

# 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计

吴 雁 唐 义\* 刘健鹏 张止戈 倪国强

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 基于 Czerny-Turner 分光结构的成像光谱仪光学系统, 介绍了一种用于电离层观测的远紫外成像光谱仪光学系统设计方法。分析了该结构的像差来源, 提出了使用发散光照明光路的消像差方法, 计算了像差校正条件。设计了工作在 120~180 nm 波长范围内的远紫外成像光谱仪光学系统, 视场角为  $6.0^\circ \times 0.1^\circ$ , 焦距为 121.8 mm,  $F$  数为 6.2。利用调制传递函数(MTF)和成像仿真分析的方法对该系统的主要性能参数进行了评价, 验证了设计的成像光谱仪的光谱分辨力优于 1.0 nm, 空间分辨力优于  $0.1^\circ$ , 完全满足电离层观测的应用要求。与同类设计相比, 该系统不含非球面光学元件, 加工装调简单且易于工程实现。

**关键词** 遥感; 成像光谱仪; Czerny-Turner 结构; 发散光照明; 远紫外

中图分类号 O433.1; TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0122001

## Optics Design of Far Ultraviolet Imaging Spectrometer for Ionosphere Remote Sensing

Wu Yan Tang Yi Liu Jianpeng Zhang Zhige Ni Guoqiang

(Key Laboratory of Photo-Electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Using Czerny-Turner structure as the beam splitter a new optical design method of far ultraviolet imaging spectrometer used to get ionosphere data is presented. A source of aberration is analyzed. The method of aberration correction based on divergent illumination is proposed, which the imaging spectrometer is designed by. The wavelength range, field of view, focal length and  $F$  number, respectively, are from 120 to 180 nm,  $0.1^\circ \times 6.0^\circ$ , 121.8 mm and 6.2. The designed system is evaluated by modulation transfer function (MTF) and imaging simulation. Its spectral resolution is better than 1.0 nm and its spatial resolution is better than  $0.1^\circ$ , which can meet with the requirements of ionosphere observation. Without any aspherical mirror, the optics is easy to manufacture.

**Key words** remote sensing; imaging spectrometer; Czerny-Turner structure; divergent illumination; far ultraviolet (FUV)

**OCIS codes** 220.4830; 120.4570; 300.6190; 120.0280; 120.6200; 050.1970

## 1 引 言

电离层是日地空间环境的重要组成部分,也是空间天气影响人类活动的重要区域。由太阳风暴引起的电离层扰动会影响 GPS 定位系统的精度和无线电通讯的质量<sup>[1]</sup>; 电离层中的离子分布特征可以

反映地球磁场的变化,间接预测地震灾害的发生<sup>[2]</sup>; 电离层还是导弹、低轨卫星和空间站的主要运行场所,其环境的好坏将直接影响运行于其中的飞行器的寿命和功能实现以及宇航员的安全。因此,发展电离层探测技术不仅有助于推动地球物理学领域

收稿日期: 2011-03-22; 收到修改稿日期: 2011-07-10

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724005)、国家自然科学基金(40804048)和国家 863 计划(2007AA12Z101)资助课题。

作者简介: 吴 雁(1984—),男,博士研究生,主要从事远紫外成像光谱仪光学系统设计和辐射定标等方面的研究。

E-mail: wuyan\_alex@126.com

导师简介: 倪国强(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事光学传感器方面的研究。E-mail: nigq@bita.org.cn

\* 通信联系人。E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn

相关的电离层理论发展,还有利于探寻克服电离层可能造成的灾害的途径,从而在国防安全、灾害监测以及无线电通讯等日常生活领域有着不可替代的实际意义和战略目的。

搭载于地球极轨卫星上的远紫外(FUV)成像光谱仪是电离层探测的有力工具,通过对穿轨方向的扫描成像,可以在一个回归周期内获取地球电离层天底方向和临边方向全球的远紫外图像,具有很好的空间和时间连续性。在高度 60~400 km 的电离层大气中,波长在 120~180 nm 的 FUV 波段的吸收与辐射较为强烈,并且拥有非常多易于辨认的特征谱线<sup>[3]</sup>。通过对电离层大气中 O、N<sub>2</sub> 和 H 等主要粒子受激产生的远紫外气辉和极光的全球范围观测,可以了解这些粒子的含量,进而反演出氧原子和氮分子的比例<sup>[4]</sup> (O/N<sub>2</sub>)、电子密度剖面<sup>[5]</sup> (EDP)、电子浓度总量<sup>[5]</sup> (TEC)及电离层大气温度和密度等环境参数,为电离层“天气”的研究和预测提供科学数据。

本文介绍了一种可适用于电离层遥感探测的远

表 1 用于电离层观测的远紫外成像光谱仪

Table 1 FUV imaging spectrometers for ionosphere observation

Launch time	Payload	Spacecraft	Spectral range /nm	Spectral resolution /nm	IFOV /( $^{\circ}$ )
1986. 2	UAI	VIKING	123. 5~180	NA	20×25
1986. 11	AIRS	Polar BEAR	115~180	3. 6	1. 5×0. 37
2001. 12	GUUVI	TIMED	115~180	2. 0	11. 84×0. 3
2003. 10	SSUSI	DMSP	115~180	1. 9	11. 84×0. 3
2006. 11	SSULI	DMSP F17	80~170	1. 8	2. 4×0. 15

早期的星载远紫外探测器采用卡塞格林式望远镜、滤光片和光电倍增管的结构,光谱分辨率和空间分辨率较低。随着光栅技术和高增益面阵探测器技术的发展,近年来发射的远紫外载荷多为光栅色散型成像光谱仪。例如,全球紫外成像仪(GUVI)<sup>[10]</sup>的光学系统使用离轴抛物面(OAP)反射镜作为望远物镜,通过狭缝限制进入光谱仪光线的视场角,再由一块凹面光栅同时实现分光 and 成像功能。由于我国目前高水平远紫外波段凹面光栅的制造技术尚不成熟,本文选择了基于 Czerny-Turner 分光结构来构建远紫外成像光谱仪的技术方案,使用两块球面反射镜和一块平面光栅代替凹面光栅来实现分光成像的功能,其光路如图 1 所示。

## 2.2 Czerny-Turner 型光谱仪的像差来源

传统的 Czerny-Turner 型光谱仪使用球面准直反射镜将通过狭缝进入光谱仪的光准直为平行光束投射到平面光栅上,经过光栅色散后再由聚焦反射镜将其成像在二维阵列探测器表面。由于 Czerny-

Turner 型成像光谱仪光学系统的设计方法,对 Czerny-Turner 型成像光谱仪光学系统的像差来源进行了研究,对在发散光照明条件下校正像差的理论和方法进行了论述,克服了传统的 Czerny-Turner 型光谱仪成像质量差的缺点。基于该方法设计了可在 120~180 nm 波段范围内消像差的成像光谱仪光学系统,并利用调制传递函数(MTF)和成像仿真方法对于系统性能进行评价,证明其光谱分辨率和空间分辨率均满足电离层远紫外遥感的实际应用要求。与使用超环面反射镜校正像差的方法<sup>[6~8]</sup>相比,该系统不含非球面元件,易于加工装调和工程实现。

## 2 光学系统设计原理与像差校正方法

### 2.1 分光结构的选择

美国 NASA 等机构<sup>[9]</sup>从 20 世纪 70 年代开始致力于利用远紫外成像光谱仪观测电离层极光和气辉变化的研究,并发射了多颗搭载远紫外成像光谱仪载荷的卫星,如表 1 所示。

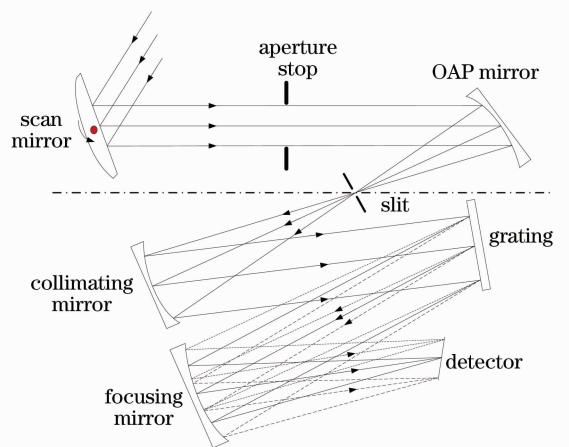


图 1 基于 Czerny-Turner 分光结构的成像光谱仪光学系统

Fig. 1 Imaging spectrometer optical system based on Czerny-Turner spectroscopic structure

Turner 型光谱仪属于离轴光学系统,因此主要像差是和离轴角关系密切的像散和彗差。

对于离轴使用的球面反射镜来说,其子午(色散)方向和弧矢方向上的焦距不同:

$$f_T = \frac{r_T}{2} \cos \theta, \quad (1)$$

$$f_S = \frac{r_S}{2} \frac{1}{\cos \theta}, \quad (2)$$

式中  $f$  为焦距,  $r$  为球面反射镜的曲率半径, 下标 T 和 S 分别表示子午方向和弧矢方向。

将像散定义为子午像面和弧矢像面之间的距离  $\Delta L_A$ , 当使用平行光束离轴照明球面反射镜时,  $\Delta L_A = f_S - f_T$ 。 Czerny-Turner 型光谱仪总像散  $\Delta L_{A\text{-total}}$  由准直反射镜的像散  $\Delta L_{AC}$  和聚焦反射镜的像散  $\Delta L_{AF}$  两部分组成(下标 C 和 F 分别表示准直反射镜和聚焦反射镜)

$$\Delta L_{A\text{-total}} = \Delta L_{AC} + \Delta L_{AF} = (f_{SC} - f_{TC}) + (f_{SF} - f_{TF}), \quad (3)$$

代入(1)式和(2)式可得

$$\Delta L_{A\text{-total}} = f_C (\sin \theta_C \tan \theta_C) + f_F (\sin \theta_F \tan \theta_F), \quad (4)$$

式中  $\theta$  表示光线对于准直反射镜和聚焦反射镜的离轴角。由(4)式可知, 当在平行照明光路(狭缝位于准直反射镜的前焦点处)中使用球面镜作为准直反射镜和聚焦反射镜时, 即  $\Delta L_{A\text{-total}} \neq 0$ , 像散无法校正。传统的 Czerny-Turner 型光谱仪一般选择子午像面作为探测器光敏面位置, 这样虽然可以获得较高的光谱分辨力, 但是弧矢方向像差很大, 因而无法

获得足够的空间分辨力。

### 2.3 基于发散光照明的像差校正方法

用于电离层遥感的远紫外成像光谱仪要求同时具有较高的光谱分辨力和空间分辨力, 因此像散必须加以校正。当使用发散光来照明光栅时<sup>[11]</sup>(狭缝与准直反射镜之间距离小于反射镜焦距), 可以利用光栅在子午和弧矢两个方向的放大率不同产生的像散来平衡球面反射镜离轴使用带来的像散, 这样仅使用球面反射镜就可以实现光谱仪的像散校正。

对于球面反射镜和平面光栅来说, 其物像关系分别为

$$\frac{1}{l'_{T,S}} = \frac{1}{f_{T,S}} + \frac{1}{l}, \quad (5)$$

$$l'_T = -\frac{\cos^2 \beta}{\cos^2 \alpha} l, \quad (6)$$

式中  $l$  和  $l'$  分别为物距和像距,  $\alpha$  和  $\beta$  为光线对于光栅的入射角和衍射角,  $\alpha$  和  $\beta$  之间的关系符合

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda, \quad (7)$$

式中  $d$  为光栅常数,  $m$  为衍射级次,  $\lambda$  为波长。

图 2 为使用发散光照明的光学系统的子午面光路示意图, 狭缝上的点 S 经过准直反射镜后的虚像为  $S'$ , 经过光栅后的虚像为  $S''$ , 经过聚焦反射镜后的子午像点为  $S_T$ 。弧矢面光路与其类似, 区别在于在弧矢方向上平面光栅符合平面反射镜的原理( $l'_S = -l$ )。根据(1), (2), (5)和(6)式, 可以得到聚焦反射镜的子午像距  $L_{FD-T}$  和弧矢像距  $L_{FD-S}$ :

$$L_{FD-T} = \frac{r_C r_F L_{SC}}{2L_{SC} \left( r_C \sec \theta_F + r_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \sec \theta_C \right) - r_C r_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}}, \quad (8)$$

$$L_{FD-S} = \frac{r_C r_F L_{SC}}{2L_{SC} (r_C \cos \theta_F + r_F \cos \theta_C) - r_C r_F}, \quad (9)$$

这里忽略了光栅和反射镜之间的距离, 即  $L_{CG} = L_{GF} = 0$ 。因为这些距离相对于光栅的物距和像距很小可以忽略, 而且它们使公式变得非常复杂。

式中  $L_{SC}$  为狭缝与准直反射镜的距离。当子午像距等于弧矢像距时, 即  $L_{FD-T} = L_{FD-S}$ , 系统满足消像散条件。联立(8)式和(9)式可以解出

$$L_{SC} = \frac{\frac{1}{2} r_C r_F \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} - 1 \right)}{r_C (\sec \theta_F - \cos \theta_F) + r_F \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \sec \theta_C - \cos \theta_C \right)}. \quad (10)$$

给定光学系统的初始条件, 包括准直反射镜曲率半径  $r_C$ , 聚焦反射镜曲率半径  $r_F$ , 准直反射镜离轴角  $\theta_C$ , 聚焦反射镜离轴角  $\theta_F$ , 系统中心波长  $\lambda$ , 光栅常数  $d$  以及中心波长光束对于光栅的入射角  $\alpha$ ,

联立(7)式和(10)式就可以计算出满足消像散条件的  $L_{SC}$ 。根据 Austin<sup>[12]</sup>的方法, 当光栅与聚焦反射镜的距离满足  $L_{GF} \approx r_F/2$  时, 可以实现较宽波段范围内同时消像散。基于发散光照明光学系统的缺

点是无法完全校正彗差,但当系统的离轴角很小或者相对孔径不大时,彗差对光学系统性能的影响并不明显。

不明显。

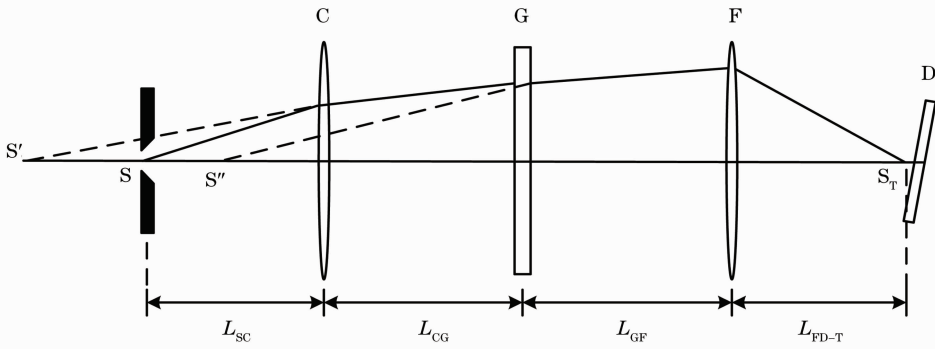


图 2 发散光照明系统子午面光路示意图

Fig. 2 Optical path of meridian plane of divergent illumination system

### 3 设计实例

成像光谱仪使用离轴抛物面镜作为前置望远系统,根据发散光照明消像差的原理计算了成像光谱仪光学系统的初始结构参数,利用光学设计软件

Zemax 对其进行优化,光学系统参数的初始值和部分参数优化后的结果如表 2 所示,设计的光学系统结构如图 3 所示。

表 2 光学系统参数

Table 2 Parameters of optical system

Parameters	Value	Parameters	Value	Parameters	Calculated	Optimized
$r_{OAP}/\text{mm}$	250	$\lambda_c/\text{nm}$	150	$L_{TS}/\text{mm}$	125.0	126.6
$d_{OAP}/\text{mm}$	20	$\theta_c/(\text{^\circ})$	4.0	$L_{SC}/\text{mm}$	207.3	206.7
$r_C/\text{mm}$	500	$\theta_F/(\text{^\circ})$	4.0	$L_{CG}/\text{mm}$	280	280
$r_F/\text{mm}$	500	$\alpha/(\text{^\circ})$	2.0	$L_{GF}/\text{mm}$	260	260
$d/(\text{gr}/\text{mm})$	1200	$\beta/(\text{^\circ})$	12.41	$L_{FD}/\text{mm}$	316.8	292.7
				$\theta_D/(\text{^\circ})$	0	6.4

表 3 远紫外成像光谱仪主要参数

Table 3 Main parameters of FUV imaging spectrometer

Parameter	Value
Orbit altitude /km	800
Nadir observation distance /km	700
Limb observation distance /km	3100
Spectral range /nm	120~180
Spectral resolution /nm	1.0
Instrument field of view /( $^\circ$ )	$6 \times 0.1$
Spatial resolution /( $^\circ$ )	$0.1 \times 0.1$
Nadir spatial resolution /km	$1.2 \times 1.2$
Limb spatial resolution /km	5.4
Nadir scan range /( $^\circ$ )	$-64.5 \sim 62.7$
Limb scan range /( $^\circ$ )	$-64.5 \sim -70.8$
F number	6.2
Focal length /mm	121.8
Entrance slit /mm	$0.22 \times 14$
CCD pixel size / $\mu\text{m}$	$20 \times 20$
CCD pixel number	$1000 (\text{spectral}) \times 800 (\text{spatial})$
Mirror coating	Al+MgF <sub>2</sub>
Photocathode	KBr/CsI

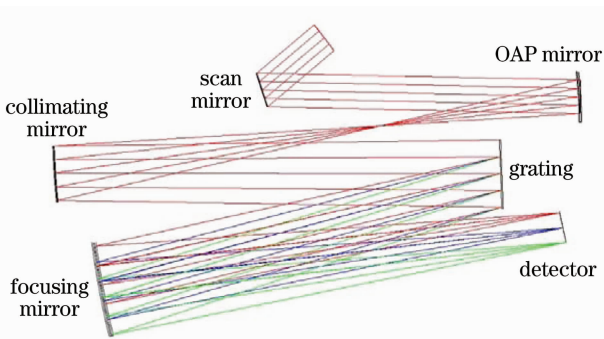


图 3 光学系统结构图

Fig. 3 Structure of optical system

远紫外成像光谱仪的主要参数如表 3 所示,所有的反射式光学元件均镀 Al+MgF<sub>2</sub> 保护膜,使用在 FUV 波段有较高量子效率的 KBr 或 CsI 作为光电阴极,配合 Z 型三堆叠 MCP 实现 10<sup>5</sup> 以上的增益,以满足电离层远紫外探测对于能量的需求。

## 4 设计光学系统的性能评价

成像光谱仪的性能评价方法有多种,这里使用基于MTF的方法以及利用分辨力靶标进行成像仿真分析的方法对所设计光学系统的性能指标进行验证。

### 4.1 MTF 评价方法

用光谱仪的空间分辨力在像面上对应的空间频率作为计算MTF时的截止频率。将光谱仪空间分辨力 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的设计要求换算成像面上的“像素”尺寸为 $0.22 \text{ mm} \times 0.22 \text{ mm}$ ,对应的空间频率约为

$2.3 \text{ lp/mm}$ 。子午方向 $0.1^\circ$ 的空间分辨力是由狭缝宽度决定的,对应的极限光谱分辨力约为 $0.7 \text{ nm}$ ,同时满足 $1.0 \text{ nm}$ 的光谱分辨力要求。考虑到光谱仪工作在远紫外波段,探测的辐射强度极低,以及主控程序(MCP)与CCD耦合对于系统传递函数的影响,在 $5 \text{ lp/mm}$ 的空间频率上分析所设计光学系统的MTF。由图4可知,全视场全波段MTF均在 $0.67$ 以上,OTF表示光学传递函数。

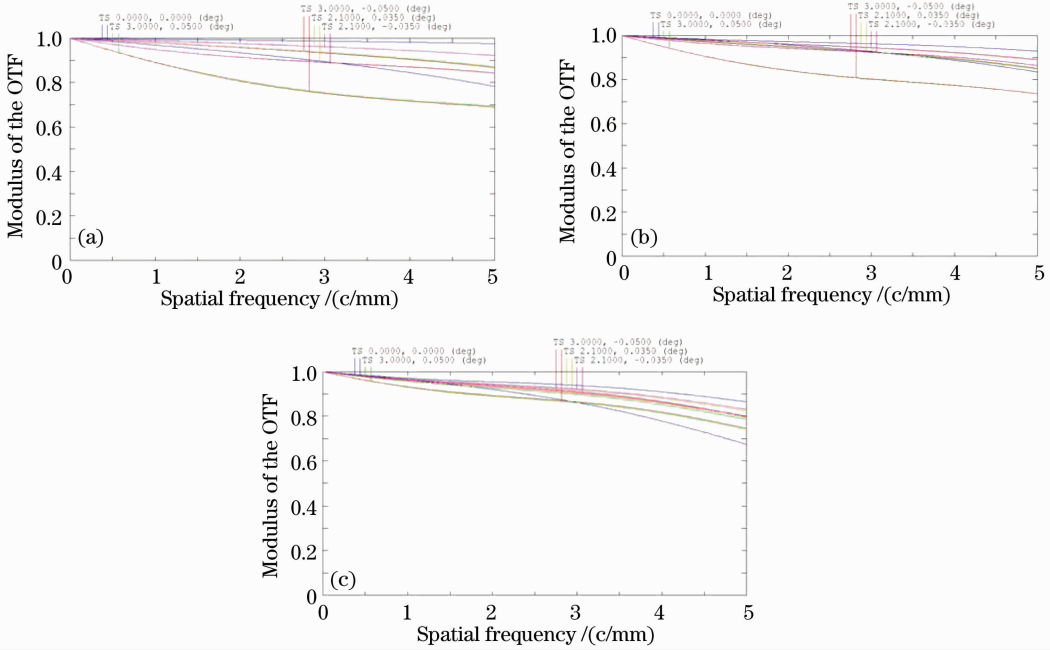


图4 光学系统的MTF。波长(a) 120 nm; (b) 150 nm; (c) 180 nm

Fig.4 MTF of the optical system. Wavelength (a) 120 nm; (b) 150 nm; (c) 180 nm

### 4.2 分辨力靶标成像仿真分析

利用空间分辨力靶标来分析成像光谱仪的光谱分辨力和空间分辨力是一种更加直观的评价方法。如图5所示,靶标在弧矢方向有30对明暗相间的线对,每条亮线或暗线对应 $0.1^\circ$ 的视场角;子午方向 $0.1^\circ$ 的空间分辨力则通过设置狭缝宽度实现。利用

Zemax中的成像仿真功能,将该靶标作为无限远的目标物体,在中心波长和边缘波长处分别设置三组间隔 $1.0 \text{ nm}$ 的测试波长,经过软件仿真可以在成像光谱仪的像面位置上得到对应的靶标单色像,其结果如图6所示。由图6可知光谱仪在 $120 \sim 180 \text{ nm}$ 的波长范围和 $6^\circ \times 0.1^\circ$ 视场范围内,光谱分

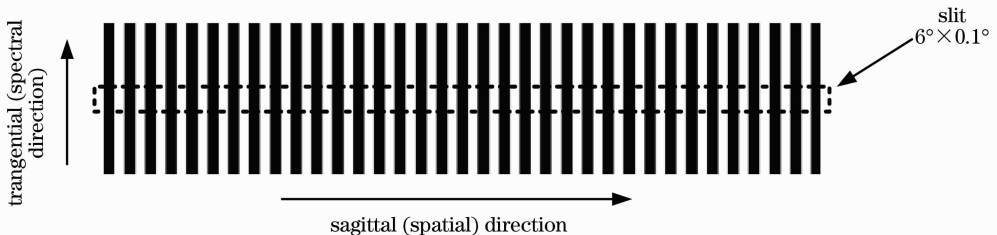


图5 分辨力测试靶标

Fig.5 Test target of system resolution

辨力优于 1.0 nm,空间分辨力优于 0.1°。

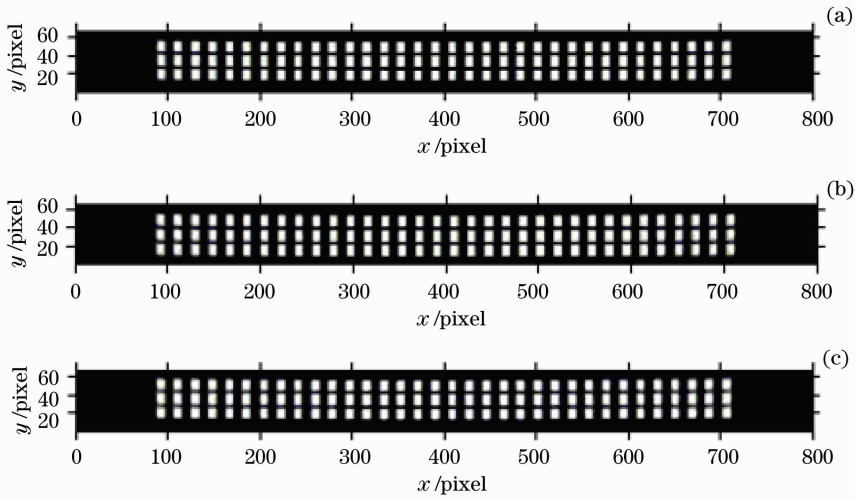


图 6 分辨力靶标不同波长的单色像。(a) 120/121/122 nm; (b) 149/150/151 nm; (c) 178/179/180 nm  
Fig. 6 Test target monochromatic images of different wavelengths. (a) 120/121/122 nm; (b) 149/150/151 nm; (c) 178/179/180 nm

## 5 结 论

研究了一种基于发散光照明的 Czerny-Turner 型远紫外成像光谱仪光学系统的设计方法,利用 Zemax 光学设计软件对计算的初始结构进行优化,在 120~180 nm 的波长范围和  $6^\circ \times 0.1^\circ$  的视场角内实现了像差的校正。通过 MTF 和分辨力靶标成像仿真分析的方法对该系统的主要性能参数进行了评价。验证了成像光谱仪的光谱分辨力优于 1.0 nm,空间分辨力优于 0.1°,与国外同类仪器相比,该设计具有更高的光谱分辨力和空间分辨力,完全满足电离层观测的应用要求。与利用超环面反射镜校正像差的方法相比,该系统仅使用球面反射镜,具有加工装调简单的优势,易于工程化样机的实现,为我国未来用于电离层观测的远紫外成像光谱仪载荷的研制奠定了一定的理论和技术基础。

## 参 考 文 献

- 1 K. Davies, E. K. Smith. Ionospheric effects on satellite land mobile systems [J]. *IEEE Antenna's and Propagation Magazine*, 2002, **44**(6): 24~31
- 2 Zhao Ying, Zhang Xiaohong, Liu Jingnan. Perturbation analysis of the Ionosphere TEC before and after the wenchuan earthquake [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, **25**(2): 447~453  
赵莹, 张小红, 刘经南. 汶川大地震前后电离层电子含量的扰动分析[J]. *地球物理学进展*, 2010, **25**(2): 447~453
- 3 L. J. Paxton, A. B. Christensen, D. Morrison *et al.*. GUVI: a hyperspectral imager for geospace [C]. *SPIE*, 2004, **5660**: 228~241

- 4 D. J. Strickland, J. S. Evans. Satellite remote sensing of thermospheric O/N<sub>2</sub> and solar EUV 1. theory[J]. *J. Geophys. Research*, 1995, **100**(A7): 12217~12226
- 5 R. DeMajistre, L. J. Paxton, D. Morrison. Retrievals of nighttime electron density from thermosphere ionosphere mesosphere energetics and dynamics (TIMED) mission global ultraviolet imager (GUVI) measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: A05305
- 6 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112011  
于磊, 曲艺, 林冠宇等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112011
- 7 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
- 8 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 35~40  
薛庆生, 王淑荣, 鲁凤芹. 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 35~40
- 9 Robert E. Huffman. Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing [M]. Academic Press, 1992
- 10 D. C. Humm, L. J. Paxton, A. B. Christensen *et al.*. Design and performance of the global ultraviolet imager (GUVI) [C]. *SPIE*, 1998, **3445**: 277~289
- 11 M. McDowell. Design of Czerny-Turner spectrographs using divergent grating illumination [J]. *Opt. Acta*, 1975, **22**(5): 473~475
- 12 D. R. Austin, T. Witting, A. Walmsley. Broadband astigmatism free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3846~3853

栏目编辑:何卓铭