

空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统

于磊 林冠宇 于向阳

(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 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪主要用于观测高层大气中的远紫外辐射和实现对其内部中尺度现象成像的功能。目前我国该类的相关仪器研究基础还比较薄弱, 针对这种情况, 在光学系统设计的角度上给出了一种适用于 130~180 nm 波段探测的光学系统方案。该成像光谱仪光学系统以离轴抛物镜为物镜, 串联 Wadsworth 结构为成像光谱系统; 这种串联 Wadsworth 成像光谱系统采用离轴抛物镜做准直镜, 分光器件为平面光栅和球面光栅串联, 实现二次色散, 同时球面光栅起到聚焦成像作用; 在像差理论的基础上, 对该结构的光程函数和各像差进行了分析, 获得了改进结构的宽波段完善成像条件。针对低轨空间探测应用要求设计了相关改进型 Wadsworth 结构成像光谱仪光学系统, 设计结果证明系统像差得到了充分校正, 在奈奎斯特频率(20 lp/mm)下全视场全波段调制传递函数值在 0.6 以上。该优化结构同时具备高空间分辨率和高光谱分辨率, 性能优越。

关键词 遥感; 高层大气; 成像光谱仪; 远紫外; 串联 Wadsworth 系统; 像差校正

中图分类号 O433.1; TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0122001

Optical System of Far Ultraviolet Imaging Spectrometer for Space-Based Upper Atmosphere Remote Sensing

Yu Lei Lin Guanyu Yu Xiangyang

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

Abstract Far ultraviolet imaging spectrometer for upper atmosphere remote sensing is mainly used in observation on the far ultraviolet radiation and imaging for the mesoclimate phenomenon in the upper atmosphere. The foundation of correlated instruments is still frail in our country. A program in optical design is presented to improve the study of the imaging spectrometer for far ultraviolet observation in 130~180 nm. It is composed of the telescope with an off-axis parabolic mirror and the imaging spectrum system structure with tandem Wadsworth system. The tandem Wadsworth spectral imaging system adopts the collimator as an off-axis parabolic mirror. The light splitting device consists of a plane grating and a concave grating. The structure can realize quadrate dispersion. And the concave grating is used for focusing and imaging. Based on the aberration theory, the optical path function and aberration coefficients of the system are analyzed, and perfect imaging conditions of the improved structure are obtained. A design example using the perfect conditions is designed to meet the requests of the application in space observation in low orbit. The results demonstrate that the aberrations of the system are substantially corrected, and the modulation transfer functions in total fields of view and all waveband are more than 0.6. The improved structure is more convenient. The space resolution and the spectral resolution are both high.

Key words remote sensing; upper atmosphere; imaging spectrometer; far ultraviolet; tandem Wadsworth system; aberration correction

OCIS codes 120.0280; 120.4570; 120.6200; 300.6190

收稿日期: 2012-06-21; 收到修改稿日期: 2012-07-21

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, 助理研究员, 主要从事紫外遥感仪器设计方面的研究。

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

1 引 言

空间高层大气(50~1000 km 的大气层)连接了低层大气和地球外层磁场,是日地空间的重要组成部分,未来空间环境预报模式将会基于太阳-太阳风/行星际磁场-磁层-空间高层大气-低层大气的传输和耦合作用。目前人类对高层大气的探索还不够深入,远未达到低层大气遥感的水平,为了完善空间环境预报及相关研究,开展高层大气的研究意义重大^[1,2]。

对空间高层大气进行探测,就是对其中的分布粒子进行光谱分析和对其中的不均匀结构等现象进行观测,并根据观测所反演的数据理解这些活动的结构特征和演化特性。这就要求所应用的空间载荷同时拥有分析大气内部分布粒子辐射光谱的能力以及对中尺度大气结构成像的能力。成像光谱仪可以很好地满足上述的需求,这种光学遥感仪器可在光谱维和空间维上同时具有较好的分辨率,应用性能优越^[3,4]。随着人类对外空间认识的加深,空间高层大气的探测意义正在逐渐被人们所重视。目前国外正在广泛开展成像光谱技术在空间高层大气遥感领域的应用,如

表1 观测远紫外波段粒子主要辐射

Table 1 Main radiation of far ultraviolet particles in observation

	O ^I 130.4 nm	O ^I 135.6 nm	N ₂ (LBHs, LBHI) 140~150 nm, 165~180 nm
Limb	Amount of O ₂ absorption	O altitude profile	N ₂ , temperature, amount of O ₂ as seen in absorption
Nadir	Amount of O ₂ absorption	Used with LBHs to form O/ N ₂	N ₂ , solar EUV
Auroral zone	Auroral boundary and amount of column O ₂	Region of electron and proton precipitation	EO, average effective energy, ionization rate and conductance information, effective precipitating flux

2) 各光学系统均使用反射式系统,望远镜多采用离轴抛物镜,光谱成像系统则采用了反射式色散光栅系统,系统总镜片数少。这是由于:一方面远紫外波段无合适的光学透射材料,无法使用透射式光学系统,因此也无法使用棱镜等分光器件;另一方面适用于远紫外波段的光学反射膜层材料反射率低,当镜片数量较多时,系统传输效率不能满足探测灵敏度的要求,因此必须使用镜片数量较少的反射式光学系统^[8]。

3) 由于可调光学参数少,光谱分辨率要求高,故各成像光谱仪光学系统很难实现较高的空间分辨能力。

为了达到能同时实现高空间分辨率和高光谱分辨率的能力,同时避免复杂光学元件制造技术带来的影响,采用串联 Wadsworth 光谱成像系统形式,其准直系统和聚焦系统均为色散光栅。

全球紫外线成像仪(GUVI)、紫外临边专用遥感成像系统(SSULI)和空间电离层遥感探测系统(RAIDS)等,而国内的相关研究则刚刚开展^[5,6]。

本文主要讨论了串联 Wadsworth 系统形式的成像光谱仪,在像差理论的基础上,经过分析获得了改进型串联 Wadsworth 系统的宽波段成像优化条件。针对空间高层大气遥感的空间应用需求,设计了具有高空间分辨率和高光谱分辨率的成像光谱仪光学系统。这为成像光谱技术在我国未来空间高层大气遥感领域的应用提供了一种思路。

2 成像光谱仪光学系统方案特点分析

国外空间高层大气遥感的成像光谱仪光学系统主要有以下几种: Czerny-Turner (C-T) 系统, Rowland 圆系统, Wadsworth 系统等,这些方案的共同特点如下:

1) 主要观测粒子及相关辐射波长波段如表 1 所示^[7]。对高层大气遥感时所要求的高光谱分辨率而言,远紫外成像光谱探测属于宽波段探测。

3 像差分析与校正方法

3.1 球差校正

对于置于准直光中的凹面镜来说,由于球差形成的像斑角扩散^[9]可以写为

$$\omega = 1/(128F^3), \quad (1)$$

式中 F 为该凹面镜或凹面光栅的 F 数。因此,对于串联 Wadsworth 系统来说,其主要球差表达式可以表示为准直镜和凹面聚焦光栅的球差之和,即

$$\theta_s = 1/[128(F_1^3 + F_2^3)], \quad (2)$$

式中 F_1 和 F_2 分别为准直镜和凹面光栅的 F 数。Wadsworth 系统中可取 $F_1 = F_2$ 。故有

$$\theta_s = (F^3)/64. \quad (3)$$

根据实际设计中的像素大小和光学系统焦距可以确定合适的 F 数,从而将球差控制在合理的容差范围内。

3.2 像散校正与宽波段完善成像

狭缝出射光在串联 Wadsworth 光谱成像系统的光路几何示意图如图 1 所示。图中 O 点为第二光栅的曲率中心，曲率半径为 R_2 ； δ_1 为第一光栅衍射角， φ_1 和 θ_1 为第二光栅的入射角和衍射角。在串联 Wadsworth 系统中，经第一光栅色散准直后出射的

各波长光束必然保持平行而入射在第二光栅上。同时由于第二光栅的聚焦和二次色散作用，其出射各波长光束也必然平行入射在焦平面上。图中 $\overline{AB_2}$ 与 $\overline{B_2C_2}$ 表示中心波长光程，而 $\overline{AB_1}$ 、 $\overline{B_1C_1}$ 、 $\overline{B_1C_1'}$ 等为任意波长光程， $\overline{OB_i}$ 为各入射点的局部法线。

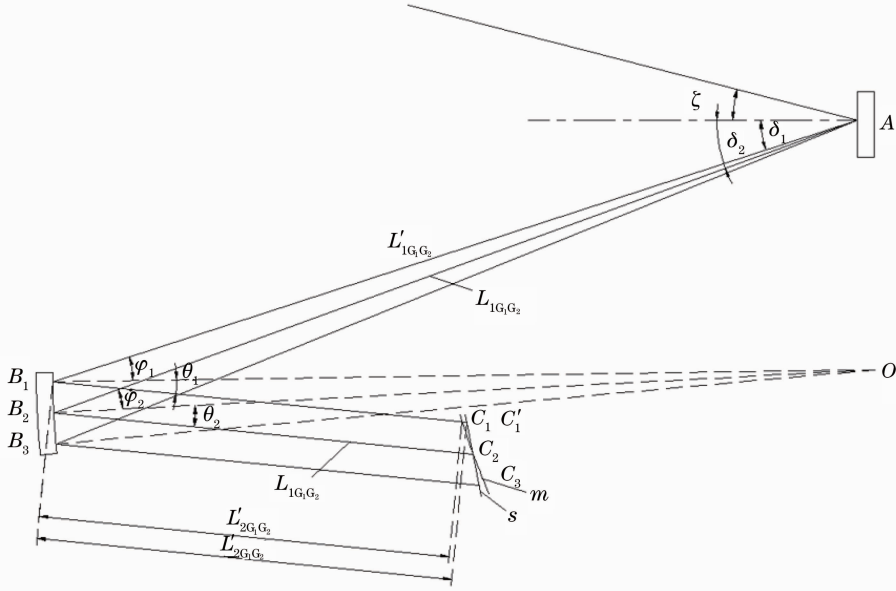


图 1 串联 Wadsworth 系统几何光程图

Fig. 1 Geometric optical path diagram of tandem Wadsworth system

以 O 点为坐标系原点建立相应直角坐标系，根据图中的几何关系可以获得第一光栅到第二光栅之间的向量表达式

$$\begin{cases} \overline{AB_1} = [-L'_{1G_1G_2} \cos \delta_1, -L'_{1G_1G_2} \sin \delta_1] \\ \overline{AB_2} = [-L_{1G_1G_2} \cos \delta_2, -L_{1G_1G_2} \sin \delta_2] \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \overline{OB_1} = [-R_2 \cos(\delta_1 - \varphi_1), -R_2 \sin(\delta_1 - \varphi_1)] \\ \overline{OB_2} = [-R_2 \cos(\delta_2 - \varphi_2), -R_2 \sin(\delta_2 - \varphi_2)] \end{cases}, \quad (5)$$

根据向量三角形的几何关系可知

$$\overline{OA} = \overline{OB_1} - \overline{AB_1} = \overline{OB_2} - \overline{AB_2}, \quad (6)$$

将各坐标代入获得方程组：

$$\begin{cases} L'_{1G_1G_2} \cos \delta_1 - R_2 \cos(\delta_1 - \varphi_1) = L_{1G_1G_2} \cos \delta_2 - R_2 \cos(\delta_2 - \varphi_2) \\ L'_{1G_1G_2} \sin \delta_1 - R_2 \sin(\delta_1 - \varphi_1) = L_{1G_1G_2} \sin \delta_2 - R_2 \sin(\delta_2 - \varphi_2) \end{cases}, \quad (7)$$

将方程组对 δ_2 进行微分，并以 $d\varphi_2/d\delta_2$ 和 $dL_{1G_1G_2}/d\delta_2$ 为待求变量得到方程组

$$\begin{cases} \cos \delta_2 \frac{dL_{1G_1G_2}}{d\delta_2} - R_2 \sin(\delta_2 - \varphi_2) \frac{d\varphi_2}{d\delta_2} = L_{1G_1G_2} \sin \delta_2 - R_2 \sin(\delta_2 - \varphi_2) \\ \sin \delta_2 \frac{dL_{1G_1G_2}}{d\delta_2} + R_2 \cos(\delta_2 - \varphi_2) \frac{d\varphi_2}{d\delta_2} = R_2 \cos(\delta_2 - \varphi_2) - L_{1G_1G_2} \cos \delta_2 \end{cases}, \quad (8)$$

求解得到方程组的解为

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_2}{d\delta_2} = 1 - \frac{L_{1G_1G_2}}{R_2 \cos \varphi_2} \\ \frac{dL_{1G_1G_2}}{d\delta_2} = L \tan \varphi_2 \end{cases}. \quad (9)$$

在进行像差校正的过程中，由第一面光栅出射的色散光线其各自衍射角不同，因此其像差校正实际上是与各波长相关的，但是为了实现宽波段像差校正的能力，就需要使第一光栅色散后的光线在第二光栅上的入射角与入射波长无关，这种情况下就

可以对各波长光线使用相同的像差校正条件。此时入射在第二光栅上的入射角不随第一光栅衍射角的变化而变化。根据一阶微分的条件,(9)式中的第一等式其值为零,从而获得了第一光栅到第二光栅间的最优距离表示为

$$L_{1G_1G_2} = R_2 \cos \varphi_2. \quad (10)$$

根据 Beutler 等^[10]的研究,凹面光栅的最优聚焦成像距离可以表示为

$$\begin{cases} r'_m = [(\cos \varphi + \cos \theta)/R - \cos^2 \varphi/r]^{-1} \cos^2 \theta \\ r'_s = [(\cos \varphi + \cos \theta)/R - 1/r]^{-1} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 r 为光栅的物距, r_m 为子午方向像距, r_s 为弧矢方向像距, R 为光栅曲率半径, φ 和 θ 为光栅的入射角和出射角, 满足光栅方程。对第一光栅, 将各值

代入得其像距为

$$\begin{cases} r'_{1m} = [(\cos \zeta + \cos \delta_1)/R_1 - \cos^2 \xi/r_{1m}]^{-1} \\ r'_{1s} = [(\cos \zeta + \cos \delta_1)/R_1 - 1/r_{1m}]^{-1} \end{cases}. \quad (12)$$

式中 ζ 为第一光栅入射角, δ_1 为第一光栅衍射角, r_{1m} 为第一光栅物距。

第一光栅的像面位置即为第二光栅的物面位置, 对二者之间的几何关系进行分析, 可以获得第二光栅的子午方向和弧矢方向上的物距为

$$\begin{cases} r_{2m} = L'_{1G_1G_2} - r'_{1m} \\ r_{2s} = L'_{1G_1G_2} - r'_{1s} \end{cases}, \quad (13)$$

将其代入(11)式中代换 r , 并将其他各值代入替换可得第二光栅的像距为

$$\begin{cases} r'_{2m} = R_2 \cos^2 \theta_1 \left\{ (\cos \varphi_1 + \cos \theta_1) - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos \varphi_1 - [R_2/R_1 (\cos \xi + \cos \delta_1) - R_2/r_{1m} \cos^2 \xi]^{-1} \cos^2 \delta_1} \right\}^{-1} \\ r'_{2s} = R_2 \left\{ (\cos \varphi_1 + \cos \theta_1) - \frac{1}{\cos \varphi_1 - [R_2/R_1 (\cos \xi + \cos \delta_1) - R_2/r_{1m}]^{-1}} \right\}^{-1} \end{cases}. \quad (14)$$

最终像面上的像散可以表示为

$$|\Delta_{\text{Asti.}}| = \left| 2 \frac{r'_{2s} - r'_{2m}}{r'_{2s} + r'_{2m}} \right|. \quad (15)$$

根据上面推出的像散表达式可以发现, 当第一光栅为平面光栅时, $R_1 = \infty$, 此时其像距和物距均为 ∞ 。故像散校正条件表示为

$$r'_{2s} - r'_{2m} = R_2 \left\{ \frac{\cos^2 \theta_1}{(\cos \varphi_1 + \cos \theta_1)} - \frac{1}{(\cos \varphi_1 + \cos \theta_1)} \right\}^{-1}, \quad (16)$$

当(16)式为 0 时, 像散得到良好校正, 解之可知当衍射角 θ_1 趋近于零时该条件满足。此时有

$$r'_{2m} = r'_{2s} = R_2 (1 + \cos \varphi_1)^{-1}. \quad (17)$$

根据前面推演得到的第一光栅到第二光栅的距离公式可知, 选择适当的第二光栅入射角, 将第一光

栅取为平面光栅, 第二光栅取为凹面光栅, 结构优化时同时满足(10)式和(17)式两个最优距离, 即可使各波长像散得到良好校正, 从而实现宽波段上的像散校正。最终优化条件总结为

$$\begin{cases} L_{G_1G_2} = R_2 \cos \varphi \\ L_{G_2} = R_2 (1 + \cos \varphi)^{-1} \end{cases}. \quad (18)$$

为了满足平面光栅串联凹面光栅的 Wadsworth 系统在狭缝成像光谱仪中的应用, 在平面光栅前端还需增加一准直镜。选择离轴抛物镜做为准直镜, 其特性是无轴上像差, 近轴像差小。

3.3 彗差校正

根据 Beutler 等^[10]的研究, 光栅成像的彗差系数可以写为

$$W_{\text{coma}} = \left[y^2 \left(\frac{\cos^2 \varphi}{r} - \frac{\cos \varphi}{R} \right) + z^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \varphi}{R} \right) \right] \frac{y \sin \varphi}{r} + \left[y^2 \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{R} \right) + z^2 \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{R} \right) \right] \frac{y \sin \theta}{r'}. \quad (19)$$

根据(19)式可知在如前设计的串联 Wadsworth 系统中, 各波长为准直光, 且各波长最终成像位置位于衍射角为零处, 因此(19)式中的 $r \rightarrow \infty, \theta \approx 0$, 故在经过宽波段像散校正之后, 彗差也得

到了完善消除。

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 130~180 nm 波

段的远紫外成像光谱仪光学系统。对于空间高层大气遥感而言,其不均匀结构和热层小范围粒子聚集是主要的成像目标,这些现象属于中尺度高层大气时空特征,一般为 10 km 或小于 10 km,为了对这些现象进行更精确的刻画,设定成像光谱仪天底空间分辨率小于 1 km;另外,根据前面所述的探测粒子远紫外光谱特性,为了对各粒子中心波长和波段进行有效区分,需要光谱仪光谱分辨率达到 1 nm 以下。设定光谱仪拟运行空间环境为轨道高度 830 km。该系统以一个离轴抛物镜为前置望远系统,改进串联 Wadsworth 系统作为光谱成像系统共由两部分组成,其光路图如图 2 所示。

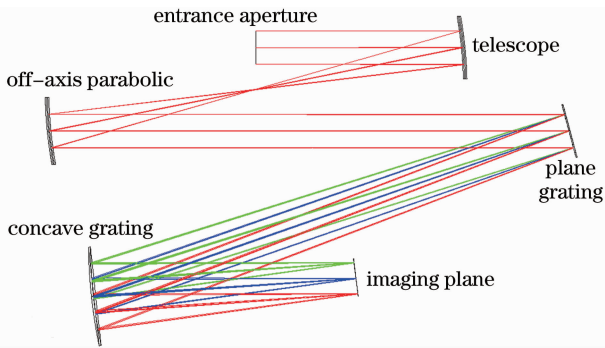


图 2 成像光谱仪光学系统设计图

Fig. 2 Design of imaging spectrometer's optical system

设计成像光谱仪各项主要特性参数如表 2 所示。探测器像素尺寸为 $26 \mu\text{m}$ 。

表 2 光学结构参数

Table 2 Parameters of optical structure

	Characteristic	Value
System	F	7
	Focal length /mm	125
Telescope mirror	Type	Off-axis parabola
	Focal length /mm	100
	Field of view	$0.12^\circ \times 4^\circ$
Collimating mirror	Type	Off-axis parabola
	Focal length /mm	100
1st grating	Type	Plane
	Ruling /mm	1200 grooves
	Incident angle /($^\circ$)	15
	L_{G1-G2} /mm	241
2nd grating	Type	Concave
	Ruling /mm	1200 grooves
	Incident angle δ_2 /($^\circ$)	11
	Curvature /mm	250
	L_{G2-I} /mm	126

4.2 设计结果分析

设计得到的均方根(RMS)像点半径与波长关系图如图 3 所示。

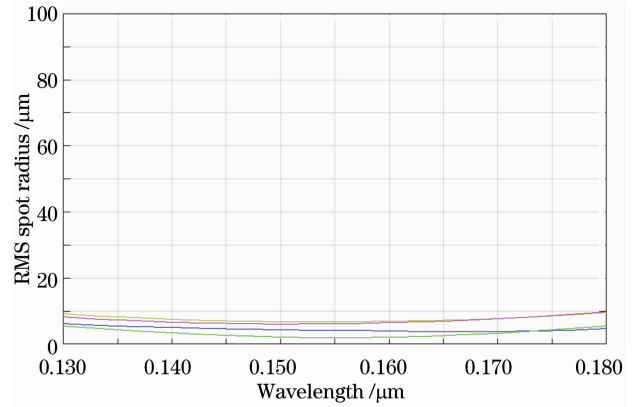


图 3 均方根像点半径与波长关系图

Fig. 3 Relation of RMS image spot radius versus wavelength

图 4 给出了边缘波长和中心波长在各视场下的点列图,可以看到,其均方根半径值均小于 $13 \mu\text{m}$,满足设计要求。

图 5 给出了设计系统中心波长和边缘波长的调制传递函数(MTF)曲线,在 20 lp/mm 的空间频率要求下,全视场全波段 MTF 值达到 0.6 以上,满足设计指标要求。

最终设计系统空间分辨率为 0.4 mrad ,光谱分辨率为 0.6 nm ,达到了非常高的设计指标要求。

目前已有的远紫外空间高层大气遥感成像光谱仪结构主要有 C-T 结构和单光栅结构。本文提出的串联型 Wadsworth 系统对比以上两种结构具有以下优缺点:

1) 光谱仪结构在 F 数和焦距与改进 C-T 系统和单超环面光栅系统相近的情况下,可以实现同样的空间分辨率和更高的光谱分辨率。这是由于串联型 Wadsworth 系统采用两个光栅进行串接,实现了二次分光,故在刻线密度不高的情况下即可实现高光谱分辨率,同时保证了空间分辨率。而且这种串联分光结构可以有效地去除空间遥感中杂散光的影响。

2) 系统的传输效率低于单光栅结构,但是分光器件带来的复杂技术制造问题大大降低,其传输效率主要决定于两个分光器件的衍射效率,可以达到与 C-T 系统相近或更高的水平。

从性能和光栅制作技术而言,串联型 Wadsworth 系统具有很好的实际应用性。

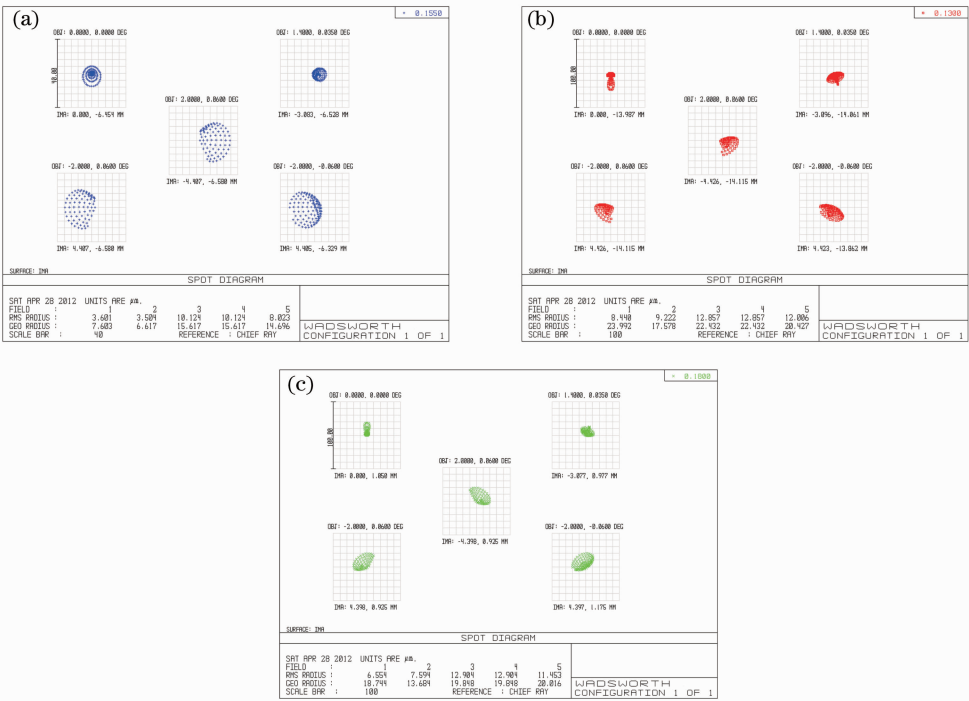


图 4 设计系统的像面点列图分布。波长(a) 130 nm; (b) 155 nm; (c) 180 nm

Fig. 4 Spot diagrams at the image plane of the designed system. Wavelength (a) 130 nm; (b) 155 nm; (c) 180 nm

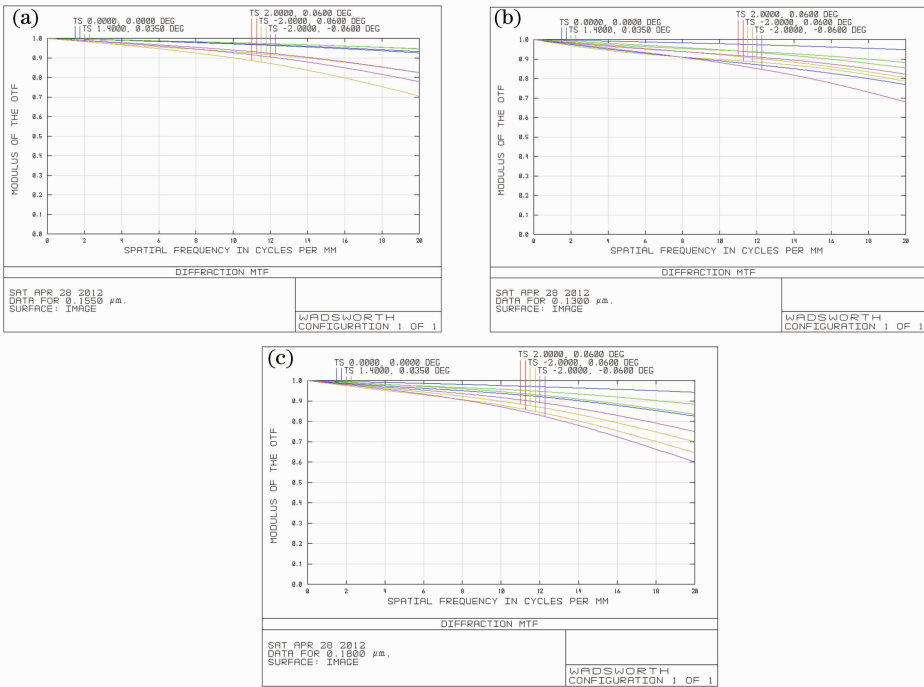


图 5 设计系统 MTF。波长(a)130 nm; (b) 155 nm; (c) 180 nm

Fig. 5 MTF of the designed system. Wavelength (a) 130 nm; (b) 155 nm; (c) 180 nm

5 结 论

设计了可应用于空间高层大气遥感的 130~180 nm 远紫外成像光谱仪光学系统。系统以串联

Wadsworth 系统为基本结构,对系统像差进行了分析修正,获得了宽波段像差校正的最优条件。研究了球差消除的条件,针对像散进行了分析和研究,通过几何关系和一阶微分条件分析获得了两面光栅之

间的最优距离;结合像面上子午和弧矢方向的完善聚焦条件对系统后端的几何关系进行了详细的分析,通过将第一光栅设置为平面光栅,第二光栅设置为凹面光栅,获得了第二光栅到像面的最优距离;两个最优距离相配合便可在宽波段上消除像散。分析了系统的彗差,可知在满足本文设计的基础上系统的彗差得到了良好校正。根据以上理论设计了成像光谱仪,并通过光学设计软件进行了优化和分析,分析结果表明,设计光学系统的像差得到了充分校正,系统在整个波段内的成像质量趋于一致,全视场调制传递函数在全波段达到0.6以上。这种设计研究的成功,将对同类成像光谱仪的研制提供重要的理论依据,并为以后工作的开展奠定相应的基础。

参 考 文 献

- 1 R. R. Meier. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere[J]. *Space Sci. Rev.*, 1991, **58**(1-2): 1~185
- 2 R. Didier, L. Robert. Stratospheric and upper tropospheric aerosol retrieval from limb scatter signals[C]. *SPIE*, 2007, **6745**: 674509
- 3 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
- 4 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
- 5 H. W. Moos, W. C. Cash, L. L. Cowie *et al.*. Overview of the far ultraviolet spectroscopic explorer mission[J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2000, **538**(1): L1~L6
- 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 D. Morrison, L. Paxton, D. 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**: 328~337
- 8 Yu Lei, Wang Shurong, Qu Yi *et al.*. Single-grating optical system of imaging spectrometer with high resolution for ionosphere detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712005
于磊, 王淑荣, 曲艺等. 用于电离层探测的单光栅高分辨率成像光谱仪光学系统研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712005
- 9 Qingsheng Xue, Shurong Wang, Fengqin Lu. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(1): 11~16
- 10 H. G. Beutler. The theory of the concave grating[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1945, **35**(5): 311~350

栏目编辑: 韩峰