

星载宽波段临边臭氧廓线探测仪光学设计

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 星载宽波段临边臭氧廓线探测仪是一种新型空间光学遥感器,根据宽波段、大动态范围、小型化的要求,提出了利用随波段衰减滤光片调节入射信号的强度,实现宽波段大动态范围临边成像光谱同时探测的新方法。采用离轴抛物面望远镜和离轴非球面光谱成像系统,设计了一个棱镜色散型宽波段临边臭氧廓线探测仪光学系统,工作波段290~1000 nm、视场 $1.4^\circ \times 0.032^\circ$ 、焦距80 mm,相对孔径1/6。利用光学设计软件ZEMAX-EE进行了优化设计和性能评价,结果表明,成像点弥散斑半径的均方根值最大为6.2 μm ,小于探测器像元尺寸的1/2,在290 nm处,光谱分辨率0.9 nm,在1000 nm处,光谱分辨率22 nm,均满足设计指标要求。临边臭氧廓线探测仪全系统不同波长的光学传递函数在特征频率7.4 lp/mm处大于0.82,设计结果满足成像质量要求,且具有体积小、质量轻的特点,适合空间遥感应用。

关键词 光学设计; 臭氧廓线探测仪; 望远系统; 光谱成像系统; 临边

中图分类号 O433.1; TH744.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0822002

Optical Design of Spaced-Based Broadband Limb Ozone Profile Sounder

Xue Qingsheng

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

Abstract Space-based broadband limb ozone profile remote sensing is a new type space optical remote sensor. Based on the requirements of broadband, large dynamic range, a new method of sounding the broadband limb imaging spectrum simultaneously is proposed. The method uses a filter to change the intensity of entrance signal. Using an off-axis parabolic telescope and off-axis aspheric spectral imaging system, broadband limb ozone profile sounder is designed, which uses a prism as a dispersive element. The working waveband is from 290 nm to 1000 nm, the field of view of is $1.4^\circ \times 0.032^\circ$, the focal length is 80 mm, and the relative aperture is 1/6. Optimization design and performance evaluation are performed by ZEMAX-EE software. The maximum of root mean square for spot radius is 6.2 μm , and less than half size of pixel. The spectral resolution is 0.9 nm at 290 nm, the spectral resolution is 22 nm at 1000 nm, and both of them satisfy the requirement of specification. The modulation transfer function for different wavelengths of limb ozone profile sounder is more than 0.82 at characteristic frequency 7.4 lp/mm. The design results satisfy the requirements of imaging quality, the volume is small, the mass is low, and it is suitable for the application of space-based remote sensing.

Key words optical design; ozone profile sounder; telescope; spectral imaging system; limb

OCIS codes 220.4830; 120.4820; 280.4788

1 引言

臭氧是大气中对气候和环境具有重要作用的痕量气体,是引起气候变化的主要因子,同时又是重要的氧化剂,在大气光化学过程中起着重要作用,平流层中的臭氧阻挡了太阳紫外线因而对地球生命具有重要保护作用,在对流层中,臭氧是主要的污染气体之一^[1-2]。了解大气污染源的排放和分布特征、空气质量预报均需要连续观测臭氧的分布和变化。基于临边散射测量技术的临边臭氧廓线探测是空间臭氧探测的重要手段之一,其原理是通过在紫外(UV)、可见(VIS)和近红外(NIR)波段测量太阳临边散射辐射,反演获得临边10~60 km范围内的臭氧廓

收稿日期: 2014-12-19; 收到修改稿日期: 2015-02-12

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

线分布。臭氧在紫外波段的吸收带主要有 Hartley 带和 Huggins 带,峰值吸收波长在 300 nm 附近^[3]。臭氧在可见波段的吸收带主要有 Chappuis 带,峰值吸收波长在 602 nm 附近。近红外波段则主要用于去除气溶胶的影响^[4]。

高光谱成像技术是在多光谱成像技术基础上发展起来的一种新型的空间光学遥感技术,可以同时获得目标的图像和光谱信息。在陆地、海洋和大气遥感中发挥着越来越重要的作用^[5-6]。星载宽波段临边廓线探测仪是将高光谱成像技术与临边散射测量技术紧密结合的新型空间光学遥感器,可对地球临边大气进行高光谱成像探测,进而反演臭氧的垂直廓线信息。欧美国等发达国家十分重视宽波段临边臭氧廓线探测仪的研究,研制出航天飞机载臭氧临边散射试验仪器(SOLSE)^[7-8],该仪器采用滤光片轮旋转紫外、可见滤光片实现紫外波段和可见波段分时探测,缺点是紫外波段和可见波段探测不同步,反演精度较低。紫外波段的亮度信号比可见波段的亮度信号弱 2~3 个量级,在紫外-可见-近红外波段范围内,亮度信号的变化范围达到了 $10^4 \sim 10^5$ 量级,而电荷耦合器件(CCD)本身的动态范围只有 10^3 量级,因此如何实现宽波段、大动态范围临边成像光谱探测同时探测是宽波段临边臭氧廓线探测仪设计和研制的关键之一。欧空局研制的扫描成像大气吸收制图仪(SCIAMACHY)^[9]利用多个分色片分成多个通道实现了宽波段、大动态范围临边成像光谱探测同时探测,但其缺点是通道多,体积和重量大,不能实现小型化。

本文提出了一种利用随波段衰减滤光片调节入射信号的强度,实现宽波段、大动态范围临边成像光谱同时探测的新方法。完成了棱镜色散型宽波段临边臭氧廓线探测仪光学系统设计,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

臭氧廓线探测要求仪器的光谱分辨率与臭氧的吸收特性相对应,随着波长的增大,臭氧的吸收带变宽,仪器的工作波段为 290~1000 nm,290 nm 处,半峰全宽(FWHM)小于等于 1.2 nm;1000 nm 处,FWHM 小于等于 30 nm,临边高度方向的探测范围为 10~60 km,临边高度方向视场(FOV)覆盖范围 10~90 km,临边高度方向,空间像元分辨率(GSD)为 3 km。所选择探测器的像元尺寸为 $22.5 \mu\text{m} \times 22.5 \mu\text{m}$,像元数为 1252(光谱维) \times 576(空间维),空间维 3 个像元合并使用。

轨道高度 H 按 833 km 计算,仪器中心视场对准临边 50 km 高度,臭氧廓线探测仪与临边观测点之间的距离 L 为

$$L = \sqrt{(R+H)^2 - (R+h)^2} = 3457.6 \text{ km}, \quad (1)$$

式中 $R=6378 \text{ km}$,为地球半径, $h=50 \text{ km}$,为仪器中心视场对应的临边高度。仪器的视场为

$$\theta_{\text{FOV}} = 2 \arctan\left(\frac{L_{\text{CW}}}{2L}\right) = 1.33^\circ, \quad (2)$$

式中 $L_{\text{CW}}=80 \text{ km}$,为临边高度方向覆盖宽度,留出一定余量,取视场为 1.4° 。仪器的焦距为

$$f = \frac{aL}{V_{\text{GSD}}} = 77.8 \text{ mm}, \quad (3)$$

式中 $a=67.5 \mu\text{m}$,为空间维三个像元合并后的等效像元尺寸,留出一定余量,取焦距为 80 mm。根据选择的探测器的性能参数和目标信号的光谱辐射亮度,在综合权衡的基础上,取光学系统的相对孔径为 1/6。光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 臭氧廓线仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of ozone profile sounder optical system

Parameters	Values
Spectral range /nm	290~1000
Field of view /($^\circ$)	1.4
Focal length of telescope f'_t /mm	80
Focal length of system f'_s /mm	80
Diameter of entrance pupil /mm	13.3
Detector array size /pixel	1252 \times 576
Detector pixel size / μm	22.5 \times 22.5 (3 \times 1 binning)
Spectral resolution /nm	1.2 nm@290 nm 30 nm@1000 nm
Modulation transfer function	≥ 0.5 @7.4 lp/mm

3 设计方案选择

临边臭氧廓线探测仪覆盖的波段宽,信号的动态范围大。图1为利用MORTRAN软件仿真得到的地球临边光谱辐亮度随临边高度和波长的变化关系曲线,可以看出,紫外波段的信号弱,可见、近红外波段的信号强,工作波段内,临边光谱辐亮度变化达到 $10^4 \sim 10^5$,为了保证紫外弱信号可探测的条件下,可见和近红外波段强信号在CCD探测器上不饱和,在CCD探测器前放置一个随波段衰减的滤光片对入射信号的强度进行调节,使调节后的信号在CCD探测器的动态范围内。图2为随波段衰减滤光片的透射率曲线,此滤光片利用现有镀膜技术可实现。临边臭氧廓线探测仪为高光谱探测仪器,其光学系统由望远系统和光谱成像系统组成,二者通过入射狭缝连接在一起。地球临边大气辐射经过望远系统成像在入射狭缝上,入射狭缝可看作光谱成像系统的物,入射狭缝经过光谱成像系统分波长成像在CCD探测器上,狭缝像的长度方向为空间维,色散方向为光谱维。临边臭氧廓线探测仪覆盖的波段宽,光谱分辨率要求与臭氧的吸收特性相匹配,紫外波段光谱分辨率要求高,可见、近红外波段的光谱分辨率要求低,因此,光谱成像系统选择棱镜色散型光谱成像系统,棱镜的色散非线性特性正好与光谱分辨率指标要求的特点相吻合。

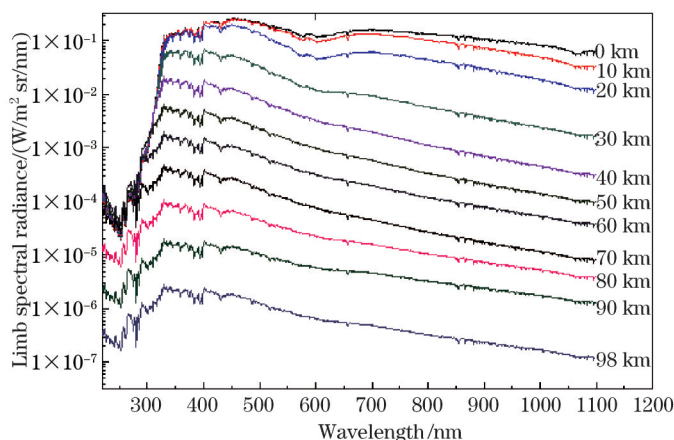


图1 临边光谱辐亮度分布曲线

Fig.1 Curve of limb spectral radiance

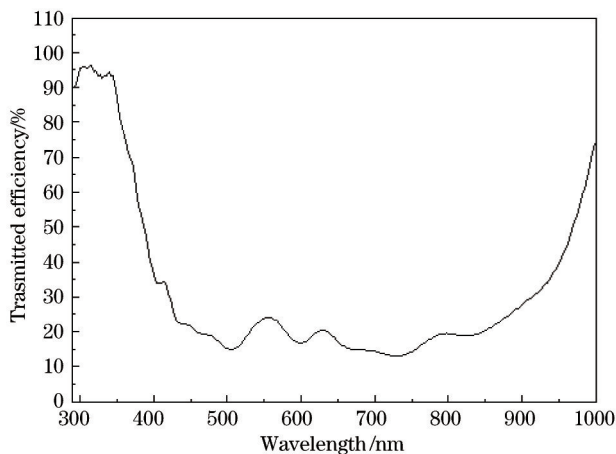


图2 滤光片光谱透射率曲线

Fig.2 Transmitted efficiency curve of filter

4 望远系统设计

望远系统的作用是把地球临边大气辐射成像在入射狭缝上,工作波段290~1000 nm,工作波段宽,覆盖紫外、可见、近红外波段,视场角为 $1.4^\circ \times 0.032^\circ$,焦距 f' 为80 mm,相对孔径为1/6。从原则上讲,望远系统可采用透射式结构和反射式结构,但由于工作波段宽,紫外波段可选择的材料种类少,因此,透射式结构色差校正较困难^[10]。反射式结构可以宽波段工作,同时可避免色差的影响,为了提高能力利用率,望远系统采单

离轴抛物面镜结构。图3为望远系统的光学结构图,图4为望远系统像面上的点列图分布,点列图半径的均方根(RMS)值在小于1/2像元,满足成像质量要求。

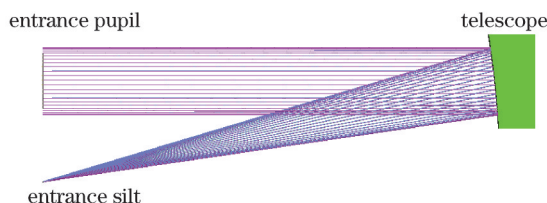


图3 望远系统光学结构图

Fig.3 Optical structure of telescope

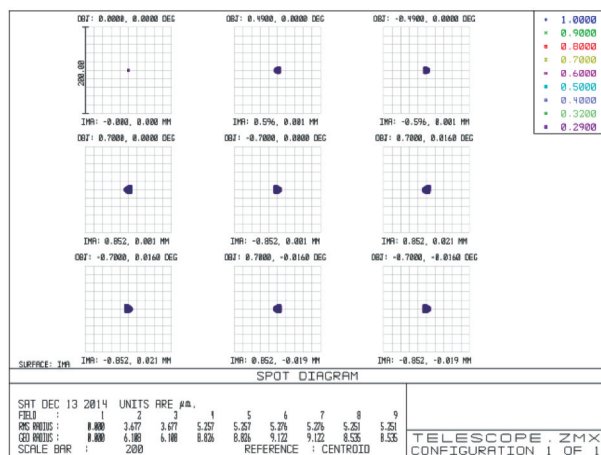


图4 望远系统像面上点列图分布

Fig.4 Spot diagram on the image plane of telescope

5 光谱成像系统设计

光谱成像系统的作用是把望远系统成像在入射狭缝上的像进行色散,分波长成像在探测器像面上^[11-12]。臭氧廓线探测仪的光谱分辨率由光谱成像系统决定,空间分辨率也与光谱成像系统的成像质量密切相关。光谱成像系统采用色散棱镜作为色散元件,其原理是利用棱镜的折射率随波长变化,相同入射角的条件下,出射角随波长变化。因为覆盖的波段宽,且包含紫外波段,色散棱镜采用融石英材料。入射狭缝尺寸为 $2\text{ mm} \times 0.045\text{ mm}$,数值孔径0.08,变倍比为1/1。棱镜色散光谱成像系统典型的光学结构为离轴全球面光谱成像系统(OASIS)^[13],如图5所示,需要大口径的校正透镜穿插在准直和色散光路中,不仅质量大,而且大口径校正透镜的加工也有一定的困难。根据小型化和轻量化的要求,对离轴全球面光谱成像系统进行了改进,一方面,将准直镜和成像镜用非球面代替,取消了大口径校正透镜,另一方面,直接在色散棱镜的第二工作表面镀内反射膜,取消了利特罗反射镜,改进后的离轴非球面光谱成像系统的光学结构如图5所示,从入射狭缝出射的光经平面折转镜折叠后入射到非球面准直镜上,经非球面准直镜准直后入射到色散棱镜的第一工作表面上,再经第二工作表面内反射后从第一工作表面出射,出射后的色散光束由非球面聚焦镜聚焦,并经过滤光片调节光信号后成像在CCD探测器上。

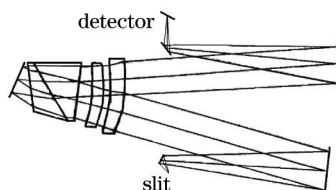


图5 离轴全球面光谱成像系统结构图

Fig.5 Optical path of OASIS spectral imaging system

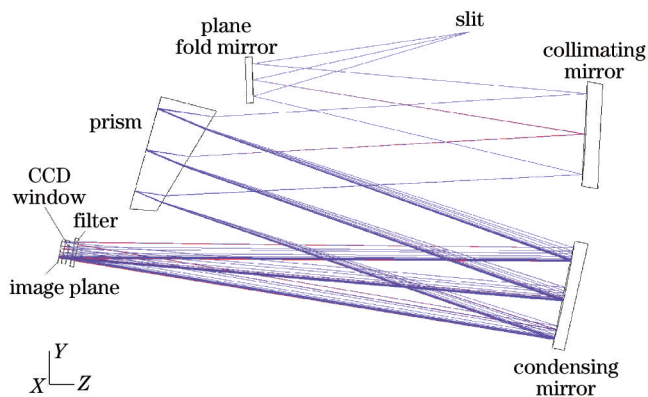


图6 离轴非球面光谱成像系统光学结构图

Fig.6 Optical structure of off-axis aspheric spectral imaging system

图7为点列图半径的RMS值随波长的变化关系曲线,可以看出,在整个工作波段内,点列图半径的RMS值随波长变化不大,最大为6.2 μm,小于探测器像元尺寸的一半,表明在整个工作波段内,成像质量良好。入射狭缝宽度 w_s 为0.045 mm,光谱成像系统的变倍比为1:1,狭缝像的理想宽度 w'_s 为0.045 mm。考虑到像差的影响,实际狭缝像的宽度 w_e 为

$$w_e = \sqrt{w_s'^2 + D^2} = 0.047 \text{ mm}, \quad (4)$$

式中 $D=12.4 \mu\text{m}$, 为色散方向点列图直径的RMS值。光谱成像系统的光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \left(\frac{d\lambda}{dl} \right) \times w_e, \quad (5)$$

式中 $d\lambda/dl$ 为线色散率的倒数。熔石英的折射率随波长的变化关系满足 Sellmeier 公式

$$n = \sqrt{1 + \frac{K_1\lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2\lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3\lambda^2}{\lambda^2 - L_3}}, \quad (6)$$

式中 $K_1=6.96166300 \times 10^{-1}$, $L_1=4.67914800 \times 10^{-3}$, $K_2=4.07942600 \times 10^{-1}$, $L_2=1.35120630 \times 10^{-2}$, $K_3=8.97479400 \times 10^{-1}$, $L_3=9.79340025 \times 10$ 为公式系数。熔石英色散棱镜的顶角 α 为 15.3° , 色散棱镜的偏向角 δ 为

$$\delta = i_1 + \arcsin \left[n \sin \left(2\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i_1}{n} \right) \right) \right] - 2\alpha, \quad (7)$$

式中 i_1 为光线在色散棱镜上的入射角。(7)式两边对波长 λ 微分得到棱镜的角色散为

$$\frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{\sin \left[2\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i_1}{n} \right) \right]}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \left[2\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i_1}{n} \right) \right]}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} + \frac{\sin i_1 \cdot \cos \left[2\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i_1}{n} \right) \right]}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} \cdot \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \left[2\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin i_1}{n} \right) \right]}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (8)$$

光谱成像系统的线色散率为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{f}{\cos \sigma} \cdot \frac{d\delta}{d\lambda}, \quad (9)$$

式中 $\sigma=1.464^\circ$, 为探测器的倾斜角度, f 为聚焦镜的焦距。将(5)~(9)式联立得到光谱分辨率随波长的变化关系曲线如图8所示,在290 nm处光谱分辨率为0.9 nm,在1000 nm处,光谱分辨率为22 nm,优于设计指标要求。

6 臭氧廓线探测仪全系统设计

将优化设计的望远系统和光谱成像系统连接得到临边臭氧廓线探测仪全系统的光学结构如图9所示。空间方向上,三个像元合并使用,等效像元尺寸为67.5 mm,对应的特征频率为7.4 lp/mm,臭氧廓线探测仪全系统不同波长的光学传递函数曲线如图10所示,可以看出,在特征频率处,光学传递函数均大于0.82,优于光学设计指标要求。整个光学系统体积为310 mm × 220 mm × 70 mm,整个仪器的质量可控制在10 kg以内。

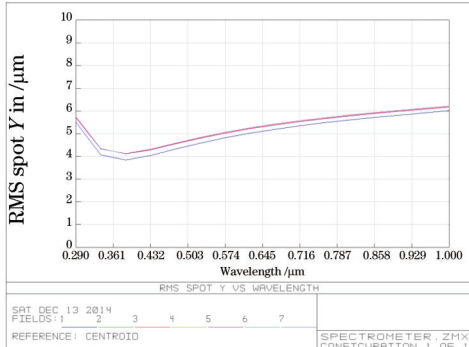


图7 点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线
Fig.7 Change of RMS spot radius with wavelength

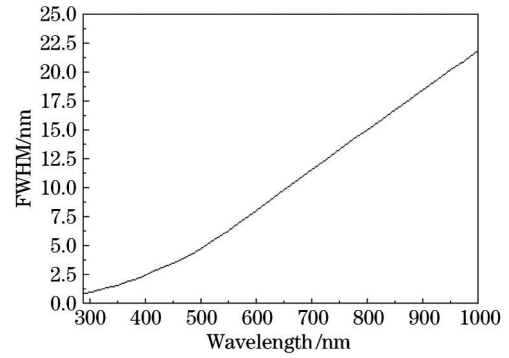


图8 光谱分辨率随波长的变化关系曲线
Fig.8 Change of spectral resolution with wavelength

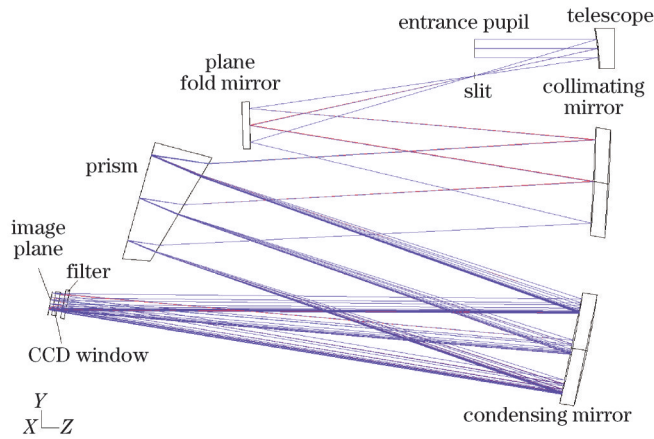


图9 臭氧廓线探测仪全系统光学结构图
Fig.9 Optical structure of ozone profile sounder system

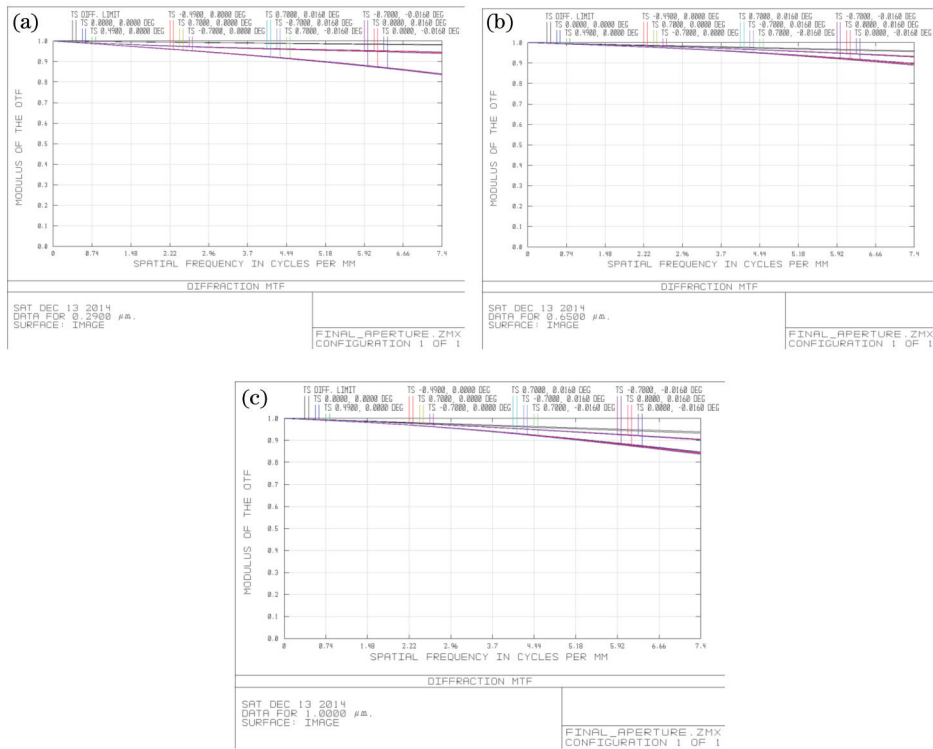


图10 臭氧廓线探测仪全系统不同波长的光学传递函数曲线。(a) 290 nm; (b) 650 nm; (c) 1000 nm
Fig.10 Modulation transfer function curves of ozone profile sounder for different wavelengths. (a) 290 nm; (b) 650 nm; (c) 1000 nm

7 结 论

根据宽波段、大动态范围、小型化的要求,提出了利用随波段衰减滤光片调节入射信号的强度,实现宽波段大动态范围临边成像光谱同时探测的新方法。设计了一个棱镜色散型宽波段临边臭氧廓线探测仪光学系统,工作波段 290~1000 nm、视场 $1.4^{\circ} \times 0.032^{\circ}$ 、焦距 80 mm,相对孔径 1/6。结果表明,成像点弥散斑半径的均方根值最大为 6.2 μm ,小于探测器像元尺寸的 1/2,在 290 nm 处,光谱分辨率 0.9 nm,在 1000 nm 处,光谱分辨率 22 nm,均满足设计指标要求。临边臭氧廓线探测仪全系统不同波长的光学传递函数在特征频率 7.4 lp/mm 处大于 0.82,设计结果满足成像质量要求,工程可实现性好,且具有体积小、质量轻的特点,适合空间遥感应用。

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 Zhang Jing, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. Status and development of limb imaging spectrometer[J]. Chinese 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.
- 3 J W Leitch, J V Rodriguez, M Dittman, *et al.*. Limb scatter ozone profiling sensor for the NPOESS ozone mapping and profiler suite (OMPS)[J]. SPIE, 2003, 4891: 13-21.
- 4 M G Dittman, J Leitch, M Chrisp, *et al.*. Limb broad-band imaging spectrometer for the NPOESS ozone mapping and profiler suite (OMPS)[J]. SPIE, 2002, 4814: 120-130.
- 5 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.
- 6 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Yu Xiangyang. Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region[J]. Optical 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):2534-2542.
- 7 D E Flittner, P K Bhartia, B M Herman. O₃ profiles retrieved from limb scatter measurements: theory[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(17): 2601-2604.
- 8 R D McPeters, 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.
- 9 M van Meele, R J vander, J van Geffen, *et al.*. Space-based surface UV monitoring for Europe using SCIAMACHY and MSG[C]. SPIE, 2005, 5979: 59791K.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Zheng Yuquan, Gao Zhiliang. Optical system design of CO₂ sounder[J]. Optical and Precision Engineering, 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.
- 13 F Blechinger, B Harnisch, B Kunkel. Optical concepts for high resolution imaging spectrometers[C]. SPIE, 1995, 2480: 165-179.

栏目编辑:韩峰