

# 用于大气痕量气体探测的临边成像光谱仪

薛庆生<sup>1</sup> 段民征<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 为满足空间大气遥感的迫切需求,设计并研制了用于大气痕量气体探测的紫外/可见临边成像光谱仪原型样机,对应工作波段为 560~780 nm 和 280~390 nm,分别利用光栅的一级和二级衍射。样机由单块离轴抛物面望远镜和改进型 Czerny-Turner 光谱仪组成,在整个工作波段内,弥散斑半径的均方根(RMS)值均小于 10  $\mu\text{m}$ ,同时获得了良好的成像质量。原型样机质量为 15 kg,体积为 500 mm×350 mm×200 mm,空间分辨率为 0.44 mrad,光谱分辨率为 1.52 nm。利用原型样机进行了外场观测试验,并对外场观测光谱数据与模拟光谱数据进行了对比,发现二者具有很好的一致性,表明了临边成像光谱仪的功能和性能均良好,可以满足大气痕量气体探测的应用要求。

**关键词** 光学设计;成像光谱仪;地球临边;痕量气体;光谱分辨率;空间分辨率

中图分类号 O433.1; TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0522001

## Development of Limb Imaging Spectrometer for Atmospheric Trace Gas Sounding

Xue Qingsheng<sup>1</sup> Duan Minzheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** A prototype of ultraviolet (UV)/visible limb imaging spectrometer is designed and developed to satisfy the urgent requirements of space atmospheric remote sensing. The working waveband are 560~780 nm and 280~390 nm, using first order and second order diffraction of grating separately. The prototype is composed of an off-axis parabolic telescope and modified Czerny-Turner spectrometer. The root mean square (RMS) radius of the disc of confusion is less than 10  $\mu\text{m}$  over the working waveband, and the image quality is obtained satisfactorily. The mass of prototype is 10 kg, the volume is 500 mm×350 mm×200 mm, the spatial resolution is 0.44 mrad, the spectral resolution is 1.52 nm, and all the requirements are satisfied. The field sounding experiment is implemented using the prototype of limb imaging spectrometer. The spectral data measured are compared with spectral data, which indicate that the prototype of limb imaging spectrometer has good function and performance, and satisfies the application requirements of sounding of atmospheric trace gas.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; earth limb; trace gas; spectral resolution; spatial resolution

**OCIS codes** 220.4830; 120.4820; 280.4788

## 1 引言

大气痕量气体探测是监测大气环境污染和研究全球变暖的重要手段<sup>[1]</sup>,基于卫星平台的大气痕量气体探测根据观测方式的不同,分为天底探测方式、掩日/月探测方式和临边探测方式。天底探测方式

的空间覆盖范围高,但垂直分辨率低;掩日/月探测方式的垂直分辨率高,但空间覆盖范围小;临边探测方式同时具备空间覆盖范围大和垂直分辨率高的特点,是较受青睐的探测方式<sup>[2,3]</sup>。

成像光谱仪是图谱合一的新一代光学遥感器,

收稿日期: 2012-09-10; 收到修改稿日期: 2012-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)和中国科学院碳专项子课题(XDA05040103)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

能够一次获得目标一个条带的二维光谱图像数据,沿色散方向的一维为光谱维,与色散方向垂直的一维为空间维。目前,成像光谱仪因为其优越的性能,在工业、农业、气象和国防等领域得到越来越广泛的应用<sup>[4~6]</sup>。临边成像光谱仪是以临边探测方式对大气痕量气体进行探测的成像光谱仪,它是成像光谱技术在大气痕量气体探测领域的新应用。美国和欧洲国家十分重视临边成像光谱仪的研究,取得了一定的研究成果<sup>[7,8]</sup>。国内用于大气痕量气体探测的临边成像光谱仪的研究还处于起步阶段。

本文在分析临边成像光谱探测原理的基础上,根据大气痕量气体探测要求设计并研制出临边成像

光谱仪原型样机,利用原型样机进行了外场观测实验,实验结果表明,临边成像光谱仪原型样机满足应用要求,在下一步星载大气痕量气体探测中具有巨大的应用潜力。

## 2 临边成像光谱探测原理

图1为大气痕量气体临边成像光谱探测的原理图,从图中可以看出,临边成像光谱仪对地球切线方向上的大气进行探测,接收仪器视线不同大气痕量气体的散射辐射,散射辐射的亮度随波长和临边高度变化,通过分析接收到的散射辐射的光谱特性,反演大气痕量气体的空间分布信息。

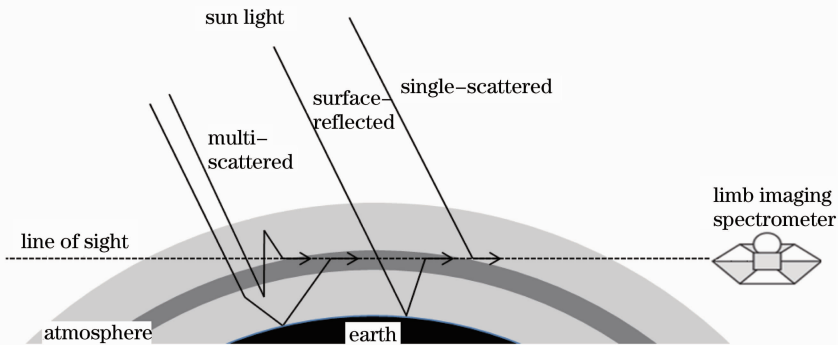


图1 临边成像光谱探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of limb sounding using imaging spectrometer

## 3 应用要求及主要技术指标

不同大气痕量气体的吸收截面如图2所示,从图中可以看出,300 nm附近的紫外波段和600 nm附近的可见波段对大气痕量气体探测比较敏感,因此临边成像光谱仪的工作波段取280~390 nm和560~780 nm,要求在560~780 nm波段的光谱分辨力小于等于1.6 nm,280~390 nm波段的光谱分辨力小于等于0.8 nm。预计仪器将在 $H=400$  km的卫星平台上对地球临边10~80 km的大气进行观测,要求在临边垂直方向的空间分辨力为0.5 mrad(对应临边高度1.2 km)。根据仪器轨道高度 $H=400$  km,计算出它到地球临边的距离为

$$L = \sqrt{(R + H)^2 - R^2} = 2294 \text{ km}, \quad (1)$$

式中 $R=6378$  km为地球半径。采用Princeton公司生产的PIXIS1024/BUV相机作为成像探测器,该相机使用的CCD芯片为E2V公司产品e2VCCD 47-10,是一款背照明紫外增强型CCD探测器,具有低暗电流、高量子效率(QE)的特点,像素为1024 pixel $\times$ 1024 pixel,像元尺寸13  $\mu\text{m}\times$ 13  $\mu\text{m}$ ,2 $\times$ 2合并使用。

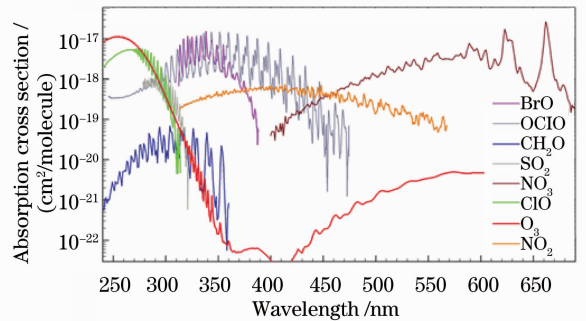


图2 不同痕量气体的吸收截面

图3为相机的实物照片,图4为其量子效率曲线。像元合并后,等效像元尺寸 $a=26$   $\mu\text{m}$ ,根据临边垂直方向像元分辨力的要求,确定临边成像光谱仪光学系统的焦距为

$$f'_s = \frac{aL}{G_{SD}} = 99.4 \text{ mm}, \quad (2)$$

式中 $G_{SD}=0.6$  km,为像元分辨力。为了留出余量,取 $f'_s=120$  mm。临边成像光谱仪的主要技术指标如表1所示。



图3 PIXIS1024/BUV相机照片

Fig. 3 Photograph of PIXIS1024/BUV camera

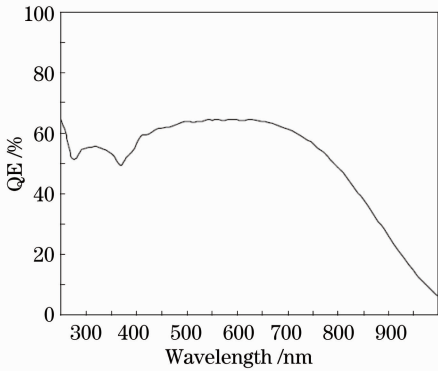


图4 PIXIS1024/BUV相机量子效率曲线

Fig. 4 QE of PIXIS1024/BUV camera

表1 临边成像光谱仪主要技术指标

Table 1 Specifications of limb imaging spectrometer

Specifications	Values
Spectral range /nm	560~780 280~390
Spectral resolution /nm	$\leq 1.6$ $\leq 0.8$
Spatial resolution /mrad	$\leq 0.5$
Field of view /( $^{\circ}$ )	$2.4 \times 0.024$
Focal length of system /mm	120
Pixel size / $\mu\text{m}$	$13 \times 13$ ( $2 \times 2$ binning)
Frame frequency /(frame/s)	$\geq 1$

## 4 临边成像光谱仪研制

### 4.1 光学系统设计

临边成像光谱仪光学系统由望远镜和光谱仪两部分组成,二者通过入射狭缝连接在一起。为了实现紫外(280~390 nm)和可见光(560~780 nm)波段探测,在望远镜前加紫外/可见光带通滤光片,通过滤光片轮旋转滤光片实现紫外/可见光波段探测,紫外波段利用光栅的二级衍射,可见光波段利用光栅的一级衍射。从减小球差和避免色差的角度考虑,望远镜

采用单块离轴抛物面结构,焦距为120 mm。

与凹面光栅和凸面光栅相比,平面光栅具有加工工艺成熟、通用性好等特点,因此,基于平面光栅的光谱仪器受到人们的青睐,应用也较为广泛。单色仪和光谱辐射计等传统的平面光栅光谱仪普遍采用 Czerny-Turner 结构<sup>[9]</sup>,通过凸轮或正弦机构转动光栅实现不同波长的探测,由于采用单元探测器(如光电倍增管等),不要求空间分辨率,在狭缝高度方向上存在严重的像散。而临边成像光谱仪要求在狭缝高度方向(临边垂直方向)具有良好的空间分辨能力,因此传统的 Czerny-Turner 光谱仪不能满足要求。本课题组通过研究传统的 Czerny-Turner 光谱仪<sup>[10]</sup>,利用超环面聚焦镜代替传统 Czerny-Turner 光谱仪中的球面聚焦镜来实现像散校正。通过优化设计光栅到聚焦镜的距离保证在光栅固定的条件下,整个波段同时获得良好的成像质量,即实现了宽波段像差同时校正,为使结构更加紧凑,在光栅和聚焦镜之间插入一个平面反射镜折叠光路。改进型 Czerny-Turner 光谱仪可以满足成像质量要求。

临边成像光谱仪光学系统结构如图5所示,由离轴抛物面望远镜和改进型 Czerny-Turner 光谱仪组成。地球临边的一点在像面上成像点为一个弥散斑,图6为中心波长和边缘波长不同视场的点列图,从弥散斑的形状可看出,像散得到良好校正。弥散斑半径的均方根(RMS)值随波长的变化曲线如图7所示,从图中可看出,在整个工作波段内,弥散斑半径的 RMS 值随波长变化不大,均小于探测器像元尺寸的一半,这表明在整个工作波段同时获得了良好的成像质量。

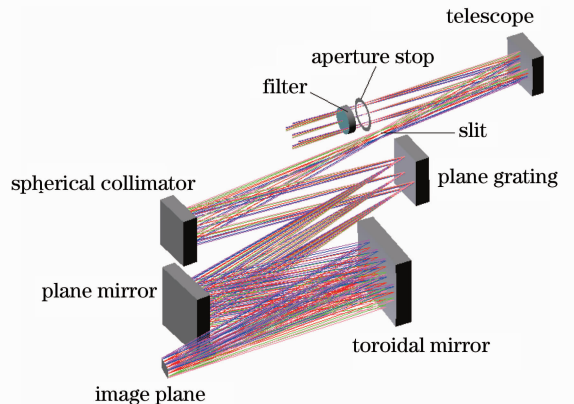


图5 临边成像光谱仪光学结构图

Fig. 5 Optical path of limb imaging spectrometer

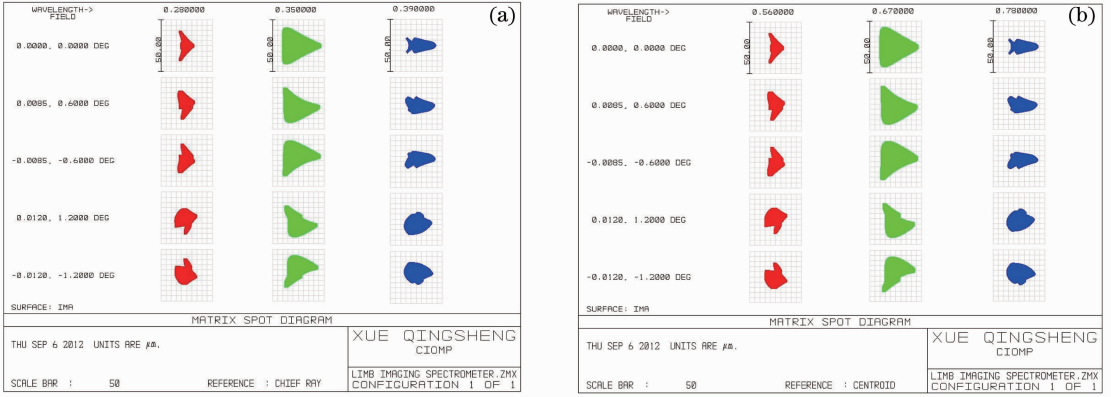


图 6 (a)紫外波段和(b)可见波段的点列图

Fig. 6 Spot diagram for (a) UV waveband and (b) visible waveband

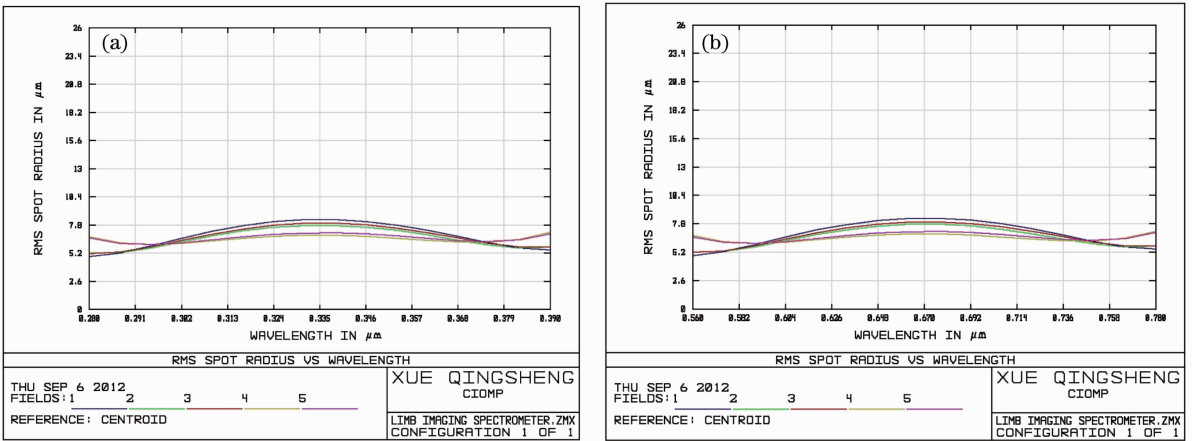


图 7 弥散斑半径的 RMS 值随波长的变化曲线。(a) 280~390 nm; (b) 560~780 nm

Fig. 7 RMS of spot radius versus wavelength. (a) 280~390 nm; (b) 560~780 nm

临边成像光谱仪的光谱分辨力与狭缝像的宽度  $a'_1$ 、探测器的像元尺寸  $a$ 、光谱仪的线色散长度  $l$  及系统的像差有关。狭缝宽度为  $a_1 = 50 \mu\text{m}$ ，光谱仪的变倍比为 1:1，则狭缝像的宽度  $a'_1 = a_1 = 50 \mu\text{m}$ ，探测器的像元尺寸(合并后)  $a = 26 \mu\text{m}$ ，光谱仪的线色散长度  $l = 13.3 \text{ mm}$ ，紫外波段(280~390 nm)和可见光波段(560~780 nm)的波段宽度分别为  $\Delta\lambda_u = 110 \text{ nm}$ ， $\Delta\lambda_v = 220 \text{ nm}$ ，像面上点列图弥散斑的最大半径为  $r_{\text{max}} = 20 \mu\text{m}$ 。则紫外波段的光谱分辨力为

$$\delta\lambda_u = \frac{\Delta\lambda_u}{l}(a'_1 + 2r_{\text{max}}) = 0.74 \text{ nm}, \quad (3)$$

可见光波段的光谱分辨力为

$$\delta\lambda_v = \frac{\Delta\lambda_v}{l}(a'_1 + 2r_{\text{max}}) = 1.48 \text{ nm}, \quad (4)$$

因此,紫外/可见光波段的光谱分辨力均满足测量要求。

#### 4.2 系统集成及性能检测

根据光学设计结果,完成了机械支撑结构设计,编

制了数据采集和处理软件,包括对滤光片轮的驱动和控制,光谱数据的采集和处理等单元。集成的临边成像光谱仪原型样机如图 8 所示,体积为  $500 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ,质量为 15 kg。

利用美军标 MIL-STD-150A 目标模拟板和平



图 8 临边成像光谱仪原型样机

Fig. 8 Prototype of limb imaging spectrometer

行光管对临边成像光谱仪的空间分辨力进行了检测,图 9 和图 10 分别为获得的目标模拟板的图像和目标模拟板图像的强度轮廓。由图 10 可知,可分辨的最大空间频率为 14.3 lp/mm(对应  $k=3, m=6$ ),平行光管的焦距  $f_c = 159.6$  mm,临边成像光谱仪的空间分辨力为

$$N_s = \frac{N_c f_c}{f'_s} = 19 \text{ lp/mm}, \quad (5)$$

相当与 0.44 mrad,满足 0.5 mrad 的设计要求。



图 9 目标模拟板图像  
Fig. 9 Image of test target

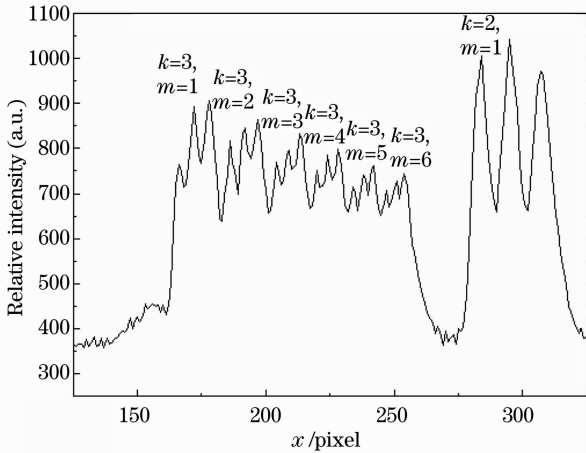


图 10 目标模拟板图像强度轮廓  
Fig. 10 Intensity profile of test target

He-Ne 激光器的波长为 632.8 nm,自身的线宽很窄,为 0.001 nm。He-Ne 激光束先经过扩束器扩束,再经过衰减比为 0.01% 的滤光片衰减后入射临边成像光谱仪原型样机,测得 He-Ne 激光的光谱如图 11 所示,半峰全宽(FWHM)为 1.52,满足小于等于 1.6 nm 的测量要求。

表 2 为要求的技术指标与仪器设计达到的技术指标的比对表,从表 2 可以看出各项指标均满足要求。

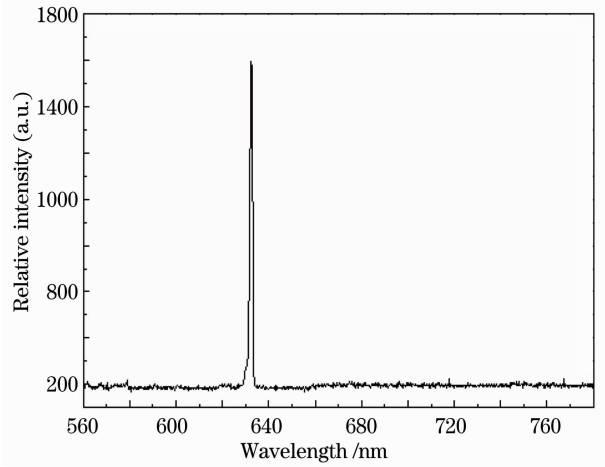


图 11 中心波长和边缘波长的点列图  
Fig. 11 Spot diagram for central wavelength and edge wavelength

表 2 临边成像光谱仪要求的与达到的技术指标比对  
Table 2 Comparison of specifications required with specifications achieved for limb imaging spectrometer

Specifications	Required	Achieved
Spectral range /nm	560~780	560~780
Spectral resolution/nm	280~390	280~390
Spectral resolution/nm	$\leq 1.6$	1.52
Spectral resolution/nm	$\leq 0.8$	0.76
Spatial resolution /mrad	$\leq 0.5$	0.44
Field of view /( $^{\circ}$ )	$2.4 \times 0.024$	$2.4 \times 0.024$
Focal length of system /mm	120	120
Pixel size / $\mu\text{m}$	$13 \times 13$	$13 \times 13$
Frame frequency /(frame/s)	$\geq 1$	1.5

## 5 外场实验及结果分析

2011年10月,在中国科学院青藏高原研究所纳木错综合观测站(北纬  $30^{\circ}46.44'$ ,东经  $90^{\circ}59.31'$ ,海拔 4800 m),进行了外场准临边观测实验,测试了临边成像光谱仪原型样机的功能及性能。该观测站位于当雄县纳木错乡纳木错湖东南岸,背靠念青唐古拉山脉雪峰,下垫面为高寒草甸;站内建有大气边界层观测:设立 52 m 边界层气象塔(含辐射和土壤观测系统)、大气湍流仪等,观测近地层、边界层、对流层及整个大气层的各项气象、气候指标。同时具备大气本底观测如通过对大气气溶胶光学厚度(太阳光度计观测)、大气降水化学特征、大气气溶

胶、大气中汞和大气中持久性有机污染物(POPs)、碳黑、铍元素等信息的监测和样品采集。图 12 为外场观测得到的紫外和可见波段的光谱图像。

利用太阳光度计观测的气溶胶结果,地面气象站气象数据、卫星 O<sub>3</sub> 资料、结合辐射传输模式模拟的三个时次的纳木错地面光谱数据,图 13 为模拟数据与临边成像光谱仪观测数据的比较。从图 13 可以看出,在可见波段,光谱数据的差别小于 5%,在 320~390 nm 波段,由于地面紫外波段受大气气溶胶不确定性的影响,差别在 13%左右,在更短的波长小于 320 nm 紫外波段,由于地面辐射值很低,差别较大。总之,观测数据与模拟数据具有很好的一致性,表明临边成像光谱仪原型样机性能和功能良好,可以满足大气痕量气体探测的需求。

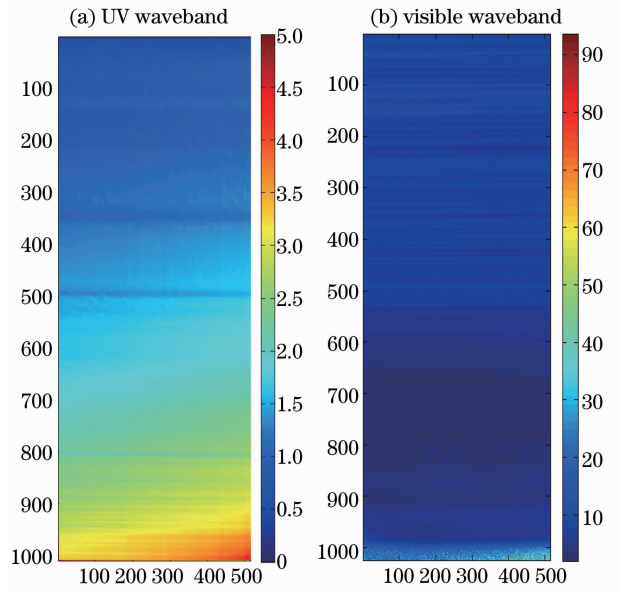


图 12 紫外/可见光谱图像

Fig. 12 Spectral image in UV/visible waveband

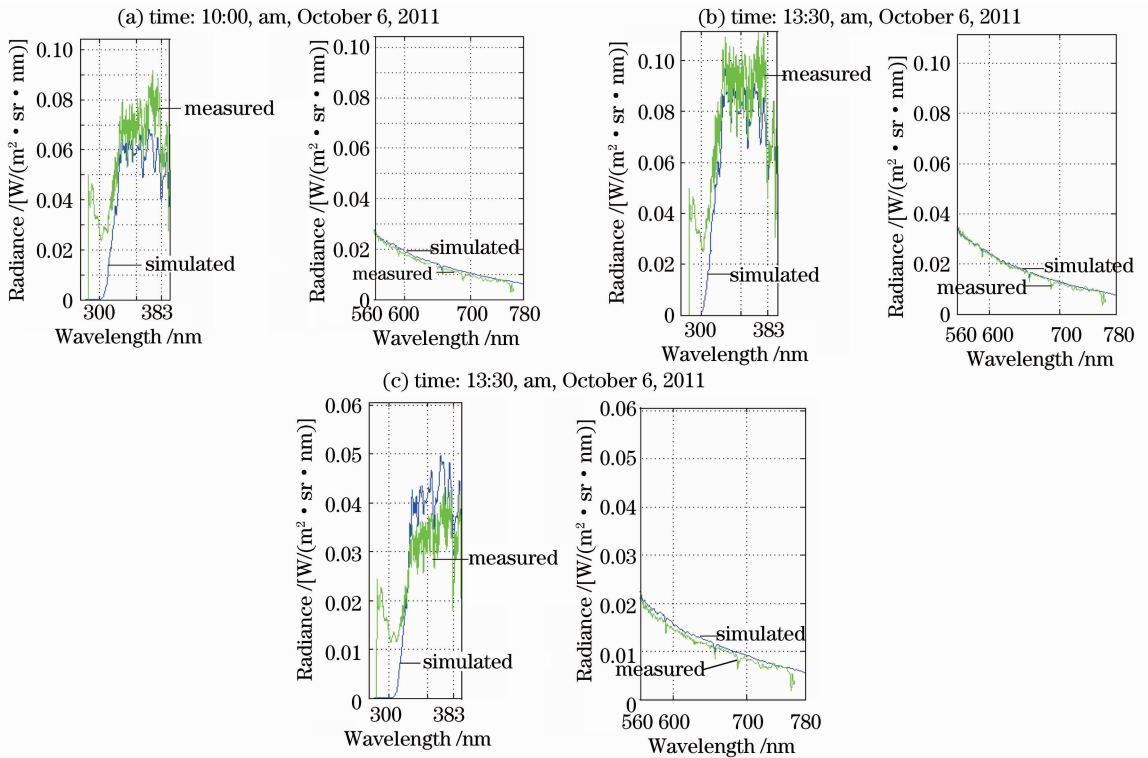


图 13 纳木错地面光谱与模拟比较

Fig. 13 Comparison of measured spectral with simulated spectral at Namucuo

## 6 结 论

分析了大气痕量气体临边成像光谱探测原理,根据应用要求,采用离轴抛物面望远镜与改进型 Czerny-Turner 光谱仪组合的结构型式,设计并研制了紫外/可见大气痕量气体临边成像光谱仪原型

样机,工作波段在 560~780 nm 和 280~390 nm,分别利用光栅的一级和二级衍射,体积为 500 mm×350 mm×200 mm,质量为 15kg。对原型样机性能进行了检测,各项指标均满足测量要求。利用临边成像光谱仪原型样机进行了外场观测实验,外场观

测光谱数据与模拟数据具有很好的一致性,表明原型样机功能和性能良好,满足大气痕量气体探测的应用要求。

### 参 考 文 献

- 1 Sun Liqun, Chen Kexin, Yang Huaidong *et al.*. On-line monitoring technique for trace gases in atmosphere based on differential optical absorption spectroscopy [J]. *J. Applied Optics*, 2012, **33**(1): 115~119  
孙利群, 陈克新, 杨怀栋等. 基于差分吸收光谱法的大气痕量气体在线检测技术[J]. *应用光学*, 2012, **33**(1): 115~119
- 2 Xue Qingsheng. Optical design of spaceborne broadband limb sounder for detecting atmospheric trace gas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **41**(6): 631~637  
薛庆生. 星载宽波段大气痕量气体临边探测仪光学设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(6): 631~637
- 3 M. Duan, Q. Min, S. Knut. Impact of vertical stratification of inherent optical properties on radiative transfer in a plane-parallel turbid medium [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5629~5638
- 4 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 082201  
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 082201
- 5 Zhang Junqiang, Yan Changxiang, Lin Chao. Thermal effect on spectral-line shift of spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0528001  
张军强, 颜昌翔, 蔺超. 温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0528001
- 6 Xiong Shengjun, Zhang Ying, Zhao Huijie *et al.*. Aspheric optical design of an imaging spectrometer based acousto-optic tunable filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0622002  
熊胜军, 张颖, 赵慧洁等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪非球面光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0622002
- 7 M. G. Dittman, J. Leitch, M. Chrisp *et al.*. Limb broad-band imaging spectrometer for the NPOESS ozone mapping and profiler suite (OMPS) [C]. *SPIE*, 2002, **4814**: 120~130
- 8 C. Wang, R. Shi, C. Zhou *et al.*. Comparison of SCIAMACHY and AIRS CO<sub>2</sub> measurements over China from 2003 to 2005 [C]. *SPIE*, 2011, **8156**: 81560N
- 9 Kou Jieting, Bayanheshig, Tang Yuguo *et al.*. Optical system design of plane grating double monochromator [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(3): 830~833  
寇婕婷, 巴音贺希格, 唐玉国等. 平面光栅双单色仪的光学系统设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(3): 830~833
- 10 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

栏目编辑: 韩峰