

# 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

于磊<sup>1,2</sup> 曲艺<sup>1</sup> 林冠宇<sup>1</sup> 王淑荣<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 针对目前国内对星载电离层成像光谱仪研究,设计了一种适用于 120~180 nm 远紫外探测的光学系统,并开展了原理样机的研制工作。对比国外各种方案,分析其优劣性后提出了以离轴抛物镜为物镜,Czerny-Turner 结构为成像光谱系统的方案。为解决传统 Czerny-Turner 结构像差校正不均匀、空间分辨率低等缺点,进行了像差理论的研究,并提出了处理方法。设计成功了视场角为 4°,焦距为 139.3 mm,工作波段在 120~180 nm 之间的星载电离层成像光谱仪系统。设计结果表明,全系统的像差得到充分校正,全视场全波段调制传递函数值在 0.6 以上,完全满足指标要求。将该方案与国外已有载荷进行对比,证明其工程实现性好,性能更为优越。

**关键词** 传感器;成像光谱仪;远紫外;Czerny-Turner 结构;像差校正

**中图分类号** O433.1;TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0112011

## Design and Study of an Optical System for a Far Ultraviolet Imaging Spectrograph in 120~180 nm Carried by Satellite

Yu Lei<sup>1,2</sup> Qu Yi<sup>1</sup> Lin Guanyu<sup>1</sup> Wang Shurong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** An optical system applied to the detection of 120~180 nm far ultraviolet waveband is developed for the study of ionosphere imaging spectrometer carried by satellite in China. The programme that uses off-axis parabolic as objective lens and Czerny-Turner system as imaging spectrum system structure is proposed after comparing different foreign programmes. The aberration theory is studied and a novel method of aberration correction is deduced to overcome the disadvantages of Czerny-Turner structure such as non-homogeneous aberration correction and low spatial resolution. Spectrograph system operating in 120~180 nm waveband with 4° field of view and 139.3 mm focal length is designed. The results demonstrate that the aberration of the system is substantially corrected and the modulation transfer function (MTF) of total field of view is more than 0.6 in all waveband, which satisfies the requirement. Compared with foreign loads, the structure is more convenient and predominant.

**Key words** sensors; imaging spectrometer; far ultraviolet; Czerny-Turner structure; aberration correction

**OCIS codes** 120.0280; 120.4570; 120.6200; 300.6540

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(41074126)资助课题。

作者简介: 于磊(1984—),男,博士研究生,主要从事紫外遥感仪器设计及图像遥感处理方面的研究。

E-mail: top1gods@email.ustc.edu.cn

导师简介: 王淑荣(1961—),女,硕士,研究员,主要从事空间紫外光学遥感技术研究方面的研究。

E-mail: wsrong@ciomp.ac.cn

# 1 引 言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代在多光谱遥感成像基础上发展起来的新一代光学遥感仪器,它能在特定光谱域以高光谱分辨率同时获得连续的目标超多谱段图像,这使得遥感应用可以在光谱维上进行空间展开,从而达到定量分析地球表层以及大气层的目的,因而得到广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。

成像光谱仪一般采用望远镜和光谱仪相结合的光学结构,并使用面阵探测器进行数据采集。其光学系统有多种不同结构选择,而光谱仪的分光方法也主要包括光栅色散型<sup>[3]</sup>、棱镜色散型和干涉傅里叶变换型几种,另外在一些特定波段上,也出现了滤光片型的光谱仪<sup>[4]</sup>。

对电离层的大型探测始于 20 世纪 80 年代的美国,其研究波段为 120~180 nm 的远紫外区域。由于这一波段光谱辐射弱,容易被大气强烈吸收,因而在地面上很难进行有效的观测,而且电离层极易受到扰动,实时变化快,动态范围大,所以如何进行行之有效的空间探测成为了研究的焦点。目前使用了成像光谱仪的该类国外先进载荷主要包括 AIRS、SSULI、GUVI、SSUSI、RAIDS 和 IMAGER 等<sup>[5~8]</sup>。目前国内的研究尚处于探索阶段。

纵观国外各类电离层探测仪器的光学系统,不难发现,其共同的特点是使用反射系统,镜片数量少,光谱分辨率高但空间分辨率相对较低。本文首先对几种适合于远紫外探测的光学系统结构进行了比较,最终确定了 Czerny-Turner 结构;接着又针对

设计要求,在像差理论的基础上对系统进行了改进,除了使之适应成像系统要求外,还在空间分辨率上进行了改善和提高;最终以一面离轴抛物镜为物镜设计得到了适用于远紫外波段探测的成像光谱仪光学系统,并对设计结果进行了分析。

# 2 光学系统优选

针对远紫外波段的特点,对比国外研究经过分析初步得到了三种满足条件的方案,如图 1 所示。

方案一采用了窄带透射式滤光片作为分光器件,主镜和次镜则使用了参数不同的多次非球面镜组成沃兹沃斯系统。这个方案有效地减小了系统的像差,但是为了满足光谱分辨率和能量传输的要求,所用窄带滤光片的带宽不能超过 5 nm,且透射效率需大于 50%,这样的滤光片制造技术在科学上还是一个较难解决的问题,目前国内尚不能实现。此外,多次非球面镜的加工和装调在工程实现上也有较大的难度。

方案二使用了超环面光栅作为分光器件和聚焦成像物镜,并以一面离轴抛物镜作为物镜组成了沃兹沃斯系统,能量传输效率高,但是超环面光栅的制作困难,国内没有可匹配的制造技术,该系统像差纠正也较差。

方案三是 Ebert-Fastie 系统,用一个凹面反射镜兼做准直物镜和聚焦成像物镜,分光器件则使用了平面光栅,成像物镜使用了离轴抛物镜,这种装置的好处是结构较为简单,易于制造和装调,其空间分辨率介于方案一与二之间。

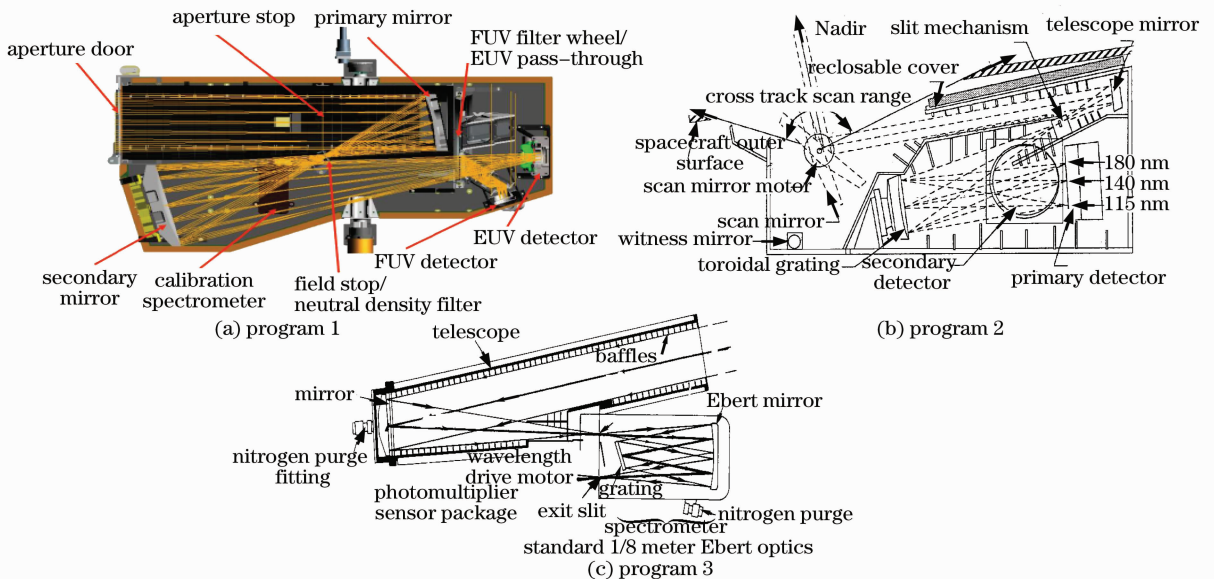


图 1 系统设计方案选择

Fig. 1 Flow chart of system design choice

通过以上分析,综合考虑工程实现难度与成本,以及系统性能改善等问题,最终选用了与方案三类类似的 Czerny-Turner 装置,它是在 Ebert-Fastie 系统上进行改进得到的系统,将作为准直物镜和聚焦成像物镜的一个凹面反射镜拆成两个凹面镜,避免了二次衍射和多次衍射,方便了反射镜的加工与装调。并对传统 Czerny-Turner 系统像差校正不严格,需要转动光栅等缺点进行了针对性的改进。

### 3 像差分析与校正方法

望远镜系统使用的离轴抛物镜,理论上可以通

过对其参数的控制使之所成的狭缝像没有像差。但实际上,轴上点可以做到无像差,而偏轴点的像差则会随着离轴量的增大而逐渐增大,其中起主要作用的是彗差和像散。通过调整离轴量的大小和入射孔径的大小可以将这些像差尽量降到最低。这里主要讨论光谱成像系统。

#### 3.1 彗差校正

Czerny-Turner 系统包括准直镜、平面光栅和聚焦镜。由原理图(图 2)可知,光线的离轴入射会产生彗差,彗差会使谱线单边扩散从而严重影响分辨率,必须严格地加以控制。

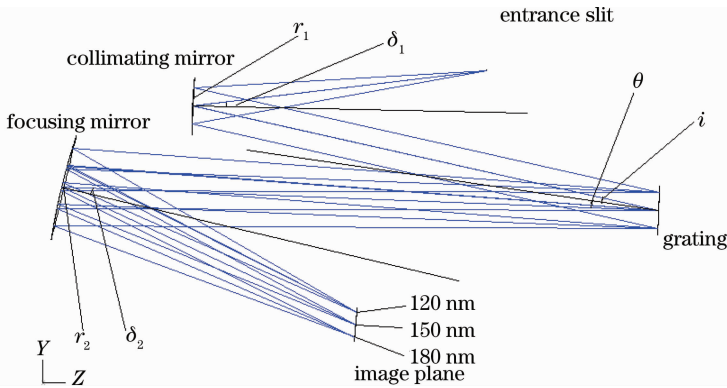


图 2 Czerny-Turner 光学系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Czerny-Turner optical system

根据 Shafer 方程<sup>[9]</sup>可以对聚焦镜的入射角进行调节从而有效地抑制彗差。方程如下:

$$\sin \delta_2 / \sin \delta_1 = (r_2^2 / r_1^2) (\cos i \cos \delta_2 / \cos \theta \cos \delta_1)^3, \quad (1)$$

式中  $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别为准直镜和聚焦镜中心光线的离轴入射角,  $r_1$  和  $r_2$  为准直镜和聚焦镜的曲率半径,  $i$  和  $\theta$  则为平面光栅的入射角和衍射角。由于  $\delta_1$  和  $\delta_2$  的通常取值小于  $10^\circ$ , 所以  $\cos^3 \delta_1$  和  $\cos^3 \delta_2$  可近似看作为 1, (1)式可以改写为

$$\sin \delta_2 / \sin \delta_1 = (r_2 / r_1)^2 (\cos i / \cos \theta)^3. \quad (2)$$

这样,可以对  $r_1, r_2, \delta_1$  和  $\delta_2$  调节来进行优化。由于前三项可以根据反射镜的物理参数来确定,所以通过对聚焦镜入射角的优化可以消除彗差。式中的  $i$  和  $\theta$  满足光栅色散方程

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda, \quad (3)$$

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

#### 3.2 像散校正

由于反射镜子午方向和弧矢方向上的焦长不同,狭缝像会沿着狭缝高度扩展到几毫米。对于成像光谱仪而言这是不可取的。为了解决这个问题,对 Czerny-Turner 系统中的聚焦镜进行研究,假定

该镜表面为任意自由曲面,如图 3 所示。

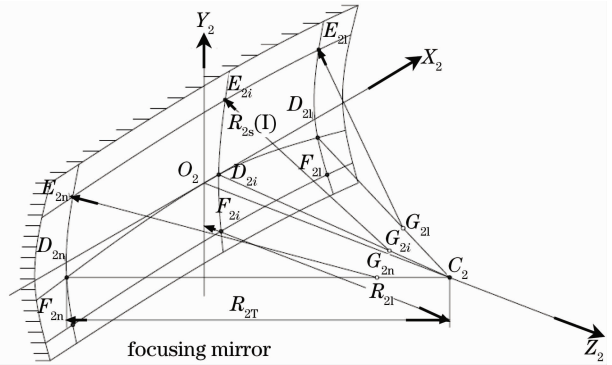


图 3 聚焦镜表面形状

Fig. 3 Surface shape of focusing mirror

弧矢方向上的扩展焦长可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\Delta f_{\text{overall}} = \Delta(f_{1S} - f_{1T}) + \Delta(f_{2S} - f_{2T}), \quad (4)$$

式中  $f_{iT} = (r_{iT}/2)\cos \delta_i$ ,  $f_{iS} = (r_{iS}/2)\sec \delta_i$ 。  $f$  和  $R$  分别代表聚焦镜子午方向和弧矢方向上的焦距和曲率半径,下标  $i=1,2$ , 分别代表准直镜和聚焦镜。  $T$  和  $S$  则表示子午方向和弧矢方向。

可以看到,光线在弧矢面内的焦长要大于在子午面内的焦长,如果  $\Delta f_{\text{overall}} = 0$ ,像散就会得到很好的纠正。对应用于工程的系统,自由曲面无论是制

造还是装调上都有较大的困难<sup>[10]</sup>,然而通过对(4)式的观察可以发现,准直镜取为球面镜,而聚焦镜固定一个方向上的曲率半径,只要对另一个方向上的曲率半径进行改变同样可以达到消除像散的效果。而子午方向和弧矢方向上焦距不同的曲面形式恰好是超环面,这种反射镜的加工和装调就要简单很多,因此将聚焦镜取为超环面镜。

通过以上各式可以看到像散的校正只决定于入射角,而在 3.1 节中校正彗差的最优入射角是决定于光栅的入射角和衍射角的,这样一来像散的校正仍与波长有关<sup>[11]</sup>。通过对聚焦镜入射角和弧矢方向曲率半径的优化,就可以获得良好的像差校正结果,从而达到系统的最优化。

### 3.3 像面中心和边缘像差校正

入射到像面上的中心光线和边缘光线对应不同的波长,在光栅和聚焦镜的作用下,各个波长的入射角明显不同。由于这个原因,使得对各个波长校正的最优条件也都不同,因而很难同时获得最佳的像差校正。但是通过几何关系的计算,可以获得近似的最优条件从而令不同波长的光线像差同时得到校正。根据 Austin 等<sup>[12]</sup>提出的理论,只要衍射光栅到聚焦镜的距离满足下式

$$L_{g-cd} = r_{2T} \cos \alpha_2, \quad (5)$$

入射到像面上的中心和边缘波长光线就会近似相同,而当  $L_{g-cd} \ll r_{2T} \cos \alpha_2$  或  $L_{g-cd} \gg r_{2T} \cos \alpha_2$  时,各波长光线就会相差很多,几何关系如图 4 所示。

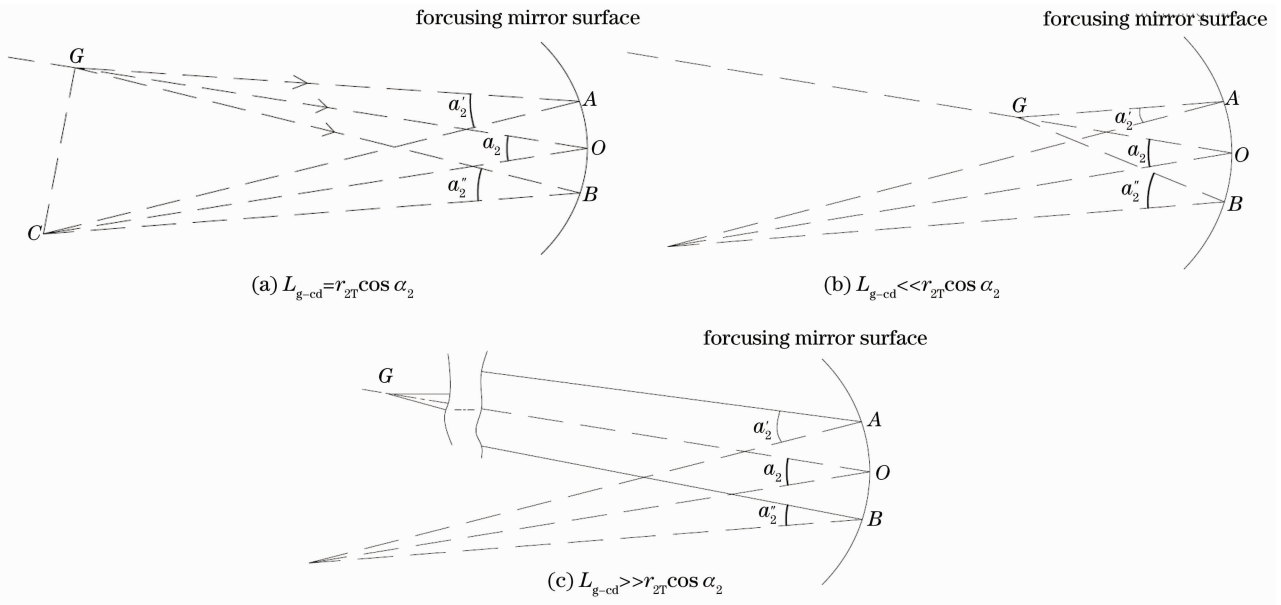


图 4 不同距离  $L_{g-cd}$  下不同波长对应的入射角

Fig. 4 Incident angles to focusing mirror for different wavelengths in different distances  $L_{g-cd}$

## 4 光学系统结构与结果分析

### 4.1 设计实例

根据上述原理与方法,设计了用于电离层遥感的远紫外波段成像光谱仪光学系统。它以成像物镜(离轴抛物镜)为前置望远系统,Czerny-Turner 系统为光谱仪系统共两部分组成,光路图如图 5 所示,离轴抛物镜狭缝处成像点列图如图 6 所示。

仪器设计运行在 833 km 高的轨道上,与临边观测点的距离为 3267 km,其观测粒子主要波长如表 1<sup>[13]</sup>所示。

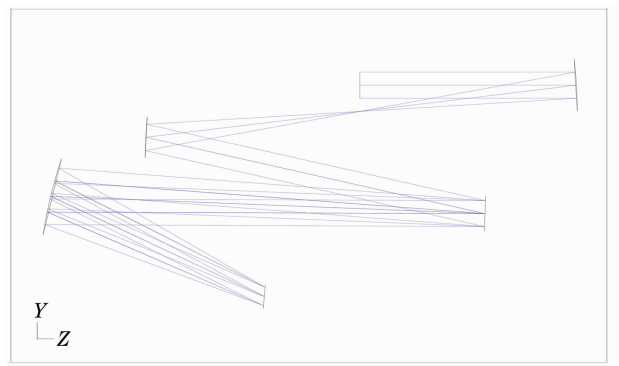


图 5 成像光谱仪光学系统设计图

Fig. 5 Design of imaging spectrometer optical system

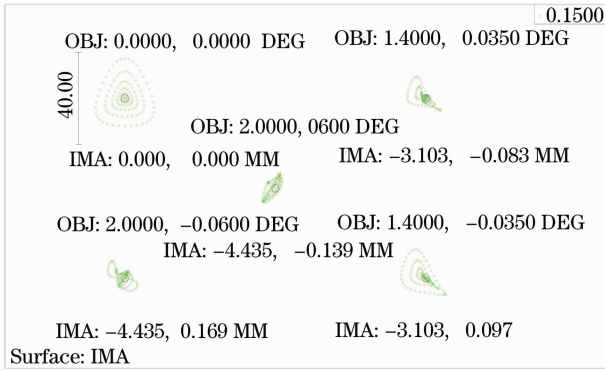


图6 狭缝处点列图分布

Fig. 6 Spot diagram at slit

表1 粒子参数及分布

Table 1 Particles parameters and distributions

	H <sup>+</sup>	O I	O II	N <sub>2</sub>
Wavelength /nm	121.6	130.4	135.6	140~150 165~180
Distribution /nm	80~120	120~140	180~500	140~180

仪器各项主要特性参数如表2所示。成像探测器使用带有像增强器的 CCD, 探测器像元尺寸为 24 μm, 对应的奈奎斯特频率为 20 lp/mm。

表2 成像光谱仪特性参数

Table 2 Parameters of designed imaging spectrometer

Parameter	Value
Spatial resolution Nadir-Limb/km	1.2/0.5
Target spatial coverage /km	50~520
Spectral coverage/nm	121.6, 130.4, 135.6, 140~150, 165~180
Spectral resolution /nm	1.3
Instrument FOV /(^{\circ})	4×0.1
Diameter of entrance pupil /mm	15
Grating density /lp/mm	1200
CCD array size /pixel	512(spectrum) × 256(space)
CCD pixel size /μm	20×20
Focal length /mm	139.3
F number	8.8

光学系统设计参数如表3所示。

表3 光学结构参数

Table 3 Parameters of optical structure

Characteristic	Value
Entrance aperture	
clear aperture /mm	Φ15
Telescope mirror	
type	Off-axis parabola
off-axis distance /mm	15
focal length /mm	125

(续表3)

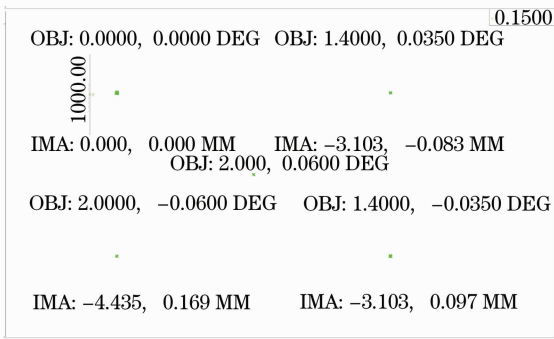
Characteristic	Value
Entrance slit	
size /mm	0.25×9
angular resolution /(^{\circ})	0.1×4
Collimating mirror	
type	Sphere
incident angle $\delta_1$ /(^{\circ})	9.75
curvature, $r_1^b(S, T)$ /nm	250, 250
Grating	
type	Plane
ruling / (Grooves /mm)	1200
incident angle /(^{\circ})	10.37
diffraction angle /(^{\circ})	0
Condensing Mirror	
type	Toroidal
incident angle $\delta_2$ /(^{\circ})	11.38
curvature, $r_2^b(T, S)$ /mm	278.6, 260
distance $L_{g-cd}$ /mm	250

## 4.2 设计结果分析

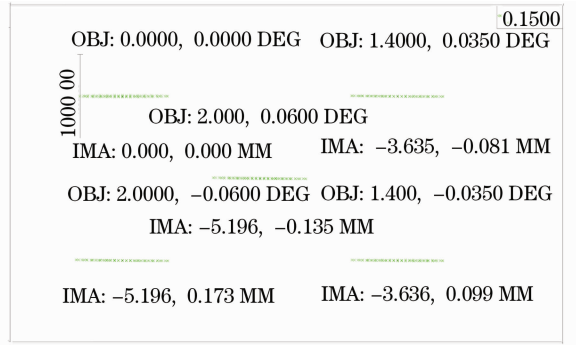
图7比较了不同形式聚焦镜下的点列图, 其中图7(b)显示了传统系统物空间在像面上的扩展像, 大小约在 0.25 m (狭缝宽度方向) × 1.35 mm (狭缝高度方向)。图7(a)则使用了超环面镜来校正像散, 校正后结果达到了 20 μm × 20 μm, 像散得到充分校正。图8显示了不同的光栅到聚焦镜距离对中心波长和边缘波长的影响, 设计结果表明当按照前述理论设计, 即  $L_{g-cd} = r_{2T} \cos \alpha_2$  时, 中心波长和边缘波长的像差都可以得到很好的纠正。

图9给出了设计优化后的系统中心波长和边缘波长的调制传递函数(MTF)曲线, 可以看到, 在设计指标要求的空间频率(20lp/mm)下, 全视场全波段调制传递函数(MTF)值达到0.6以上, 完全满足设计指标要求。

表4给出了设计结果与国外现有方案设计结果主要性能的对比, 可以看到信噪比基本一致, 并在空间分辨率和光谱分辨率上具有先进性。在满足全球成像要求的前提下, 除 IMAGER 运行于高轨可直接以小 FOV 角覆盖外, 其它方案前端均需使用扫描镜以达到覆盖效果。相比设计方案, 国外各方案的  $F$  数较小, 镜片数量也较少, 在国外先进技术的保证下易于制造和装调, 故在能量传输和传递效率上要更具优势, 可以更有效地完成微弱光的探测任务。但根据初始能量估算, 设计方案仍可以满足系统探测的指标。



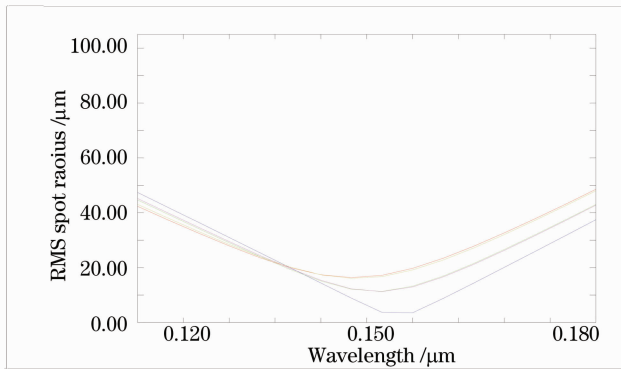
(a) toroidal condensing mirror



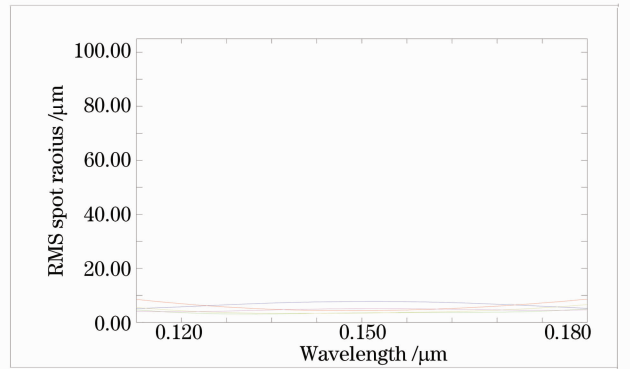
(b) spherical condensing mirror

图 7 像面点列图分布

Fig. 7 Spot diagrams at image plane



(a)  $L_{g-cd} \approx 1/2r_{zT} \cos \alpha_2$



(b)  $L_{g-cd} = 1/2r_{zT} \cos \alpha_2$

图 8 均方根点半径与波长关系图

Fig. 8 RMS spot radius versus wavelength

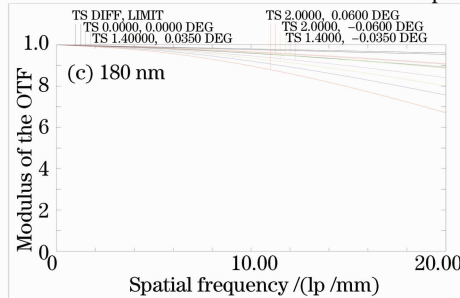
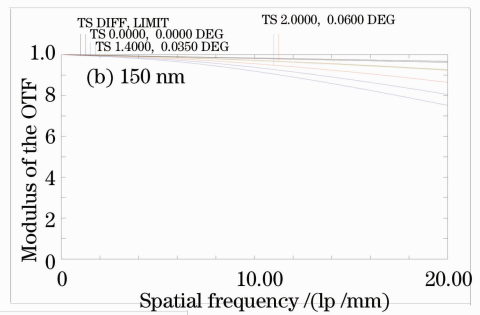
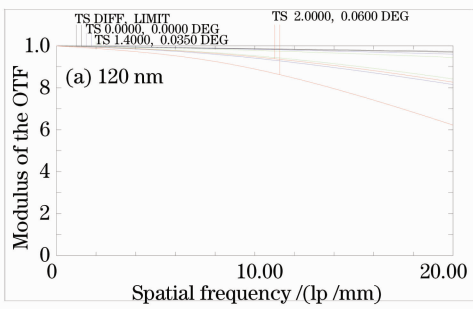


图 9 设计系统中心波长与边缘波长下的 MTF

Fig. 9 MTF of design system under central and marginal wavelengths

表4 不同方案主要性能参数对比

Table 4 Principal specification of different projects

Projects	SNR		Resolution		
	Min	Max	Spatial /km		Spectral /nm
			Nadir	Limb	
Design	8.9	30.1	0.5	1.2	1.3
GUVI	8.5	38.1	15	2.5	1.2
SSULI	11	33	N/A	2	2.4
IMAGER	12	32	10	N/A	2.5
	FOV/(°)		F number		
Design	4×0.1		8.8		
GUVI	11.8×0.37		3		
SSULI	2.4×0.15		5		
IMAGER	1.12		4		

## 5 结 论

建立了适用于 120~180 nm 远紫外电离层成像光谱仪的光学系统,通过以下三点对系统像差进行了校正:1) 在 Fastie-Losendahl 方程的基础上,通过调整聚焦镜的入射角达到消除彗差的目的;2) 将聚焦镜定为自由曲面,在几何上进行了计算推导,得出了消除像散的条件,并根据该条件使用了超环面镜,有效地消除了沿狭缝高度的像散;3) 进一步讨论了中心波长和边缘波长光线入射到像面上的像差纠正,在对聚焦镜的子午方向上的曲率半径和光栅入射角进行最优化以后,使得系统在整个波段内的分辨率趋近于一致。最终根据以上理论设计了星载远紫外电离层成像光谱仪,并通过光学设计软件进行了优化和分析,分析结果表明,设计的光学系统优于传统系统,像差得到了充分校正。对比国外目前应用的电离层载荷具有一定性能上的优势,FOV 调制传递函数在全波段达到 0.6 以上,满足成像质量要求。目前系统正在加工中,这种设计研究的成功,将对星载电离层成像光谱仪的研制提供重要的理论依据和实践指导,并为以后工作的开展奠定了基础。

## 参 考 文 献

- Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2629~2637
- 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2629~2637
- Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian. Study on calibration method of spectral irradiance responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1816~1821
- 张振铎, 王淑荣, 李福田等. 空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度定标方法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1816~1821
- 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
- Zheng Yuquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *J. Remote Sensing*, 2002, **6**(1): 75~80
- 郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. *遥感学报*, 2002, **6**(1): 75~80
- F. W. Schenkel, B. S. Ogorzalek, J. C. Larrabee *et al.*. Ultraviolet daytime auroral ionospheric imaging from space[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(20): 3395~3405
- L. J. Paxton, A. B. Christensen, D. Morrison *et al.*. Hyperspectral imager for geospace [C]. *SPIE*, 2004, **5660**: 228~239
- Robert P. McCoy, Kenneth F. Dymond, Gilbert G. Fritz *et al.*. Special sensor ultraviolet limb image: anionospheric and neutral density profiler for the defense meteorological satellite program satellites[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(2): 423~429
- Larry J. Paxton, Ching-I. Meng, Glen H. Fountain *et al.*. SSUSI Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters [C]. *SPIE*, 1993, **1764**: 161~175
- B. Arthur, Shafer, R. Lawrence. Megill, Leann Droppleman. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(7): 879~887
- Li Xu, Kexin Chen, Qingsheng He *et al.*. Design of freeform mirrors in Czerny-Turner spectrometers to suppress astigmatism[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(15): 2871~2879
- 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, 鲁凤琴. 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
- Dane R. Austin, Tobias Witting, Ian A. Walmsley. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3846~3853
- Daniel Morrison, Larry Paxton, Dave Humm *et al.*. On-orbit calibration of the special sensor ultraviolet scanning imager (SSUSI) a far-UV imaging spectrograph on DMSP F16 [C]. *SPIE*, 2002, **4485**: 328337