

空间大气遥感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 多模式高光谱成像仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求,根据多模式空间大气遥感的 研究目标,采用扫描系统、离轴抛物面望远系统和双光谱仪级联色散光谱成像系统匹配的结构型式,设计了一个瞬时视场 $1.8^\circ \times 0.045^\circ$ 、相对孔径 $1/2$ 、工作波段 $250 \sim 500 \text{ nm}$ 的星载天底—临边多模式高光谱成像仪光学系统,分成 $250 \sim 330 \text{ nm}$ 和 $320 \sim 500 \text{ nm}$ 两个波段同时探测,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 中进行了光线追迹和优化设计,色散方向不同波长的点列图半径的均方根 (RMS) 值均小于 $9.5 \mu\text{m}$,在 $250 \sim 330 \text{ nm}$ 波段,光谱分辨率为 0.17 nm ,在 $320 \sim 500 \text{ nm}$ 波段,光谱分辨率为 0.37 nm ,均满足小于等于 0.6 nm 的指标要求,高光谱成像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 0.9 以上,完全满足成像质量要求,适合空间大气遥感应用。

关键词 光学设计;高光谱成像仪;望远系统;光谱成像系统;双光谱仪

中图分类号 O433.1; TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0822005

Optical System Design of Multi-Model Hyperspectral Imager for Spaced-Based Atmospheric Remote Sensing

Xue Qingsheng

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

Abstract Space-based atmospheric remote sensing urgently requires multi-model hyperspectral imager. Based on the research objective of multi-model space-based atmospheric remote sensing, an optical system of space-based multi-model hyperspectral imager with nadir and limb models is designed using a scanning system, an off-axis parabolic telescope and a spectral imaging system with a cascade double spectrometer. The instantaneous field of view of hyperspectral imager is $1.8^\circ \times 0.045^\circ$, relative-aperture is $1/2$, and working waveband is from 250 nm to 500 nm . The waveband from 250 nm to 500 nm is divided two wavebands, one is from 250 nm to 330 nm , the other one is from 320 nm to 500 nm . Ray tracing, optimization are performed by ZEMAX-EE software. The root mean square (RMS) spot radius for different wavelengths are less than $9.5 \mu\text{m}$. The spectral resolution is 0.17 nm in the waveband from 250 nm to 330 nm , the spectral resolution is 0.37 nm with waveband from 320 nm to 500 nm , and both of them satisfy the requirement of specification which is less than or equal to 0.6 nm . The modulation transfer function (MTF) for different wavelengths of hyperspectral imager is more than 0.9 at characteristic frequency in the spatial direction. The design results satisfy the requirements of imaging quality, and is suitable for the application of space-based remote sensing.

Key words optical design; hyperspectral imager; telescope system; spectral imaging system; double spectrometer

OCIS codes 220.4830; 120.4820; 280.4788

1 引言

空间大气遥感是地球和空间科学界共同关注的热点课题之一,根据观测模式的不同,空间大气遥感

分为天底观测模式、临边观测模式和掩日、月观测模式^[1-2]。天底观测模式具有空间覆盖范围大的特点,临边和掩日、月观测模式具有垂直分辨率高的特点,

收稿日期: 2014-04-03; **收到修改稿日期**: 2014-04-25

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

但由于掩日、月观测模式只在日(月)出、日(月)落时进行观测,因此,空间覆盖范围小^[3-4]。高光谱成像是20世纪80年代开始在多光谱遥感成像技术基础上发展起来的一种新型航空、航天光学遥感仪器,可以获取整个工作波段内的光谱图像信息,在空间大气、海洋遥感领域正在得到越来越广泛的应用^[5-8]。

欧美等发达国家十分重视空间大气遥感高光谱成像仪的研究,投入了大量的人力和物力,取得了一定的研究成果,采用天底观测模式的典型的高光谱成像仪有欧空局研制的臭氧监测仪(OMI)^[9]和对流层臭氧监测仪(TROPOMI)^[10],采用临边观测模式的典型高光谱成像仪有美国研制的航天飞机载臭氧临边探测实验(SOLSE)^[11]和欧空局研制的扫描成像大气吸收制图仪(SCIAMACHY)^[12],SCIAMACHY还可进行临边和掩日观测。国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制FY-3臭氧垂直探测仪是一台采用天底观测模式的光谱仪^[13]。在国家863计划项目支持下,中科院长春光学精密机械与物理研究所与中国科学院大气物理研究所联合研制的紫外天底探测仪是一台采用临边观测模式的高光谱成像仪^[14]。这些采用天底、临边单模式高光谱成像仪在空间大气遥感中发挥了重要作用,但也各有不足,天底高光谱成像仪的空间覆盖范围大,但垂直分辨率低,临边高光谱成像仪的垂直分辨率高。天底观测模式和临边观测模式具有很强的探测数据互补性,天底观测模式提供星下点大气成像光谱图像,临边观测方式获得地球临边位置上的大气垂直结构。把天底和临边观测模式结合起来,综合利用多种观测模式可以达到最佳的科学观测目的,把大气遥感技术从单一遥感资料分析,向时间和空间上不同数据源的互补和综合分析过渡;把对各自事物的表面性的描述,向内在规律分析、量化分析过渡,因此,多模式高光谱成像仪成为成为空间大气遥感领域的迫切需求。

本文根据多模式空间大气遥感的研究目标,采用扫描系统、离轴抛物面望远系统和双光谱仪级联色散光谱成像系统匹配的结构型式设计了一个用于空间大气遥感的星载天底—临边扫描型多模式高光谱成像仪光学系统,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

根据多模式空间大气遥感的应用需求,高光谱成像仪主要对O₃、SO₂、NO₂等大气痕量气体进行探测,预计将来工作在轨道高度H=830 km的卫星平台上,仪器到临边观测点的距离为

$$L = \sqrt{(R+H)^2 - R^2}, \quad (1)$$

式中R=6378 km为地球半径,可获得L=3370.89 km。如图1所示,要求临边高度方向的覆盖范围为0~100 km,临边水平方向的覆盖范围为1000 km,天底穿轨方向的覆盖宽度为±500 km。天底观测模式,空间分辨率为34 km(沿轨)×60 km(跨轨),临边观测模式,垂直分辨率为3 km;工作波段为250~500 nm,光谱分辨率大于等于0.6 nm;探测器采用线阵探测器,像元尺寸为25 μm×2500 μm,像元数为1024 pixel×1 pixel。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。

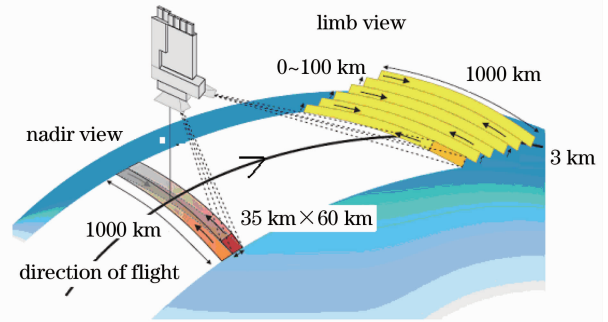


图1 天底-临边扫描观测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of nadir-limb scanning view

表1 高光谱成像仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of hyperspectral imager optical system

Parameter	Value
Spectral range /nm	250~500
Instantaneous field of view /($^{\circ}$)	1.8×0.045
Focal length of telescope f'_t /mm	240.269
Focal length of system f'_s /mm	62
Diameter of entrance pupil /mm	31
Entrance diameter /mm	10.4
Detector array size /pixel	1024×1
Detector pixel size /μm	25×2500
Spectral resolution /nm	≤0.6

3 扫描系统和望远系统设计

多模式高光谱成像仪要求具有天底和临边两种观测模式,天底和临边覆盖的范围都很大。根据多模式高光谱成像仪的应用要求,天底观测可通过一个俯仰扫描镜摆扫实现,临边观测通过一个俯仰扫描镜和一个方位扫描镜配合使用来实现,两扫描镜的转轴相互垂直。天底—临边扫描型多模式高光谱成像仪光学系统由扫描系统、望远系统和光谱成像系统。扫描系统由俯仰扫描镜和方位扫描镜组成,

天底观测时,天底大气散射光谱辐射经俯仰扫描镜进入光学系统入瞳,扫描范围为 $\pm 33^\circ$,获取天底 $\pm 500\text{ km}$ 的大气光谱数据,俯仰扫描镜进行天底观测的光学结构如图2所示。临边观测时,地球临边光谱辐射经方位扫描镜、俯仰扫描镜进入光学系统入瞳,俯仰扫描镜转过 0.9° ,覆盖 $0\sim 100\text{ km}$ 临边垂直高度,方位扫描镜转过 $\pm 4.5^\circ$,获取地球临边 $\pm 500\text{ km}$ 的大气光谱数据,实现临边观测。方位扫描镜与俯仰扫描镜协同工作的光学结构如图3所示。

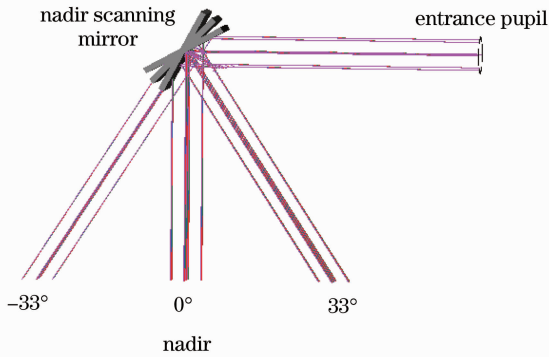


图2 天底扫描镜光学结构图

Fig. 2 Optical structure of nadir scanning mirror

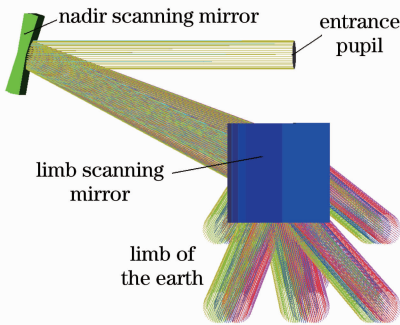


图3 天底和临边扫描镜光学结构图

Fig. 3 Optical structure of nadir and limb scanning mirror

望远系统用于将进入入瞳的光谱辐射成像到入射狭缝上,它覆盖的波段宽($250\sim 500\text{ nm}$),并且包含紫外波段,视场角为 $1.8^\circ \times 0.045^\circ$,焦距 f' 为 240.269 mm ,相对孔径为 $1/7.75$ 。望远系统采用反射式离轴抛物面结构,反射式系统无色差,离轴抛

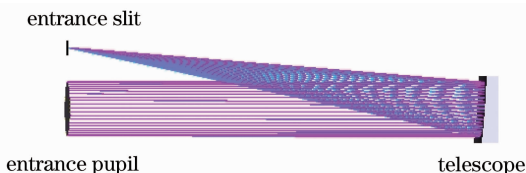


图4 望远系统光学结构图

Fig. 4 Optical structure of telescope system

物面可校正球差^[7]。望远镜的光学结构如图4所示,图5为不同视场的光学传递函数(MTF)曲线,不同视场的光学传递函数在特征频率 10 lp/mm 处均大于 0.809 ,满足成像质量要求。

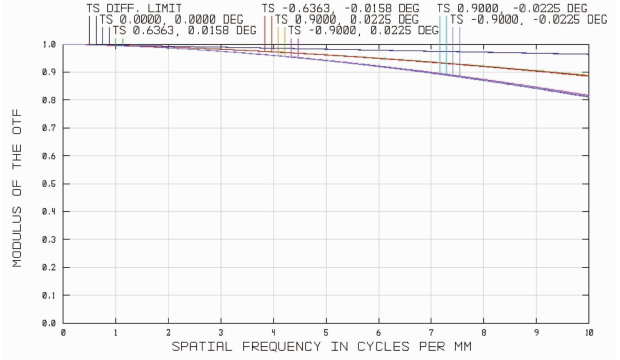


图5 望远系统光学传递函数曲线

Fig. 5 MTF curves of telescope system

4 光谱成像系统设计

从技术指标可以看出,光谱成像系统覆盖的波段宽,光谱分辨率要求高,为了减小杂散光的影响,光谱成像系统采用双光谱仪级联色散方案,即先经一个棱镜光谱仪进行预色散,在棱镜光谱仪的焦平面附近利用分色片分成 $250\sim 330\text{ nm}$ 和 $320\sim 500\text{ nm}$ 两个通道,这两个通道再分别利用光栅色散,聚焦成像在线阵探测器上,光谱成像系统的光学结构如图6所示,入射狭缝尺寸为 $7.6\text{ mm} \times 0.19\text{ mm}$,光谱成像系统的变倍比为 $0.258:1$ 。 $250\sim 330\text{ nm}$ 波段光栅的刻线密度为 3600 g/mm , $320\sim 500\text{ nm}$ 波段,光栅的刻线密度为 1200 g/mm 。从入射狭缝出射的光经准直

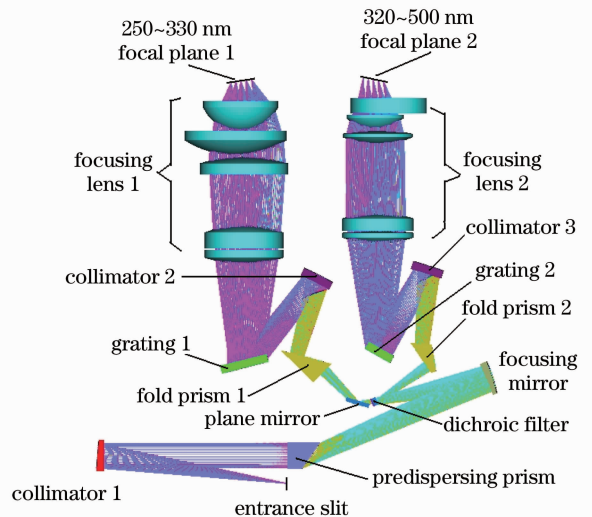


图6 光谱成像系统光学结构图

Fig. 6 Optical structure of spectral imaging system

镜 1 准直后入射到预色散棱镜上,经预色散棱镜色散后,由聚焦反射镜聚焦成像,在聚焦反射镜的像面附近,分色片把 250~500 nm 波段分成 250~330 nm 和 320~500 nm 两个波段,250~330 nm 波段透射,320~500 nm 波段反射。250~330 nm 波段的透射光经平面折转镜、折转棱镜 1 折转后入射到准直镜 2 上,经准直镜 2 准直后入射到平面光栅 1 上,经光栅 1 色散后由聚焦透镜组 1 分波长成像到线阵探测器 1 上。320~500 nm 波段的反射光经折转棱镜 2 折转后入射到准直镜 3 上,经准直镜 3 准直后入射到平面光栅 2 上,经平面光栅 2 色散后由聚焦透镜组 2 聚焦成像到线阵探测器 2 上。表 2 为光谱成像系统主要元件的材料和参数列表。

图 7 为色散方向上点列图半径的均方根(RMS)

值随波长的变化关系曲线,可以看出在,在整个工作波段内,点列图半径的 RMS 值均小于 9.5 μm ,在宽波段内同时获得了良好的成像质量。

表 2 光谱成像系统主要元件的材料和参数列表

Table 2 Materials and parameters of major elements in spectral imaging system

Elements	Radius /mm	Materials
Collimator 1	480.538	Mirror
Predispersing prism	Infinity	F_silica
Focusing mirror	-300	Mirror
Fold prism 1	Infinity	F_silica
Fold prism 2	Infinity	F_silica
Collimator 2	-400	Mirror
Collimator 3	-500	Mirror

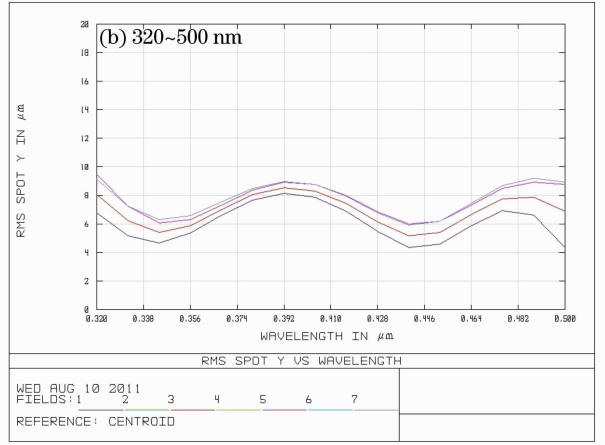
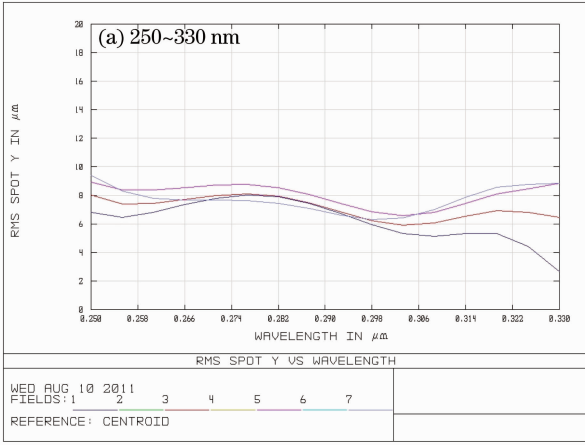


图 7 光谱成像系统色散方向上点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线

Fig. 7 RMS spot radius versus wavelength of spectral imaging system in the dispersion direction

250~330 nm 波段在像面上的色散宽度为 25.18 mm,而线色散率的倒数表示为

$$\frac{1}{\Delta\lambda} = \frac{d\lambda}{dl}, \quad (2)$$

则通道 1 的线色散率的倒数为 3.177 nm/mm。320~500 nm 波段在像面上的色散宽度为 25.20 mm,则通道 2 的线色散率的倒数为 7.14 nm/mm。入射狭缝的几何宽度 w_s 为 0.19 mm,考虑到光谱成像系统的变倍比,狭缝像的理想几何宽度 w'_s 为 0.049 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

$$S_F = \text{rect}\left(\frac{y}{w'_s}\right), \quad (3)$$

式中 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

$$P_{SF} = \exp\left[-\pi\left(\frac{y^2}{D^2}\right)\right]. \quad (4)$$

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:

$$F(S_F * P_{SF}) = F(S_F) \cdot F(P_{SF}). \quad (5)$$

狭缝函数的傅里叶变换为

$$F(S_F) = w'_s \text{sinc}(w'_s u). \quad (6)$$

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:

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

式中 C_1 为常数。点扩展函数的傅里叶变换为:

$$F(P_{SF}) = C_2 \exp(-\pi D^2 u^2), \quad (8)$$

式中 C_1 为常数, D 为色散方向点列图直径的 RMS 值。把(7)式和(8)式代入(5)式得

$$F(S_F * P_{SF}) = C_1 C_2 \exp[-\pi(\omega'_s{}^2 + D^2)u^2], \quad (9)$$

于是可以近似地得到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:

$$I_{ILS} = F^{-1}[F(S_F * P_{SF})] = C_3 \exp\left[-\pi \frac{y^2}{(\omega'_s{}^2 + D^2)}\right], \quad (10)$$

式中 C_3 为常数, ILS 也为高斯函数, 其半峰全宽可表示为

$$\omega_e = \sqrt{\omega'_s{}^2 + D^2}, \quad (11)$$

式中 $\omega'_s = 0.049 \text{ mm}$, $D = 0.019 \text{ mm}$, 则 $\omega_e = 0.0526 \text{ mm}$ 。光谱分辨率可以表示为

$$\Delta\lambda_1 = \frac{d\lambda}{dl_1} \times \omega_e, \quad (12)$$

则 250~330 nm 和 320~500 nm 波段的光谱分辨率分别为 0.17 nm 和 0.37 nm, 光谱分辨率满足小于等于 0.6 nm 的指标要求。

5 高光谱成像仪全系统设计

将优化设计的扫描系统、望远系统和光谱成像光学系统连接得到扫描型多模式高光谱成像仪全系统的光学结构如图 8 所示。空间方向上, 像元尺寸为 2.5 mm, 对应的特征频率为 0.2 lp/mm, 高光谱成像仪全系统不同波长的光学传递函数曲线如图 9 所示, 在空间方向, 不同波长在特征频率处的光学传递函数均大于 0.9, 完全满足成像质量要求。

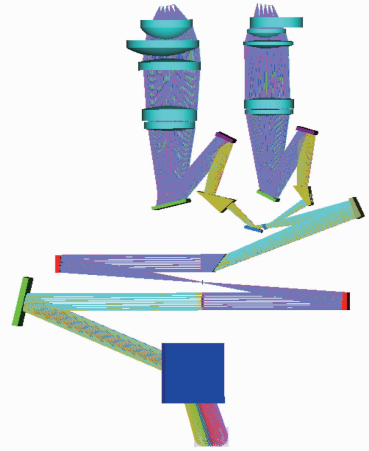


图 8 高光谱像仪全系统光学结构图

Fig. 8 Optical structure of hyperspectral imager

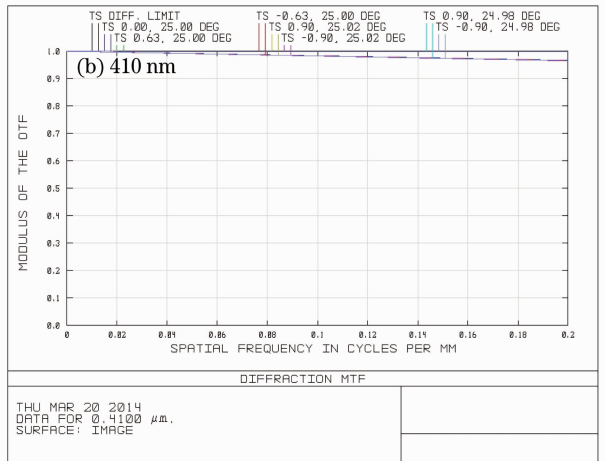
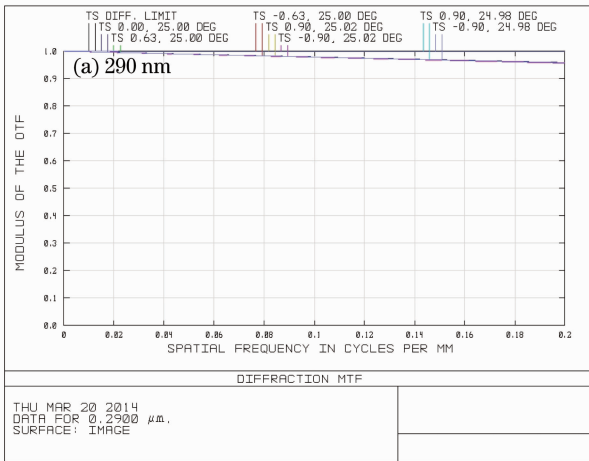


图 9 高光谱像仪全系统像不同波长的光学传递函数曲线

Fig. 9 MTF curves of hyperspectral imager at different wavelengths

6 结 论

多模式高光谱成像仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求, 根据多模式高光谱成像仪的要求, 采用扫描系统、离轴抛物面望远系统和双光谱级联色散光谱成像系统匹配的结构型式, 设计了一个瞬时视场 $1.8^\circ \times 0.045^\circ$ 、相对孔径 1/2, 工作波段 0.25~0.5 μm 、光谱分辨率优于 0.6 nm 的天底-临边扫描

型多模式高光谱成像仪光学系统, 用光学设计软件 ZEMAX-EE 行了优化设计, 并对设计结果进行了分析, 分析结果表明, 色散方向各波长点列图半径的 RMS 值均小于 9.5 μm , 空间方向, 各波长在特征频率处的光学传递函数均达到 0.9 以上, 完全满足成像质量要求, 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 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.
- 2 Zheng Yuquan, Gao Zhiliang. Optical system design of CO₂ sounder [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(12): 2645–2653.
郑玉权, 高志良. CO₂ 探测仪光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2645–2653.
- 3 Zheng Yuquan. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. *Chinese J Optics and Applied Optics*, 2011, 4(6): 546–561.
郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状 [J]. *中国光学*, 2011, 4(6): 546–561.
- 4 Zhang Jing, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Status and development of limb imaging spectrometer [J]. *Chinese J Optics and Applied Optics*, 2013, 6(5): 692–700.
张 晶, 王淑荣, 黄 煜, 等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 692–700.
- 5 Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022004.
钟 兴, 金 光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022004.
- 6 Si Fuqi, Jiang Yu, Jiang Qingwu, *et al.*. Design of fore optical system in space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322002.
司福祺, 江 宇, 江庆五, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0322002.
- 7 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Yu Xiangyang. Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region [J]. *Opt Precision Eng*, 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): 2534–2542.
- 8 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.
- 9 J de Vries, G H J Van Den Oord, E Hilsenrath, *et al.*. Ozone monitoring instrument (OMI) [C]. *SPIE*, 2002, 4480: 315–325.
- 10 J de Vries, E C Laan, R W M Hoogeveen, *et al.*. TROPOMI: solar backscatter satellite instrument for air quality and climate [C]. *SPIE*, 2007, 6744: 674409.
- 11 D M RcPeters, S J Janz, E Hilsenrath, *et al.*. The retrieval of O₃ profiles from limb scatter measurements: results from the shuttle ozone limb sounding experiment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(17): 2597–2600.
- 12 M Van Welle, A R J Van Der, J Van Geffen, *et al.*. Space-based surface UV monitoring for europe using SCIAMACHY and MSG [C]. *SPIE*, 2005, 5979: 59791K.
- 13 Wang Shurong, Li Futian, Song Kefei, *et al.*. Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorological satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 0122004.
王淑荣, 李福田, 宋克非, 等. FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪 [J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2590–2593.
- 14 Xue Qingsheng. Design and study of limb sounder of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(3): 271–277.
薛庆生. 空间遥感大气痕量气体临边探测仪设计与研究 [J]. *光子学报*, 2013, 42(3): 271–277.

栏目编辑: 韩 峰