

星载宽波段远紫外高光谱成像仪光学系统设计

薛庆生

(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 根据高层大气遥感的应用要求,设计了一个全反射式的远紫外高光谱成像仪光学系统,该系统由扫描镜、离轴抛物面望远镜和超环面光栅光谱仪组成。提出了一种凹面超环面光栅光谱仪像差校正方法,根据凹面光栅的几何像差理论求解初始结构参数,然后利用光学设计软件 Zemax 进行优化,完成了超环面光栅光谱仪的设计,在工作波段内,点列图半径的方均根均小于 $16\ \mu\text{m}$,实现了宽波段像差同时校正,满足光谱分辨率 $0.6\ \text{nm}$ 的指标要求,也证明了提出的像差校正方法是可行的。运用光学设计软件 Zemax 对远紫外高光谱成像仪光学系统进行了光线追迹,并对设计结果进行了分析,分析结果表明,各波长的光学传递函数均达到 0.8 以上,完全满足设计指标要求,且结构紧凑,适合空间遥感应用。

关键词 光学设计;高光谱成像仪;超环面光栅;远紫外;几何像差

中图分类号 O433.1; TH744.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0322001

Optical System Design of a Spaceborne Broadband Far Ultraviolet Hyperspectral Imager

Xue Qingsheng

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

Abstract According to the application requirements for remote sensing of upper atmosphere, a reflective optical system of spaceborne far ultraviolet hyperspectral imager is designed. Which is composed of a scan mirror, an off-axis parabolic telescope and a toroidal grating spectrometer. An aberration-correction method for concave toroidal grating is developed. The initial parameters are solved based on the geometrical aberration theory of concave grating and then optimized using the optical design software Zemax, and the toroidal gating spectrometer is designed. The root mean square of spot radius is less than $16\ \mu\text{m}$ in the working waveband. Aberration is corrected simultaneously in broadband and the requirement of spectral resolution of $0.6\ \text{nm}$ is satisfied, which indicates the aberration-correction method is feasible. Ray tracing and analysing are performed by Zemax software. Analyzed results demonstrate that the modulation transfer function for different wavelength is more than 0.8 , which satisfies the design requirements. The construction is compact and suitable for application in space remote sensing.

Key words optical design; hyperspectral imager; toroidal grating; far ultraviolet; geometrical aberration

OCIS codes 220.0220; 120.4820; 280.4788

1 引言

地球大气层的中间层、低热层和电离层等高层大气对气象、军事、商业通信和导航等具有重要意义,但相对对流层和平流层而言,对高层大气的研究还较少,因此迫切需要探索和研究中间层、低热层和

电离层等高层大气的时空变化^[1]。对高层大气探测敏感的波段是远紫外(FUV)波段($110\sim 180\ \text{nm}$)。远紫外高光谱成像仪可以同时获取远紫外波段的空间和光谱信息,是科学家们关注的焦点^[2,3]。在远紫外波段,采用透射系统已经不可能了,因为光学材

收稿日期: 2012-08-01; **收到修改稿日期:** 2012-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)资助课题。

作者简介: 薛庆生(1979—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计、空间遥感成像光谱技术和光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com

料在此波段的透射率几乎为零,因此只能采用反射式系统。远紫外波段的信号弱,并且光学元件的光谱反射率低,在 120 nm 处仅为 45%左右^[4],要求远紫外高光谱成像仪光学系统包含的光学元件少,光谱传输效率高。远紫外高光谱成像仪在光学结构上主要由扫描镜、望远镜和光谱仪组成,其中光谱仪是主要组成部分,光谱分辨率和空间分辨率均与其密切相关,它决定了高光谱成像仪光学系统的复杂程度、体积和质量等。吴雁等^[5~8]设计的远紫外高光谱成像仪均采用 Czerny-Turner 光谱仪,由准直镜、平面光栅和成像镜组成^[9,10],其特点是光学元件多、光谱传输效率低、能量利用率低、信噪比低。

为减少光学元件数量,提高能量利用率,本文采用凹面光栅光谱仪,凹面光栅同时具有聚焦和色散的功能,与 Czerny-Turner 光谱仪相比,减少了两个光学元件,光谱传输效率提高了 5 倍。普通的凹面球面光栅由于光线的离轴入射,存在很大的像散,严重影响沿狭缝长度方向的空间分辨率,只能用作单色仪^[11~13],不能满足高光谱成像仪的应用要求。为了满足空间分辨率的要求,采用凹面超环面光栅光谱仪,提出了超环面光栅光谱仪的像差校正方法,根据凹面光栅的几何像差理论求解初始结构参数,然后利用光学设计软件 Zemax 进行优化,完成了超环面光栅光谱仪设计,实现了宽波段像差同时校正。超环面光栅光谱仪与离轴抛物面望远镜和平面扫描镜连接组成远紫外高光谱成像仪光学系统,利用光学设计软件 Zemax 对远紫外高光谱成像仪光学系统进行了光线追迹,并对设计结果进行了分析与评价。

2 应用要求及主要技术指标

远紫外高光谱成像仪预计将工作在轨道高度 $H=830$ km 的卫星平台上,主要用于探测中间层、低热层和电离层等高层大气。工作波段为 110~180 nm,利用一个扫描镜步进摆扫实现穿轨 140°扫描,扫描范围包括天底和地球临边,如图 1 所示。每一步可获得由空间信息和光谱信息组成的数据立方体信息。要求光谱分辨率为 0.6 nm,在 $H=830$ km 时空间分辨率为 0.4 km。探测器的像元尺寸为 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,像元数为 256×256 。根据以上要求,确定成像光谱仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

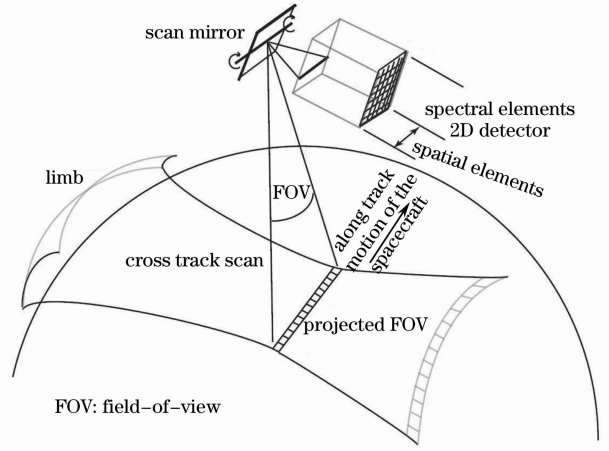


图 1 高光谱成像仪工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of hyperspectral imager

表 1 远紫外高光谱成像仪主要技术指标

Table 1 Specifications of FUV hyperspectral imager

Parameter	Value
Spectral range /nm	110~180
Field of view /($^{\circ}$)	2.4×0.024
Focal length of telescope /mm	120
Focal length of system /mm	120
Entrance diameter /mm	20
Detector array size /pixel	256×256
Detector pixel size / μm	50×50

3 超环面光栅光谱仪设计

光谱仪是远紫外高光谱成像仪的核心,从能量和像差校正方面综合考虑的基础上,采用超环面光栅光谱仪。根据凹面光栅的几何像差理论,提出超环面光栅光谱仪像差校正方法,利用该校正方法进行光谱仪设计。

3.1 像差校正方法

凹面光栅光学结构如图 2 所示。以凹面光栅的

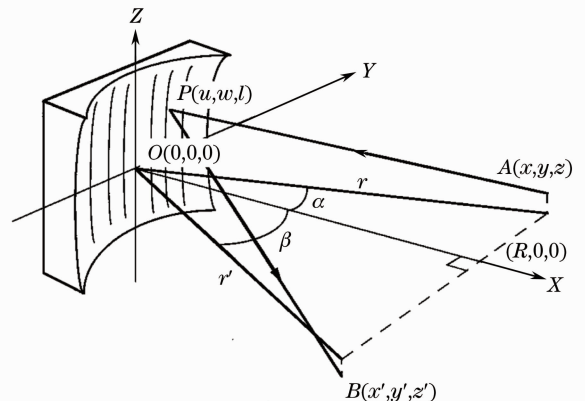


图 2 凹面光栅光学结构图

Fig. 2 Optical layout of concave grating

顶点 O 为坐标原点建立直角坐标系, X 轴为过 O 点的法线方向, Y 轴垂直于光栅刻线方向, Z 轴平行于光栅刻线方向. $A(x, y, z)$ 为入射狭缝平面上的一点, $B(x', y', z')$ 为波长为 λ 的光线经光栅的 m 级衍射所成的像, $P(u, w, l)$ 为光栅面上的任一点. 光线 APB 的光程函数可表示为^[14]

$$F = \langle AP \rangle + \langle PB \rangle + mm\lambda, \quad (1)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 为两点间距离, m 为光栅衍射级次, n 为 P 点到 O 点的光栅刻线数, 可表示为

$$n = w/\sigma_0, \quad (2)$$

式中 σ_0 为 $w = 0$ 处的光栅线距. α 和 β 分别为入射角

和衍射角, R 为光栅在垂直方向的曲率半径.

由于光线的离轴入射, 凹面光栅的垂直焦线与水平焦线不重合, 因此会产生较大的像散, 严重影响垂直方向(狭缝高度方向)的空间分辨率. 因此在水平方向上引入一个与垂直方向不同的半径 ρ , 即凹面光栅为超环面, 其面型方程为

$$u = \frac{l^2}{2R} + \frac{w^2}{2\rho} + \frac{l^4}{8R^3} + \frac{w^4}{8\rho^3} + \frac{l^2 w^2}{4R^2 \rho} + \dots \quad (3)$$

为简化分析过程, 假定 $z = z' = 0$, 则和(3)式代入(1)式, 光程函数 F 可以表示为

$$F = r + r' + wF_{10} + w^2F_{20} + l^2F_{02} + w^3F_{30} + wl^2F_{12} + w^4F_{40} + w^2l^2F_{22} + l^4F_{04} + O(w^5), \quad (4)$$

式中

$$F_{10} = -\sin \alpha - \sin \beta + \frac{m\lambda}{\sigma_0}, \quad (5)$$

$$F_{20} = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} \right), \quad (6)$$

$$F_{02} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right), \quad (7)$$

$$F_{30} = \frac{\sin \alpha}{2r} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) + \frac{\sin \beta}{2r'} \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} \right), \quad (8)$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} \frac{\sin \alpha}{r} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \frac{1}{2} \frac{\sin \beta}{r'} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right), \quad (9)$$

$$F_{40} = \frac{1}{8\rho^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) + \frac{\sin^2 \alpha}{2r^2} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) - \frac{1}{8r} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{8\rho^2} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} \right) + \frac{\sin^2 \beta}{2r'^2} \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} \right) - \frac{1}{8r'} \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} \right)^2, \quad (10)$$

$$F_{22} = \frac{1}{4} \left[\frac{2\sin^2 \alpha}{r^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) - \frac{1}{r} \left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \frac{1}{R\rho} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) \right] + \frac{1}{4} \left[\frac{2\sin^2 \beta}{r'^2} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) - \frac{1}{r'} \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} \right) \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) + \frac{1}{R\rho} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} \right) \right], \quad (11)$$

$$F_{04} = \frac{1}{8} \left[-\frac{1}{r} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right)^2 + \frac{1}{R^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) \right] + \frac{1}{8} \left[-\frac{1}{r'} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right)^2 + \frac{1}{R^2} \left(\frac{1}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) \right]. \quad (12)$$

$O(w^5)$ 为高次项, 是小量, 可忽略. F_{10} 与光栅色散相关, F_{20} 为水平聚焦条件, F_{02} 为垂直聚焦条件, F_{30} 是与彗差相关的像差. 根据费马原理, 成理想像的条件为 $\partial F / \partial w = \partial F / \partial l = 0$, 即 $F_{ij} = 0$. 在实际设计中不可能完全满足理想成像条件, 只能使 F_{ij} 接近于 0, 从而使像差最小. 由 $F_{10} = 0$ 得到光栅方程

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{m\lambda}{\sigma_0}. \quad (13)$$

由水平聚焦条件 F_{20} 等于 0 得

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{\rho} + \frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{\rho} = 0, \quad (14)$$

求解(14)式得到入射臂 r 和出射臂 r' 分别为

$$r = \rho \cos \alpha, \quad (15)$$

$$r' = \rho \cos \beta. \quad (16)$$

将(15)式和(16)式代入(8)式可知, $F_{30} = 0$, 即彗差得到校正. 由垂直聚焦条件 $F_{02} = 0$ 得

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} - \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{R} = 0. \quad (17)$$

将(15)式和(16)式代入(17)式得像散校正条件为

$$R/\rho = \cos \alpha \cos \beta. \quad (18)$$

由光栅方程(13)式可知, 在入射角 α 一定的条件下, 衍射角 β 随波长 λ 变化. 设计波段范围为 $\lambda_1 \sim$

λ_2 , 中心波长 $\lambda_c = (\lambda_1 + \lambda_2) / 2$ 。为了在宽波段内同时校正像散, 设计时使中心波长的衍射光线沿着光栅的法线方向, 即

$$\sin \alpha = \frac{m\lambda_c}{\sigma_0} \quad (19)$$

此时边缘波长 λ_1 和 λ_2 的衍射光线位于光栅法线的两侧, 且 $\beta(\lambda_1) \approx \beta(\lambda_2)$ 。

具体设计时, 根据波段范围和中心波长选择入射角 α 和光栅线距 σ_0 , 然后根据 (13) 式求出不同波长对应的衍射角 β , 根据光谱分辨率要求和光栅线距 σ_0 选择水平半径 ρ , 最后根据 (18) 式计算出垂直半径 R 。

3.2 光谱仪设计

根据所提出的像差校正方法, 远紫外高光谱成像仪的光谱仪采用超环面光栅。波段范围为 110~180 nm, 中心波长 $\lambda_c = 145$ nm, 光谱分辨率为 0.6 nm。入射狭缝尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 5 \text{mm}$, 采用的探测器的像元尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。像元数为 256×256 。

为了保证在 Zemax 光学设计软件中优化结果的准确性和收敛的速度, 先根据 (15)~(19) 式求解初始光学结构参数, 然后再利用 Zemax 软件对初始结构参数进行优化设计。为了得到合理的结构布局 and 满足光谱分辨率的要求, 优化时的约束条件设置为

$$\begin{cases} 3^\circ < \alpha < 10^\circ \\ 157 \text{ mm} < r < 163 \text{ mm} \\ 157 \text{ mm} < r' < 163 \text{ mm} \end{cases} \quad (20)$$

初始和优化的结构参数如表 2 所示。

表 2 初始和 Zemax 软件优化的结构参数

Table 2 Initial structure parameters and those optimized by Zemax software

Parameters	Initial	Optimized by Zemax software
$\alpha / (^\circ)$	4.99	5
σ_0 / mm	1/600	1/600
r / mm	159.39	160.038
r' / mm	160	159.329
ρ / mm	160	160
R / mm	159.36	159.392

利用 Zemax 光学设计软件对设计结果进行分析和评价, 超环面光栅光谱仪的光学结构如图 2 所示。图 3 为不同波长在像面上的点列图分布, 可以看出入射狭缝上的一点在像面上的弥散斑近似呈圆形, 说明像散得到良好校正, 中心波长和边缘波长的点列图均方根 (RMS) 半径 x_{rms} 均小于 $16 \mu\text{m}$, 小于像元尺寸的一半。图 4 为 x_{rms} 随波长的变化关系曲线, 可以看出在宽波段内, x_{rms} 变化不大, 这表明在宽波段内同时获得了良好的成像质量, 也证明了提出的像差校正方法是可行的。

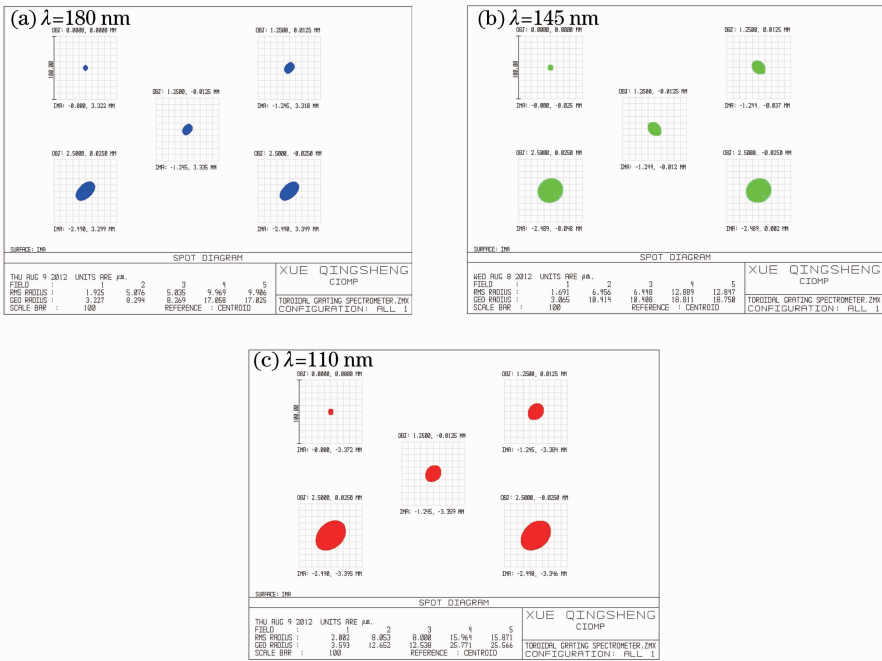


图 3 超环面光栅光谱仪像面上的点列图分布

Fig. 3 Spot diagrams of toroidal grating spectrometer

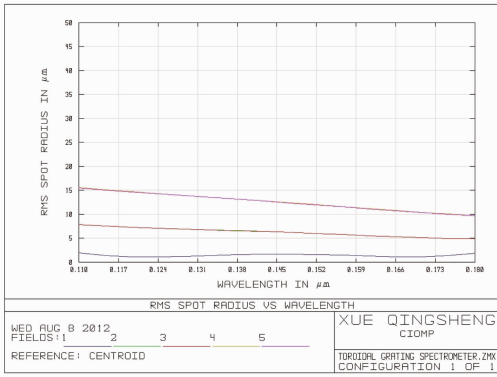


图 4 x_{rms} 随波长的变化关系曲线

Fig. 4 Curves of x_{rms} versus wavelength

远紫外高光谱成像仪的光谱分辨率由光谱仪系统决定,图 5 为间隔 0.6 nm 的两波长在像面上的点列图分布,从图中可以看出,两波长(180 nm 和 179.4 nm, 145 nm 和 145.6 nm,110.6 nm 和 110 nm)在像面上的点列图明显分开,说明光谱分辨率优于 0.6 nm 的指标要求。

入射狭缝上不同高度上的点在像面处的点列图如图 6 所示,狭缝上 0 高度(0 视场)、1.25 mm 高度(半视场)和 2.5 mm 高度(全视场)处的点在像面上的弥散斑近似呈圆形,且弥散斑的尺寸均小于探测器的像元尺寸 50 μm ,表明狭缝上不同高度的点在像面上均获得了良好的成像质量。

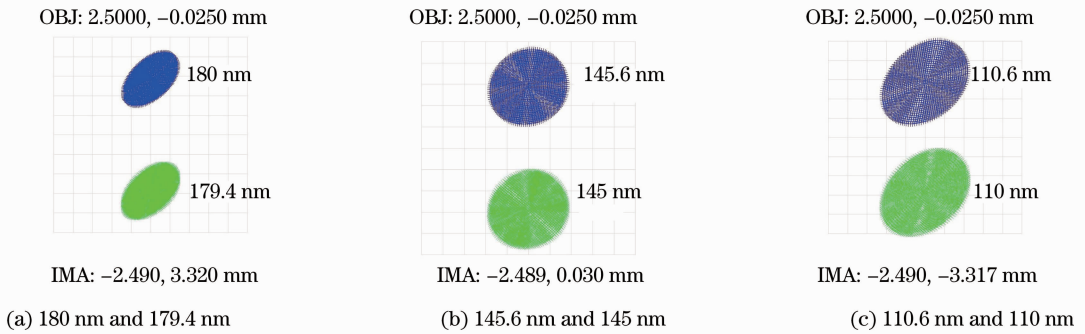


图 5 不同波长的点列图

Fig. 5 Spot diagrams for different wavelengths

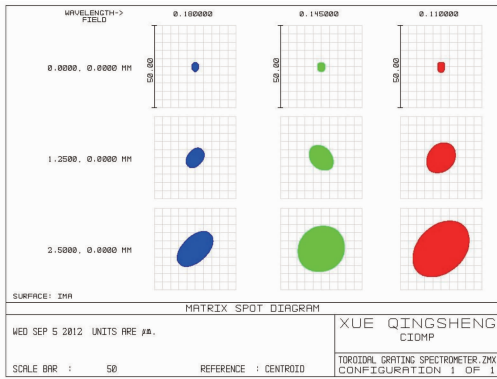


图 6 狭缝上不同高度处的点的点列图分布

Fig. 6 Spot diagrams for spots of different heights on the slit

4 高光谱成像仪光学系统设计

高光谱成像仪光学系统由扫描镜、望远镜和光谱仪组成。目标大气辐射经扫描镜入射到望远镜上,经望远镜成像在狭缝上,望远镜和光谱仪通过狭缝相连接。望远镜波段范围为 110~180 nm,视场 $2.4^\circ \times 0.024^\circ$,焦距 120 mm,入瞳直径 20 mm。为简化望远镜结构,提高能量利用率,望远镜采用单个离轴抛物面镜。把扫描镜、离轴抛物面镜与光谱仪

系统连接组成远紫外高光谱成像仪光学系统结构,如图 7 所示。

远紫外高光谱成像仪的空间分辨率由高光谱成像仪全系统决定。图 8 为高光谱成像仪不同波长的调制传递函数(MTF)曲线,各波长的 MTF 在奈奎斯特频率 10 line/mm 处均大于 0.82,在整个工作波段内同时具有良好的成像质量,完全满足成像质量要求。

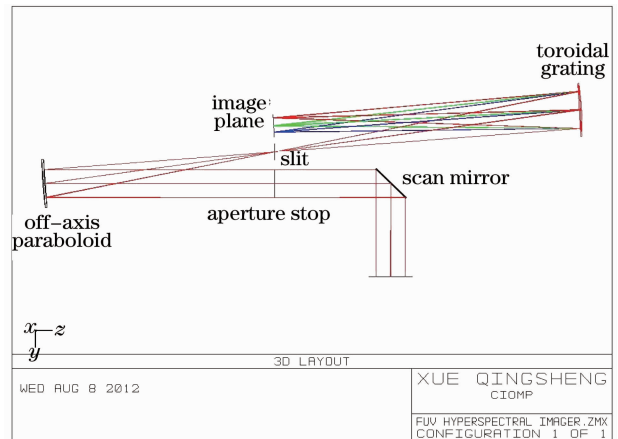


图 7 远紫外高光谱成像仪光学结构图

Fig. 7 Optical structure for FUV hyperspectral imager

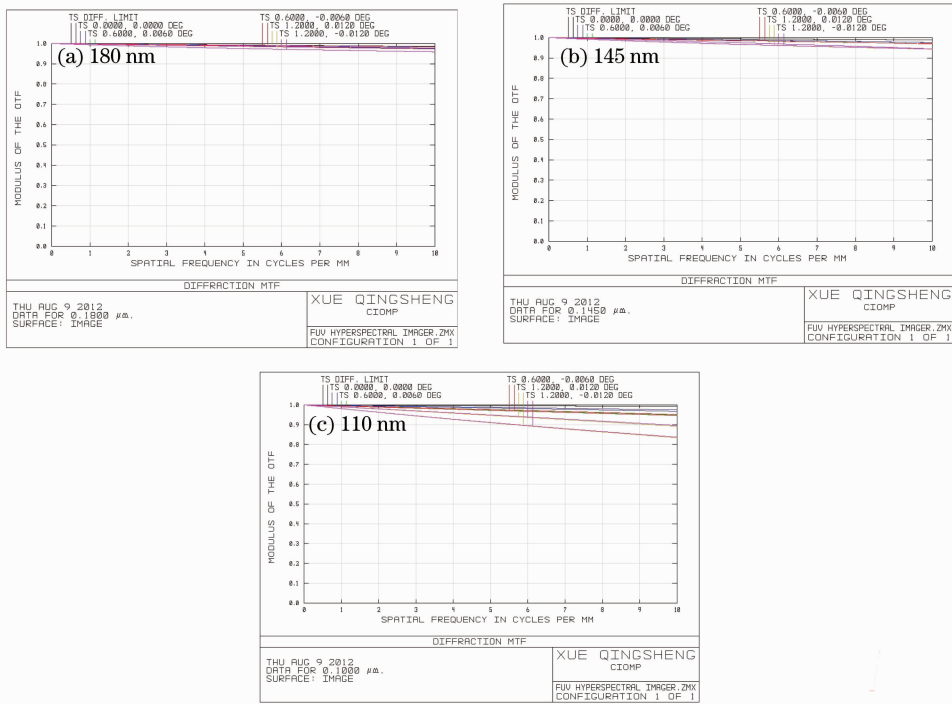


图 8 远紫外高光谱成像仪调制传递函数曲线
Fig. 8 MTF curves of FUV hyperspectral imager

5 结 论

星载宽波段远紫外高光谱成像仪是用于探测高层大气的重要遥感仪器。为了提高能量利用率,采用超环面光栅光谱仪,能量利用率比 Czerny-Turner 光谱仪提高了 5 倍。提出了超环面光栅光谱仪的像差校正方法,根据凹面光栅的几何像差理论求解初始光学结构参数,然后利用光学设计软件 Zemax 优化,完成了超环面光栅光谱仪设计,在工作波段 110~180 nm 内, x_{rms} 均小于 16 μm , 实现了宽波段像差同时校正,满足光谱分辨率 0.6 nm 的指标要求,也证明了提出的像差校正方法是可行的。将超环面光栅光谱仪与单离轴抛物面望远镜和扫描镜连接,组成宽波段远紫外高光谱成像仪,用光学设计软件 Zemax 进行了光线追迹,并对设计结果进行了分析,结果表明,各波长的光学传递函数均达到 0.8 以上,完全满足成像质量要求,并且结构紧凑,适合于空间遥感应用。

参 考 文 献

- 1 Wang Jing, Tang Yi, Tang Lijun *et al.*. Retrieval of ionospheric O/N₂ based on FUV imaging data [C]. *SPIE*, 2009, **7498**: 74982N
- 2 L. J. Paxton, A. B. Christensen, D. Morrison *et al.*. GUVI: a hyperspectral imager for geospace [C]. *SPIE*, 2004, **5660**: 228~240

- 3 J. F. Spann. Compact FUV camera concept for space weather applications [C]. *SPIE*, 2005, **5901**: 59010H
- 4 Yu Lei, Lin Guanyu, Qu Yi *et al.*. Analysis and experimental verification of SNR for a far ultraviolet imaging spectrograph in 115~180 nm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(11): 3156~3160
于磊, 林冠宇, 曲艺等. 115~180 nm 远紫外临边成像光谱仪信噪比分析与验证 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(11): 3156~3160
- 5 Y. Wu, Y. Tan, G. Ni. Design of FUV imaging spectrometer based crossed Czerny-Turner structure [C]. *SPIE*, 2009, **7156**: 715628
- 6 Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122001
吴雁, 唐义, 刘键鹏. 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
- 7 Wu Yan, Tang Yi, Ni Guoqiang *et al.*. FUV imaging spectrometer based on crossed Czerny-Turner structure [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(3): 125~129
吴雁, 唐义, 倪国强等. 一种交叉的切尔尼-特纳型远紫外成像光谱仪 [J]. *光电工程*, 2009, **36**(3): 125~129
- 8 Yu Lei, Lin Guanyu, Qu Yi *et al.*. Study on sensitivity and signal-noise-ratio for a far ultraviolet imaging spectrograph with two detectors based on threshold theory [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2011, **22**(1): 42~46
于磊, 林冠宇, 曲艺等. 基于阈值理论的远紫外成像光谱仪灵敏度和信噪比研究 [J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(1): 42~46
- 9 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
- 10 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
- 11 Zeng Jin, Bayanheshig, Li Wenhao. Optimum design of miniature wide-waveband concave holographic grating monochromator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222003
- 曾瑾, 巴音贺希格, 李文昊. 小型宽波段凹面全息光栅单色仪的优化设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0222003
- 12 Zeng Jin, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. One step method to design concave holographic grating for monochromator [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(9): 2586~2589
- 曾瑾, 巴音贺希格, 李文昊等. 一步法设计单色仪凹面全息光栅[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(9): 2586~2589
- 13 Zeng Jin, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Effect of type-IV concave holographic grating parameter errors on spectral performance and compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1005005
- 曾瑾, 巴音贺希格, 李文昊等. IV凹面全息光栅参数误差对光谱性能的影响及补偿[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1005005
- 14 T. Namioka. Theory of the concave grating[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49**(5): 446~460

栏目编辑：韩峰