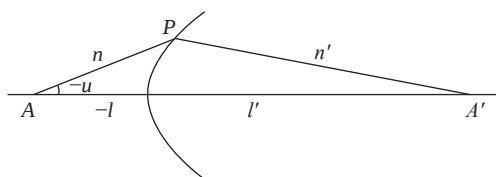


图1 折射面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the refractive surface

对于轴上某一物点 A , 通过球面折射成像, 可根据共轭点方程有:

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}, \quad (1)$$

其中 r 为单个折射球面的半径。

对于 C 、 F 光线, 折射率 n_F 、 n_C 、 n'_F 、 n'_C 不同, 对应的像距 l'_F 、 l'_C 也不同, 将其分别带入式 (1) 得:

$$\frac{n'_F}{l'_F} - \frac{n_F}{l_F} = \frac{n'_F - n_F}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{n'_C}{l'_C} - \frac{n_C}{l_C} = \frac{n'_C - n_C}{r}. \quad (3)$$

式 (2) 与式 (3) 相减并假定 $l_F = l_C = l$, 即物点没有色差, 可得到:

$$\frac{n'_F l'_C - n'_C l'_F}{l'_F \times l'_C} - \frac{n_F - n_C}{l} = \frac{(n'_F - n'_C) - (n_F - n_C)}{r}. \quad (4)$$

令 $l'_F - l'_C = \Delta l'_{FC}$, $n'_F - n'_C = \delta n'$, $n_F - n_C = \delta n$, 代入

式 (4), 得:

$$\frac{n'_C \Delta l'_{FC}}{l'_F l'_C} = \delta n' \left(\frac{1}{l'_F} - \frac{1}{l'_C} \right) - \delta n \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{r} \right). \quad (5)$$

对式 (5) 作如下近似: $l'_F l'_C = l'^2$, $n'_C = n'$, $l'_F = l'$, 并在式 (5) 两端乘 h^2 , 利用近轴公式 $\frac{h}{l'} = u'$, $h \left(\frac{1}{l'} - \frac{1}{r} \right) = -i'$, $h \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{r} \right) = -i$, 得到

$$n' u'^2 \Delta l'_{FC} = -h n' i' \left(\frac{\delta n'}{n'} - \frac{\delta n}{n} \right). \quad (6)$$

式 (6) 即为单个折射球面的初级轴向色差公式, 则共轴系统的初级轴向色差贡献量:

$$[\Delta l'_{FC}] = \Delta l'_{FC} \alpha = \frac{-1}{n'_k u_k^2} h n' i' \left(\frac{\delta n'}{n'} - \frac{\delta n}{n} \right), \quad (7)$$

其中 $\alpha = \frac{n' u'^2}{n'_k u_k^2}$, 为某一折射面的像空间到系统最后像空间的轴向放大率; 则共轴球面系统初级轴向色差为各个面初级轴向色差贡献量之和, 即:

$$\Delta l'_{FCk} = \sum_1^k [\Delta l'_{FC}] = \frac{-1}{n'_k u_k^2} \sum_1^k h n' i' \left(\frac{\delta n'}{n'} - \frac{\delta n}{n} \right). \quad (8)$$

同理可得到初级垂轴色差:

$$\Delta y'_{FCk} = \sum_1^k [\Delta y'_{FC}] = \frac{-1}{n'_k u_k^2} \sum_1^k h n' i' \left(\frac{\delta n'}{n'} - \frac{\delta n}{n} \right) \frac{i'_z}{i'}, \quad (9)$$

其中 i'_z 为主光线的折射角; $\frac{i'_z}{i'} = \frac{h_z}{h} + \frac{J}{h n' i'}$ (J 为拉赫不变量)。

利用 S_{IS} 和 S_{IIS} 表示轴向色差和与垂轴色差和, 即:

$$S_{IS} = -n'_k u_k^2 \Delta l'_{FCk} = \sum_1^k h n' i' \left(\frac{\delta n'}{n'} - \frac{\delta n}{n} \right), \quad (10)$$

$$S_{IIS} = -n'_k u_k^2 \Delta y'_{FCk} = \sum_1^k h n' i' \left(\frac{\delta n'}{n'} - \frac{\delta n}{n} \right) \frac{i'_z}{i'}. \quad (11)$$

由关系式 $u' - u = -(i' - i) = -ni \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \right)$ 得到

$$ni = n' i' = \frac{-\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}}, \quad (12)$$

其中 $\Delta u = u' - u$, $\Delta \frac{1}{n} = \frac{1}{n'} - \frac{1}{n}$, 得到

$$S_{IS} = - \sum h \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{\delta n}{n}, \quad (13)$$

$$S_{IIS} = - \sum h_z \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{\delta n}{n} + J \sum \Delta \frac{\delta n}{n}. \quad (14)$$

以薄透镜为例推导色差公式, 假设透镜玻璃的折射率为 n , 色散为 δn , 则有 $n_1=1$, $n'_1=n_2=n$, $n'_2=1$, $\delta n_1=0$, $\delta n'_1=\delta n_2=\delta n$, $\delta n'_2=0$, 且 $u'_1=u_2$ 。将和式对透镜的两个面展开, 并代入以上关系得

$$\sum \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{\delta n}{n} = \frac{u'_1 - u_1}{\frac{1}{n} - 1} \frac{\delta n}{n} + \frac{u'_2 - u_2}{1 - \frac{1}{n}} \left(-\frac{\delta n}{n} \right), \quad (15)$$

即

$$\sum \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{\delta n}{n} = -(u'_2 - u_1) \frac{\delta n}{n-1} = -h\varphi \frac{\delta n}{n-1}. \quad (16)$$

式中 φ 为透镜的光焦度, $\frac{\delta n}{n-1}$ 利用色散 ν 的倒数 ($\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$); 得到

$$\sum \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{\delta n}{n} = -\frac{h\varphi}{\nu}. \quad (17)$$

其中透镜的光焦度 $\varphi = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$, r_1 和 r_2 为透镜两个面的曲率半径, 则有

$$S_{IS} = h^2 \sum \frac{\varphi}{\nu}, \quad (18)$$

$$S_{IIS} = hh_z \sum \frac{\varphi}{\nu}. \quad (19)$$

由以上可知, 利用单一材料并通过合理的光焦度及透镜个数分配, 可将系统色差降到最低。

3.2 系统设计结果与分析

熔融石英具有优良的光谱特性, 在 $0.2 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 具有高度透明性; 耐高温、热膨胀系数小, 其具有极高的热稳定性, 可在经受瞬时高温及突然冷却等剧烈温度变化时不致炸裂; 化学稳定性好, 表面不易受潮湿大气及化学试剂的腐蚀; 机械性能高, 表面耐磨性能好, 不易被划伤。因此, 熔融石英玻璃作为遥感仪器的首选光学材料, 本系统光学材料选用德国贺利氏公司生产的熔融石英。

光学系统构采用马克苏托夫系统为初始结构, 第一片透镜为球面构成的弯月形透镜, 主内反射镜及次内反射镜由透镜和反射面结合而成, 该系统不仅可以校正系统像差, 同时, 可缩短长焦距, 有利于缩小仪器的体积并减小仪器的重量。

根据上述光学系统指标及色差校正理论, 结合高灵敏度大动态紫外成像探测器性能指标, 设计了仅一种透镜材料且所有透镜全部为球面的宽谱段紫外成像仪光学系统。

将各个透镜及内反射镜的曲率半径、厚度及每片镜子之间的间距均设置为变量, 同时, 在系统优化的过程中根据实际情况设置边界条件: 第一片透镜与主内反射镜的间距 $d_1 (60 \text{ mm} < d_1 < 90 \text{ mm})$, 次内反射镜与滤光片的间距 $d_2 (d_2 > 80 \text{ mm})$, 系统焦距 $f=330 \text{ mm}$ 。

优化后其光学系统二维及三维光路图如图 2 和图 3 所示, 由两块内反射镜、两块透镜、滤光片及探测器组成, 其中第一块内反射镜为主镜, 设置光阑以承担相应的视场。

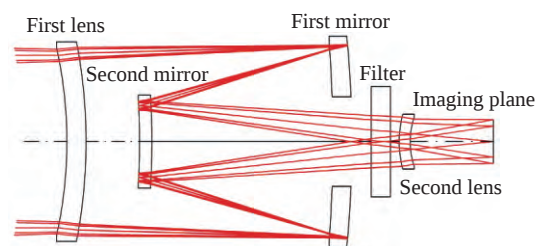


图 2 紫外成像系统二维光路图

Fig. 2 Two-dimensional light path diagram of the UV imaging system

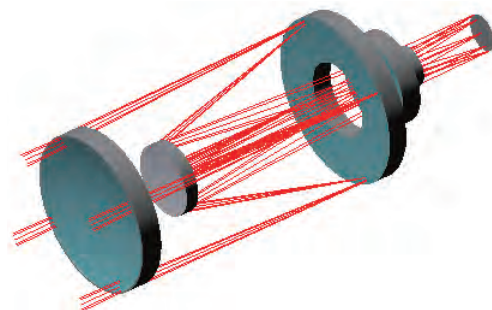
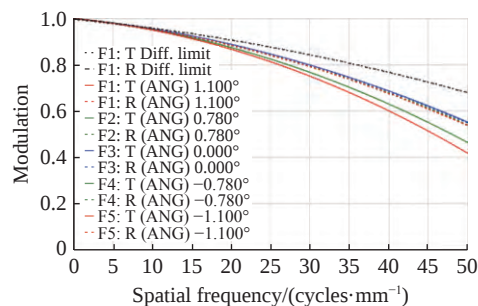


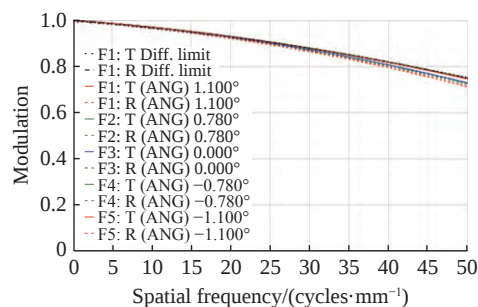
图 3 紫外成像仪三维光路图

Fig. 3 Three-dimensional light path diagram of UV imaging system

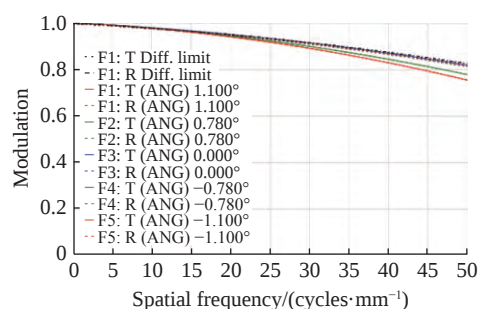
利用光学设计软件 CODE V 对系统进行优化后, 系统的 MTF 如图 4 所示 (彩图见期刊电子版)。



(a) 400 nm 处 MTF 曲线
(a) MTF curve at 400 nm



(b) 300 nm 处 MTF 曲线
(b) MTF curve at 300 nm



(c) 210 nm 处 MTF 曲线
(c) MTF curve at 210 nm

图 4 系统各波段 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF curve of the system in each band

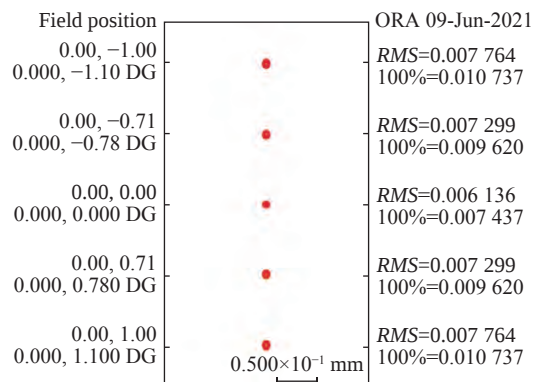
由图 4 可得出在奈奎斯特频率 40 lp/mm 下, 系统各视场各波段的调制传递函数均优于 0.6, 接近衍射极限, 满足探测器像元要求。

优化后系统的 RMS 如图 5(彩图见期刊电子版)所示, 紫外成像仪系统在全波段全视场条件下 $RMS < 7.8 \mu m$ 。

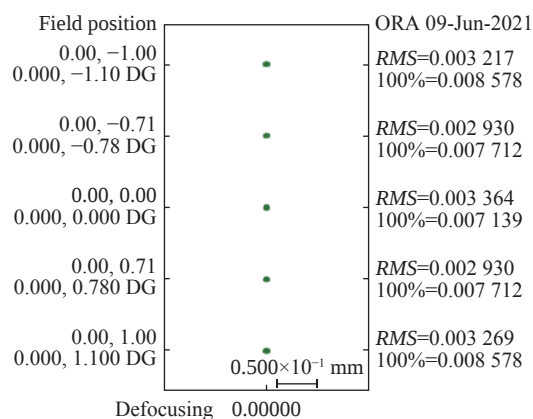
在相同的视场情况下, RMS 随波长增加逐渐增大。

系统的径向能量分布如图 6 所示(彩图见期刊电子版)。

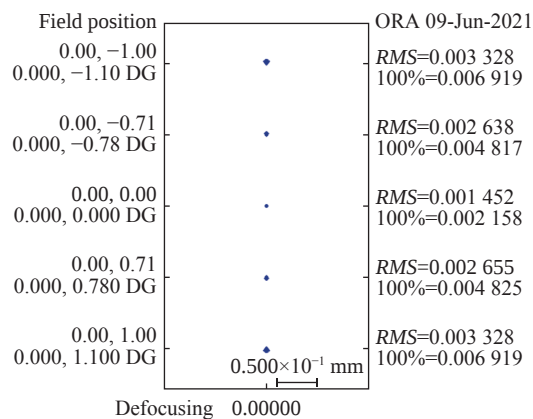
由图 6 可得到横轴坐标最大值为 $11 \mu m$, 小于探测器单个像元尺寸 $13 \mu m$, 系统像面的能量分布合理, 可以良好地衔接探测器, 输出信号可被



(a) 400 nm 处 RMS 点列图
(a) RMS point diagram at 400 nm



(b) 300 nm 处 RMS 点列图
(b) RMS point diagram at 300 nm



(c) 210 nm 处 RMS 点列图
(c) RMS point diagram at 210 nm

图 5 系统各波段 RMS 点列图

Fig. 5 RMS point diagram of the system in each band

探测器正常接收。

综合以上数据信息, 紫外成像仪系统在全波段全视场条件下 $RMS < 7.8 \mu m$, 系统调制传递函数优于 0.6, 接近衍射极限, 具有良好的成像质量。

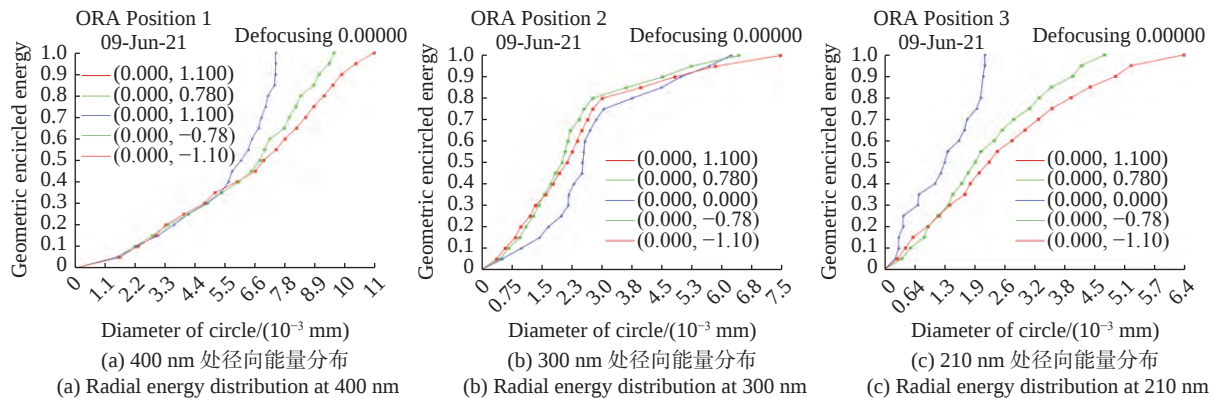


图 6 系统各波段径向能量分布图

Fig. 6 Radial energy distribution of the system in each band

4 结 论

针对实际应用中紫外波段可供选择的光学透镜材料少,尤其是紫外宽谱段光学系统色差难以校正的难题。本文从色差校正理论着手,设计了仅采用一种透镜材料且所有透镜全部为球面镜的 210~400 nm 宽谱段紫外成像仪光学系统,并对系统进行优化及像质评价,结果表明:在奈奎斯特

频率 40 lp/mm 下,全视场全波段系统调制传递函数优于 0.6,接近衍射极限,满足探测器像元要求;系统点列图 $RMS < 7.8 \mu m$,具有良好的成像质量。该系统不含非球面等光学元件,不仅降低了加工装调难度,并且缩短了研制周期、节省成本。该成像仪将用于地面验证试验,所采集的大气背景数据将为宽谱段紫外成像光谱仪的设计奠定基础。

参考文献:

- [1] XUE Q SH, YANG B, TIAN ZH T, *et al.*. Spaceborne limb hyperspectral imager for ozone profile detection[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31348-31361.
- [2] WANG X H, XUE Q SH. Optical system design of an atmospheric detector with nadir view and omnidirectional limb view[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(26): 7454-7461.
- [3] 崔穆涵, 田志辉, 周跃, 等. 大相对孔径紫外成像仪光学系统设计[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 212-218.
CUI M H, TIAN ZH H, ZHOU Y, *et al.*. Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 212-218. (in Chinese)
- [4] 丛海芳, 王春晖, 王宇. 宽波段高分辨率小型紫外成像光谱仪光学系统研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(2): 562-566.
CONG H F, WANG CH H, WANG Y. Study on an optical system of small ultraviolet imaging spectrometer with high resolution in broadband[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(2): 562-566. (in Chinese)
- [5] 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[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0422001.
XUE Q SH, WANG SH R. Optical design of UV panoramic imager for atmospheric sounding in limb view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422001. (in Chinese)
- [6] 于磊, 林冠宇, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122001.
YU L, LIN G Y, YU X Y. Optical system of far ultraviolet imaging spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122001. (in Chinese)
- [7] 张宗存, 丁学专, 杨波, 等. 轻小型宽谱段紫外高光谱成像仪光学系统设计[J]. *红外技术*, 2017, 39(4): 304-308.
ZHANG Z C, DING X ZH, YANG B, *et al.*. Optical system design for compact wide spectrum of ultraviolet hyperspectral imager[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(4): 304-308. (in Chinese)
- [8] 徐苗, 梁秀玲. 中长焦透射式日盲紫外光学系统设计[J]. *光学仪器*, 2017, 39(2): 43-47.
XU M, LIANG X L. Optical design of long transmission type solar blind ultraviolet system[J]. *Optical Instruments*,

- 2017, 39(2): 43-47. (in Chinese)
- [9] 王嘉明. 日盲紫外信号目标模拟器光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2016: 10-12.
WANG J M. Optical design of solar blind ultraviolet signal target simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 10-12. (in Chinese)
- [10] 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.
WU Y, TANG Y, LIU J P, *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0122001. (in Chinese)
- [11] 吕博, 冯睿, 寇伟, 等. 折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 822-831.
LÜ B, FENG R, KOU W, *et al.*. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 822-831. (in Chinese)
- [12] 张佳伦, 郑玉权, 蔺超, 等. 消像散的自由曲面棱镜光谱仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 842-851.
ZHANG J L, ZHENG Y Q, LIN CH, *et al.*. Design of a freeform curved prism imaging spectrometer based on an anastigmatism[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 842-851. (in Chinese)
- [13] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 76-79.
YUAN X C. *Optical Design*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 76-79. (in Chinese)

作者简介:



李寒霜(1987—), 女, 吉林四平人, 博士, 助理研究员, 2019年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事紫外遥感仪器设计及辐射定标方面的研究。E-mail: lihanshuang06@163.com



李博(1981—), 男, 吉林梨树人, 博士, 副研究员, 2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事高光谱遥感仪器总体设计方面的研究。E-mail: libo0008429@163.com