

# 星载扫描层析临边成像光谱仪光学设计

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** 星载扫描层析临边成像光谱仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求,根据临边宽水平覆盖轻小型星载扫描层析临边成像光谱仪的研究目标,采用一维扫描镜、离轴抛物面望远系统和非球面光栅光谱成像系统匹配,设计了一个视场 $0.75^\circ \times 0.017^\circ$ 、相对孔径 $1/1.8$ 、工作波段 $280\sim 800\text{ nm}$ 的星载扫描层析临边成像光谱仪光学系统,利用光学设计软件CODE V进行了光线追迹和优化设计,光谱成像系统不同波长的点列图直径的均方根(RMS)值均小于 $34\text{ }\mu\text{m}$ ,光谱分辨率 $0.84\text{ nm}$ ,满足的指标要求( $\leq 1.2\text{ nm}$ ),扫描层析临边成像光谱仪全系统在空间方向各波长在特征频率处的光学传递函数均达到 $0.57$ 以上,能够满足成像质量要求,适合空间大气遥感应用。

**关键词** 光学设计;临边成像光谱仪;望远系统;光谱成像系统;扫描层析

中图分类号 O433.1; TH744.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0422001

## Optical Design of Space-Based Scanning Tomographic Limb Imaging Spectrometer

Xue Qingsheng

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

**Abstract** Space-based scanning tomographic limb imaging spectrometer is demanded urgently by space atmospheric remote sensing. Based on the research objective of space-based scanning tomographic limb imaging spectrometer with wide horizontal covering range and minor volume and mass, An optical system of space-based scanning tomographic limb imaging spectrometer is designed using one dimension scanning mirror, off-axis parabolic telescope and aspheric grating spectral imaging system. The field of view of hyperspectral imager is  $0.75^\circ \times 0.017^\circ$ , relative-aperture is  $1/1.8$ , and working waveband is from  $280\text{ nm}$  to  $800\text{ nm}$ . Ray tracing, optimization are performed by CODE V software. The root mean square (RMS) spot diameter for different wavelengths is less than  $34\text{ }\mu\text{m}$  for aspheric grating spectral imaging system. The spectral resolution is  $0.84\text{ nm}$ , which satisfies the requirement of specification ( $\leq 1.2\text{ nm}$ ). The modulation transfer function (MTF) for different wavelengths of imaging spectrometer is more than  $0.57$  at characteristic frequency in the spatial direction. The design results satisfy the requirements of imaging quality, which is suitable for the application of space-based remote sensing.

**Key words** optical design; limb imaging spectrometer; telescope system; spectral imaging system; scanning tomographic

OCIS codes 220.4830; 120.4820; 280.4788

### 1 引言

大气层是地球气候与环境的主要载体和活动舞台,大气遥感对于大气物理学、气候学和天气预报等均具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。空间大气遥感因比地基大气遥感具有更宽的空间覆盖范围、时间的连续性和任务的多样性而成为国际发展的热点和前沿之一。其原理是利用高分辨率成像光谱仪在卫星平台上测量大气

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)、中科院长春光机所领域前沿创新项目

作者简介: 薛庆生(1979—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学系统设计、航天和航空遥感成像光谱技术及光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com

的散射光谱辐射,大气科学家根据测得的光谱数据反演获得大气层的臭氧、气溶胶、大气密度等数据的垂直分布及其变化<sup>[2-3]</sup>。空间大气遥感按观测方式的不同分为天底、临边和掩星三种观测方式。临边观测方式比天底观测方式具有更高的垂直分辨率,比掩星观测方式具有更多的观测机会,可以更好地探测出 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 等大气成分的垂直分布信息,因此成为空间大气遥感领域发展的热点和前沿<sup>[4-5]</sup>。

目前,国际上现有的典型大气临边探测仪器有美国的航天飞机臭氧临边散射试验仪(SOLSE)<sup>[6]</sup>和臭氧绘图和廓线仪(OMPS)<sup>[7]</sup>,二者的特点是狭缝长度方向沿临边高度方向,狭缝宽度方向沿临边水平方向,不对临边进行扫描,因此二者都是对大气临边水平方向某一方位的一个窄条进行探测,临边水平方向的探测范围小于 1 km。另外在可见-近红外波段,不同临边高度的光谱辐亮度信号差别很大,在 0~100 km 临边高度范围内,光谱辐亮度的差别达到 10<sup>6</sup>量级,为使电荷耦合器件(CCD)探测器不饱和,积分时间由最大信号决定,积分时间的大小不能调节。受 CCD 探测器自身动态范围的限制,二者的有效探测范围仅为 0~60 km,临边高度 60~100 km 范围内的信号由于信噪比太低,无法有效探测。因此迫切需要解决现有的星载大气临边探测系统临边水平方向覆盖范围小、积分时间不能调节,信噪比低的问题。

本文根据宽临边水平覆盖星载扫描层析临边成像光谱仪的研究目标,采用一维扫描镜、离轴抛物望远镜和非球面光栅光谱成像系统匹配的结构型式完成了用于空间大气遥感的星载扫描层析临边成像光谱仪光学系统设计,并对设计结果进行了分析,设计满足指标要求。

## 2 应用要求及主要技术指标

根据宽临边水平覆盖高分辨率空间大气遥感的应用需求,星载扫描层析临边成像光谱仪主要对大气中的 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、BrO、OCIO 等大气痕量气体进行探测,如图 1<sup>[8]</sup>所示,O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等大气痕量气体的吸收带在紫外-可见波段。工作波段选择 280~800 nm。仪器预计将来工作在轨道高度 H=800 km 的卫星平台上,要求临边高度方向的范围为 0~100 km,临边高度方向和临边水平方向的像元分辨率(GSD)均优于 1 km,光谱分辨率 Δλ≤1.2 nm。探测器采用面阵 CCD 探测器,像元尺寸为 13 μm×13 μm,像元数为 2048(光谱维)×256(空间维),空间维两个像元合并使用。

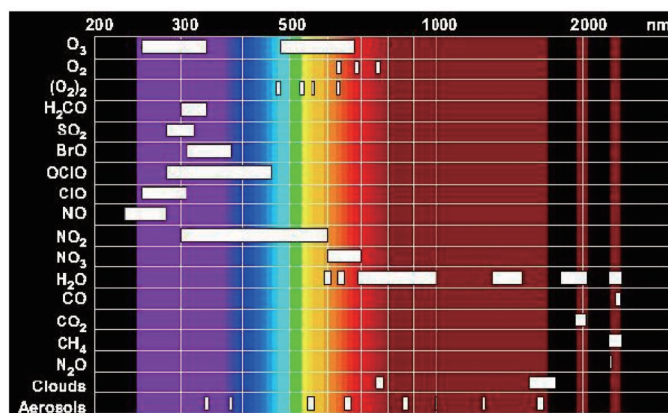


图 1 不同痕量气体对应的吸收波段

Fig.1 Absorption waveband for different trace gases

轨道高度 H=800 km,仪器到临边观测点的距离 L 为 3194 km,覆盖临边高度 0~100 km,临高度方向视场范围为 1.8°,扫描镜转角范围为 0.9°。根据空间分辨率和轨道高度的要求,确定扫描层析临边成像光谱仪的系统焦距 f<sub>s</sub>' 为<sup>[9]</sup>

$$f_s' \geq \frac{a \cdot L}{V_{\text{GSD}}} = 83 \text{ mm}, \quad (1)$$

其中, a=26 μm,在这里留出一定余量,取 f<sub>s</sub>'=85 mm,光谱成像系统的变倍比取 0.283:1,则望远系统的焦距 f<sub>t</sub>'=300 mm。综合考虑工作波段内临边大气散射信号强度和 CCD 探测器的性能参数,取系统的相对孔径为 1/1.8,星载扫描层析临边成像光谱仪的主要技术指标总结如表 1 所示。

表 1 成像光谱仪光学系统主要技术指标

Table 1 Main specifications of imaging spectrometer optical system

Specifications	Values
Spectral range /nm	280 ~ 800
Instantaneous field of view /( $^{\circ}$ )	0.75 $\times$ 0.017
Focal length of telescope $f'_t$ /mm	300
Focal length of system $f'_s$ /mm	85
Size of entrance pupil /mm	43 $\times$ 43
Detector array size /pixel	2048 $\times$ 256
Detector pixel size / $\mu$ m	13 $\times$ 13 (1 $\times$ 2 binning)
Spectral resolution /nm	$\leq$ 1.2
Transfer modulation function	$\geq$ 0.5@19.2 lp/mm

### 3 扫描和望远系统设计

扫描层析临边成像光谱仪利用一维扫描镜在地球临边大气高度方向上进行层析扫描,地球临边大气散射辐射经扫描和望远系统成像在入射狭缝上,入射狭缝作为连接望远系统和光谱成像系统的纽带,入射狭缝长度方向对应临边水平方向 41.8 km,入射狭缝宽度方向对应临边高度方向 1 km,从入射狭缝出射的光辐射经光谱成像系统分波长成像在 CCD 探测器上。仪器的工作波段为 280~800 nm,包含紫外波段。视场角为 0.75 $^{\circ}$  $\times$ 0.017 $^{\circ}$ ,焦距  $f'_t$  为 300 mm,相对孔径为 1/6.25。从避免色差、减小球差和无遮拦的角度考虑,望远系统采用单离轴抛物面结构,光学元件少,能量利用率高。为了与光谱成像系统实现光瞳匹配,望远系统为像方远心结构,为了减小望远系统的体积,入射狭缝前增加了一个平面反射镜进行光路折叠。扫描和望远系统的光学结构如图 2 所示。图 3 为望远系统的光学传递函数(MTF)曲线,在特征频率 19.2 lp/mm 处的 MTF 大于 0.7,优于 MTF 小于等于 0.5 的指标要求。

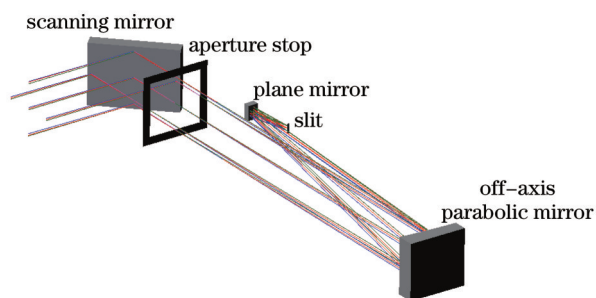


图 2 扫描和望远系统光学结构图

Fig.2 Optical structure of scanning and telescope system

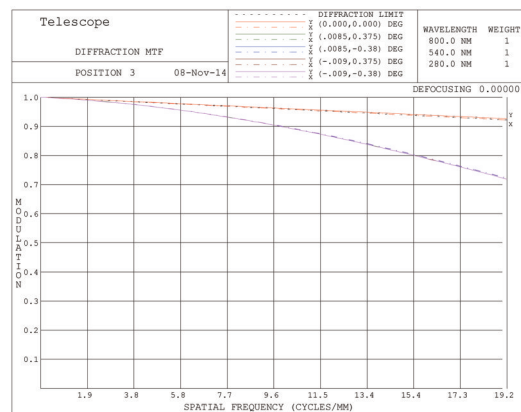


图 3 望远系统光学传递函数曲线

Fig.3 MTF curves of telescope system

### 4 光谱成像系统设计

扫描层析临边成像光谱仪的光谱分辨率完全由光谱成像系统的性能决定。光谱成像系统覆盖波段 280~800 nm,光谱分辨率小于等于 1.2 nm,光谱分辨率要求高。根据所采用的色散元件的不同,可分为棱镜光谱成像系统和光栅光谱成像系统,其中光栅光谱成像系统具有体积小、重量轻、色散均匀和光谱分辨率高的特点<sup>[10-11]</sup>。Ebert-Fastie 系统<sup>[12]</sup>和 Czerny-Turner 系统<sup>[13]</sup>是典型的光栅光谱成像系统,其存在较大残余像差,空间分辨率低,不能满足本系统的成像质量要求。根据小型化和高分辨率的要求,选用法国 Jobin-Yvon 公司的非球面光栅作为色散元件,光栅轻微非球面化可补偿球面聚焦镜的像差。非球面光栅光谱成像系统的光学结构如图 4 所示,从入射狭缝出射的光经离轴抛物面准直镜准直后入射到非球面光栅上,经非球面光栅

色散后入射到离轴球面聚焦镜上,由离轴球面聚焦镜聚焦并经平场单元校正场曲后分波长聚焦成像到焦平面上。非球面光栅刻线密度为 600 gr/mm,入射狭缝长度为 3.94 mm,宽度为 0.09 mm。图 5 为平场单元的放大图,平场单元由平场校正透镜、折转棱镜和级次选择滤光片组成。图 6 为非球面光栅光谱成像系统的点列图分布,可以看出,在整个工作波段内,点列图直径的均方根(RMS)值均小于 34  $\mu\text{m}$ 。为保证足够的采样,取光谱维三个像元宽度对应的带宽作为一个谱段,像元尺寸为 13  $\mu\text{m}$ ,三个像元宽度为 39  $\mu\text{m}$ 。光谱成像系统点列图直径的 RMS 值小于三个像元宽度,这表明在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量。

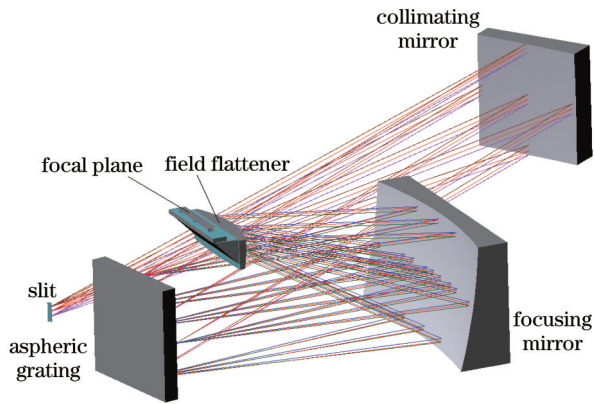


图 4 非球面光栅光谱成像系统光学结构图

Fig.4 Optical structure of aspheric grating spectral imaging system

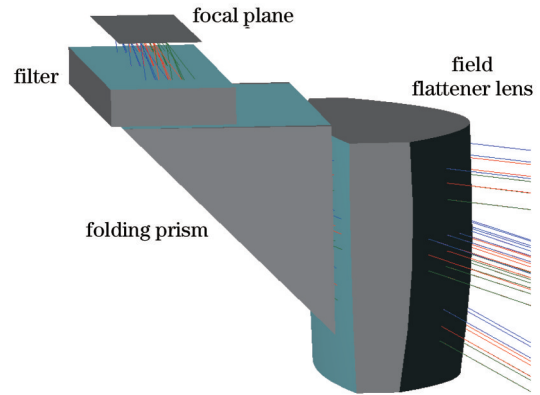


图 5 平场单元放大图

Fig.5 Enlarged view of field flattener

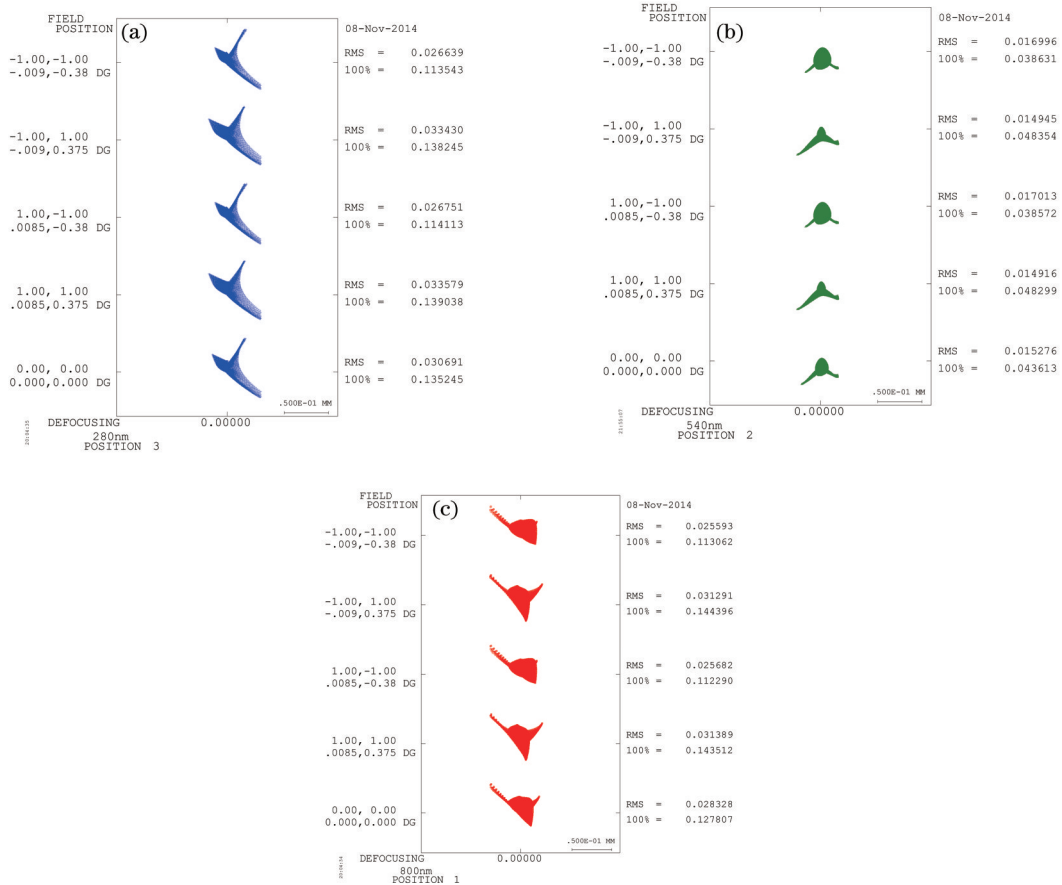


图 6 不同工作波长下非球面光栅光谱成像系统点列图分布。(a)  $\lambda=280\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=540\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=800\text{ nm}$

Fig.6 Spot diagram of aspheric grating spectral imaging system for different wavelengths. (a)  $\lambda=280\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=540\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=800\text{ nm}$

280~800 nm 波段在像面上的色散宽度为 26 mm, 则线色散率的倒数为

$$\frac{d\lambda}{dl} = 20 \text{ nm/mm}. \quad (2)$$

入射狭缝的几何宽度  $w_s$  为 0.09 mm, 光谱成像系统的变倍比为 0.283:1, 狭缝像的理想几何宽度  $w'_s$  为 0.025 mm。由于实际的光谱成像系统存在衍射和像差, 因此, 入射狭缝上的一个物点在光谱成像系统像面上所成的像是一个弥散斑, 弥散斑在色散方向的宽度直接影响光谱成像系统的光谱分辨率。当系统存在像点弥散时, 单色光谱像为狭缝函数(SF)与点扩展函数(PSF)的卷积。狭缝函数可用矩形函数表示为

$$F_s = \text{rect}\left(\frac{y}{w_s}\right), \quad (3)$$

其中,  $w'_s$  为狭缝像的理想几何宽度。考虑到像点弥散后, 单色光的点扩展函数可以用高斯函数近似地表示为

$$F_{ps} = \exp\left[-\pi\left(\frac{y^2}{D^2}\right)\right], \quad (4)$$

式中  $D$  为色散方向点列图直径的 RMS 值。根据卷积定理可知, 狭缝函数和点扩展函数卷积的傅里叶变换等于其各自傅里叶变换后的乘积, 即:

$$\mathcal{F}(F_s * F_{ps}) = \mathcal{F}(F_s) \cdot \mathcal{F}(F_{ps}), \quad (5)$$

式中 \* 表示卷积, 狭缝函数  $F_s$  的傅里叶变换为

$$\mathcal{F}(F_s) = w'_s \text{sinc}(w'_s u), \quad (6)$$

由于 sinc 函数和高斯函数具有一定的相似性, 在进行估算的时候, 用高斯函数来近似替代 sinc 函数, 即:

$$\mathcal{F}(F_s) = w'_s \text{sinc}(w'_s u) \cong C_1 \exp(-\pi w_s'^2 u^2), \quad (7)$$

其中,  $C_1$  为常数。点扩展函数的傅里叶变换为:

$$\mathcal{F}(F_{ps}) = C_2 \exp(-\pi D^2 u^2), \quad (8)$$

其中,  $C_2$  为常数。把(7)式和(8)式代入(5)式得

$$\mathcal{F}(F_s * F_{ps}) = C_1 C_2 \exp[-\pi(w_s'^2 + D^2)u^2], \quad (9)$$

考虑到衍射和像差的影响, 单色光谱像的几何分布函数, 即仪器线型函数(ILS)的几何分布可表示为

$$I_{ls} = C_3 \exp\left[-\pi \frac{y^2}{(w_s'^2 + D^2)}\right], \quad (10)$$

其中,  $C_3$  为常数, ILS 也为高斯函数, 其半峰全宽可表示为

$$w_e = \sqrt{w_s'^2 + D^2}, \quad (11)$$

$w_s' = 0.025 \text{ mm}$ ,  $D = 0.034 \text{ mm}$ , 则  $w_e = 0.042 \text{ mm}$ 。则 280~800 nm 波段的光谱分辨率为

$$\Delta\lambda_1 = \frac{d\lambda}{dl} \times w_e = 0.84 \text{ nm}, \quad (12)$$

满足光谱分辨率小于等于 1.2 nm 的指标要求。

## 5 成像光谱仪全系统设计

将优化设计的扫描和望远系统与非球面光栅光谱成像系统连接得到扫描层析临边成像光谱仪全系统的结构如图 7 所示, 光学尺寸为 450 mm×350 mm×200 mm, 质量约为 10 kg, 具有体积小、重量轻的特点。表 2 为成像光谱仪全系统光学设计参数列表。扫描层析临边成像光谱仪的空间分辨率由成像光谱仪全系统的性能决定。在空间方向上, 像元尺寸为 0.026 mm, 对应的特征频率为 19.2 lp/mm, 扫描层析临边成像光谱仪全系统不同波长的光学 MTF 曲线如图 8 所示, 在空间方向, 不同波长在特征频率处的光学 MTF 均大于 0.57, 完全满足成像质量要求。

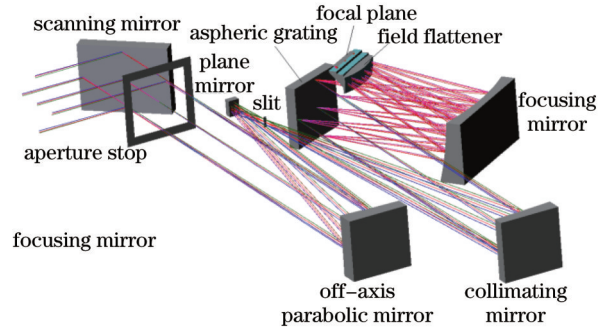


图7 成像光谱仪全系统光学结构图

Fig.7 Optical structure of imaging spectrometer

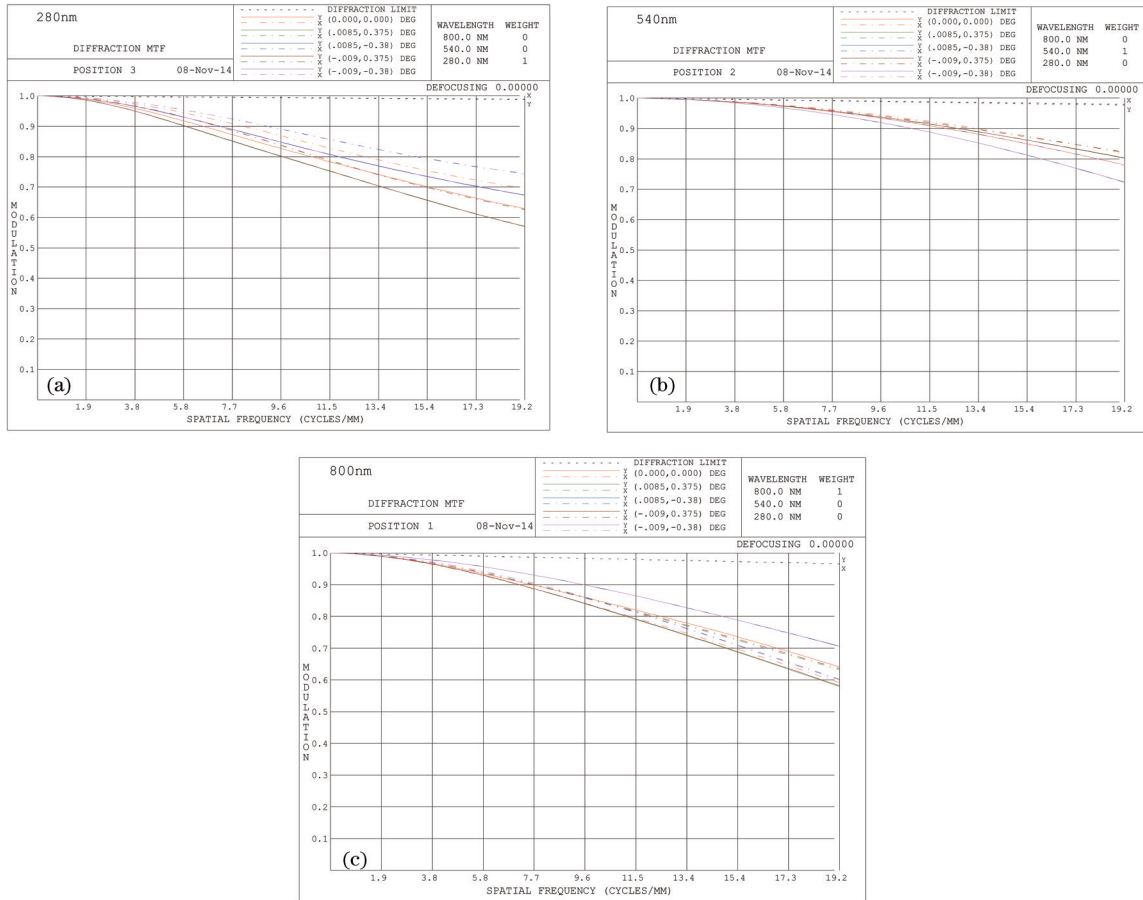


图8 成像光谱仪全系统像不同波长的光学传递函数曲线。(a)  $\lambda=280$  nm; (b)  $\lambda=540$  nm; (c)  $\lambda=800$  nm

Fig.8 MTF curves of imaging spectrometer for different wavelengths. (a)  $\lambda=280$  nm; (b)  $\lambda=540$  nm; (c)  $\lambda=800$  nm

表2 成像光谱仪全系统光学设计参数列表

Table 2 Optical parameters of imaging spectrometer whole system

Optical elements	Radius / mm	Conic parameter	Glass
Scanning mirror	Infinity	0	Mirror
Telescope	-600	-1	Mirror
Plane mirror	Infinity	0	Mirror
Collimating mirror	-600	-1	Mirror
Aspheric grating	-3500	-1	Mirror
Focusing mirror	-220	0	Mirror
Field flattener	-219.5	0	
Lens	-53.6	0	F_silica
Folding prism	Infinity	0	F_silica
Filter	Infinity	0	F_silica

## 6 结 论

扫描层析临边成像光谱仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求,根据宽临边水平覆盖轻小型扫描层析临边成像光谱仪的研究目标,采用一维扫描镜、离轴抛物面望远系统和非球面光栅光谱成像系统匹配的结构型式,设计了一个视场 $0.75^{\circ}\times 0.17^{\circ}$ 、相对孔径1/1.8、工作波段280~800 nm、光谱分辨率优于1.2 nm的星载扫描层析临边成像光谱仪光学系统,用光学设计软件CODE V行了优化设计,并对设计结果进行了分析,分析结果表明,光谱成像系统各波长点列图直径的RMS值均小于 $34\ \mu\text{m}$ ,各波长在特征频率处MTF均达到0.57以上,能够满足成像质量要求,为下一步在空间大气遥感领域的应用奠定了技术基础。

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Yuquan. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 546-561.  
郑玉权. 温室气体遥感探测仪发展现状 [J]. 中国光学, 2011, 4(6): 546-561.
- 2 Xue Qingsheng, Duan Minzheng. Development of limb imaging spectrometer for atmospheric trace gas sounding [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522001.  
薛庆生, 段民征. 用于大气痕量气体探测的临边成像光谱仪 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522001.
- 3 Zheng Yuquan, Gao Zhiliang. Optical system design of CO<sub>2</sub> sounder [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2645-2653.  
郑玉权, 高志良. CO<sub>2</sub>探测仪光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2645-2653.
- 4 Didier Raul. Stratospheric and upper tropospheric aerosol retrieval from limb scatter signals [C]. SPIE, 2007, 6745: 674509.
- 5 Xue Qingsheng. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for space-based atmospheric remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822005.  
薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计 [J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822005.
- 6 D E Flittner, P K Bhartia, B M Herman. O<sub>3</sub> profiles retrieved from limb scatter measurements: theory [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(17): 2601-2604.
- 7 Didier F Rault, Robert Spurr. The OMPS limb profiler instrument two-dimensional retrieval algorithm [C]. SPIE, 2010, 7827: 7827P.
- 8 S Noël, H Bovensmann, J P Burrows. The SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1 [C]. SPIE, 1998, 3498, 94-104.
- 9 Chen Wei, Zheng Yuquan, Xue Qingsheng. Optical system design of airborne wide field-of-view hyperspectral imager [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 1022001.  
陈 伟, 郑玉权, 薛庆生. 宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计 [J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1022001.
- 10 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Yu Xiangyang. Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2535-2542.  
薛庆生, 王淑荣, 于向阳. 大相对孔径宽波段Dyson光谱成像系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2535-2542.
- 11 Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei, *et al.*. Prism hyperspectral imaging optical system design with rectangular aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1222001.  
吴从均, 颜昌翔, 刘 伟, 等. 方形孔径棱镜式成像光谱仪光学设计 [J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1222001.
- 12 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Optical design of holographic plane grating double monochromator with the double decked Ebert-Fastei structure [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(7): 116-120.  
薛庆生, 王淑荣, 李福田. Ebert-Fastei型双层结构平面全息光栅双单色仪的光学设计 [J]. 光电工程, 2008, 35(7): 161-120.
- 13 Xue Qingsheng, Chen Wei. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system wiith wide spectral region [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 233-240.  
薛庆生, 陈 伟. 改进的宽波段车尔尼-特纳光谱成像系统设计 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 233-240.

栏目编辑: 韩 峰