

doi: 10.3788/gzxb20134203.0271

空间遥感大气痕量气体临边探测仪设计与研究

薛庆生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为满足空间大气痕量气体探测的迫切需求,设计并研制了一个空间遥感大气痕量气体临边探测仪原型样机.该样机光学系统由离轴抛物面望远镜和改进型 Czerny-Turner 光谱仪组成,工作波段为 380~570 nm.在工作波段内,点列图半径的均方根值均小于 $9\ \mu\text{m}$,校正了像散,整个工作波段内同时获得了良好的成像质量.原型样机质量 12 kg,体积 $420\times 350\times 200\ \text{mm}^3$,空间像元分辨力 0.6 km,光谱分辨力 0.86 nm,各项指标均满足要求.利用临边探测仪原型样机进行了外场观测试验,外场观测光谱数据与模拟光谱数据进行了对比,二者具有很好的一致性,表明大气痕量气体临边探测仪功能和性能良好,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;临边探测;光谱分辨力;空间分辨力

中图分类号:O433.1; TN744.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2013)03-0271-7

Design and Study of Limb Sounder of Atmospheric Trace Gas for Spaceborne Remote Sensing

XUE Qing-sheng

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

Abstract: In order to meet the urgent requirements of detecting atmospheric trace gas in space, a limb sounder prototype of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing is designed and developed. The optical system of the prototype is composed of an off-axis parabolic telescope and a modified Czerny-Turner spectrometer, and the working wavelength band from 380 nm to 570 nm. The root-mean-square spot radius is less than $9\ \mu\text{m}$ over. The astigmatism is corrected, and the good image quality is obtained over the working wavelength band. The mass of the prototype is 12 kg, the volume is $420\times 350\times 200\ \text{mm}^3$, the spatial pixel resolution is 0.5 km, and the spectral resolution is 1 nm, and all the requirements are satisfied. The field sounding experiment is implemented using the limb sounding prototype. The spectral data measured is compared with spectral data simulated, and consistent with spectral data, which indicates that the limb sounder prototype has good function and performance, and satisfies the application requirements of sounding of atmospheric trace gas.

Key words: Optical design; Imaging spectrometer; Limb sounding; Spectral resolution; Spatial resolution

0 引言

大气痕量气体探测是监测大气环境和进行气候研究的重要手段^[1-2].空间遥感大气痕量气体探测比地基大气痕量气体探测具有更高的时空覆盖性,更容易获得大气痕量气体的时空分布特征和变化趋

势.空间遥感大气痕量气体探测仪根据探测方式的不同分为天底探测仪、掩日/月探测仪和临边探测仪^[3].天底探测仪的空间覆盖范围大,但垂直分辨率低;掩日/月探测仪的垂直分辨率高,但空间覆盖范围小.临边探测仪集空间覆盖范围大和垂直分辨率高的特点于一身,与天底探测仪和掩日/月探测仪相

基金项目:国家自然科学基金(No. 41105014)、中科院碳专项子课题(No. XDA05040103)和中科院空间一部主任基金资助

第一作者:薛庆生(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学设计和航空航天遥感成像光谱技术及光谱辐射定标. Email: qshxue2006@163.com

收稿日期:2012-09-22; **录用日期:**2012-12-03

比,具有明显优势,因此受到科学家的极大关注,已成为国际上空间遥感大气痕量气体探测领域研究的热点和前沿^[4-5].

欧美等发达国家均十分重视空间遥感大气痕量气体临边探测仪的研究,投入了大量的人力和物力,取得了一定的研究成果.大气痕量气体探测仪普遍采用的是成像光谱仪,可以同时获取整个工作波段内的光谱图像信息.具有代表性的有美国研制的OMPS/LP^[6]临边探测仪、欧空局研制的SCIAMACHY^[7]和瑞典研制的OSIRIS^[8]临边探测仪.OMPS/LP光学系统采用色散棱镜作为色散元件,光谱分辨率不高,主要用于大气O₃的探测.SCIAMACHY采用平面光栅作为色散元件,分成8个通道进行探测,光谱分辨率较高,可对大气O₃、NO₂和SO₂等痕量气体进行探测.OSIRIS光学系统采用非球面光栅作为色散元件,光谱分辨率高,色散均匀,主要对大气中的臭氧、NO₂和气溶胶进行探测.在国内,空间遥感大气痕量气体的临边探测仪的研究处于刚刚起步阶段.

本文在分析大气痕量气体临边探测原理的基础上,根据空间遥感大气痕量气体临边探测的应用要求,设计并研制出临边探测仪原型样机,利用临边探测仪原型样机进行了外场观测试验,试验结果与模拟结果具有很好的一致性,表明原型样机具有良好的功能和性能,满足应用大气痕量气体探测的应用要求,为下一步在空间遥感中应用奠定了技术基础.

1 大气痕量气体临边探测原理

大气痕量气体临边探测仪对沿地球临边切线方向的大气进行探测,在原理上是利用大气痕量气体对探测路径上的太阳光谱辐射强烈吸收和散射的特点.图1为大气痕量气体临边探测原理图.从图中可以看出:临边探测仪的视线对准地球临边某高度切

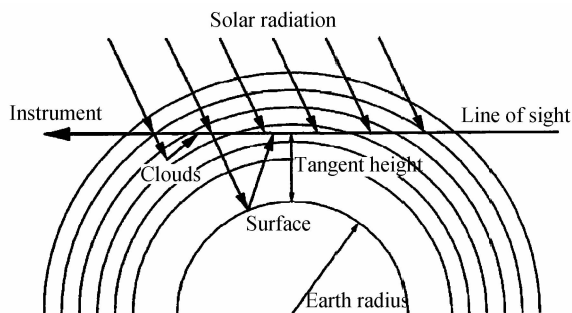


图1 大气痕量气体临边探测原理
Fig. 1 Schematic diagram of sounding atmospheric trace gas in limb view

线方向上的大气;它测量的临边光谱辐射是临边探测路径上单次和多次散射的太阳光谱辐射.临边散射光谱辐射亮度随临边高度的变化反应了大气痕量气体的垂直分布信息.由于临边探测仪对地球临边大气进行切片式探测,因此可以获得很高的垂直分辨率.

2 应用要求及主要技术指标

临边探测仪主要对大气中的O₃和NO₂等大气痕量气体进行成像光谱探测,工作波段为380~570 nm,光谱分辨率1 nm.要求地球临边垂直方向探测的高度范围为0~90 km,临边垂直方向的空间像元分辨力GSD为0.6 km.探测器采用Princeton公司生产的PIXIS1024/BUV相机,图2为相机的实物照片.该相机的芯片为英国E2V公司生产的背照式e₂vCCD 47-10,具有暗电流低、量子效率高的特点,CCD像元尺寸13×13 μm²,像元数1 024×1 024,2×2合并使用,合并后等效的像元尺寸为26×26 μm²,等效像元数为512×512.



图2 PIXIS1024/BUV相机照片

Fig. 2 Photograph of PIXIS 1024/BUV camera

临边探测仪预计将工作在轨道高度 $H=400$ km的卫星平台上,仪器到临边观测点的距离 L 为

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

式中, $R=6\,378$ km,为地球轨道半径.

根据临边垂直方向的空间像元分辨力和探测器的像元尺寸确定临边探测仪光学系统的焦距为

$$f'_s = \frac{L \cdot a}{\text{GSD}} = 99.4 \quad (2)$$

这里,留出余量,取 $f'_s=120$ mm.根据轨道高度和地球临边垂直方向的空间覆盖范围确定临边垂直方向的视场为 2.4° .狭缝宽度 a_1 取 26 μm,则临边水平方向的视场为 0.012° .望远镜的焦距取 $1:1$,则望远镜的焦距 $f'_t=120$ mm.根据以上要求确定临边探测仪的主要技术指标如表1.

表 1 临边探测仪主要技术指标
Table 1 Specifications of limb sounder

Specification	Value
Spectral range/nm	380~570
Spectral resolution/nm	≤ 1
Target spatial coverage/km	0~90
Spatial pixel resolution/km	≤ 0.6
Vertical field of view/(°)	2.4
Horizontal field of view/(°)	0.012
Entrance pupil diameter of telescope/mm	20
Focal length of telescope/mm	120
Focal length of system/mm	120
Slit dimensions	5 mm \times 26 μ m
Equivalent detector pixel size	26 μ m \times 26 μ m

3 临边探测仪研制

3.1 光学系统设计

临边探测仪光学系统由望远镜和光谱仪两部分组成,地球临边场景经望远镜成像在入射狭缝上,入射狭缝经光谱仪色散后成像 CCD 探测器上.光学系统的结构决定仪器的性能、体积和重量等.在满足性能要求的前提下,要使光学系统的结构可能简单.望远镜采用单块离轴抛物面结构,减小了球差,避免了色差的影响.望远镜的光学结构如图 3.

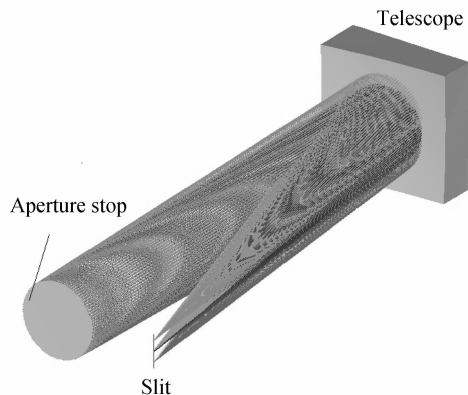


图 3 临边探测仪望远镜光学结构

Fig. 3 Optical construction for telescope of limb sounder

光栅光谱仪与棱镜光谱仪相比,具有光谱分辨力高、色散均匀的特点,因此临边探测仪的光谱仪采用光栅色散.平面光栅与凹面光栅和凸面光栅相比,具有工艺成熟度好、通用性好等特点,因此,平面光栅光谱仪应用最为广泛.传统的平面光栅光谱仪(如单色仪和光谱辐射计等)采用单元探测器(光电二极管和光电倍增管),在空间方向不要求空间分辨率,在光谱方向,一次只能探测一个波长,依赖凸轮或正弦机构转动光栅扫描来实现不同波长的探测.传统的平面光栅光谱仪对像差校正要求不高,普遍采用传统的 Czerny-Turner 结构^[9],其采用两个球面镜分别作为准直镜和聚焦镜,与采用单个大球面镜的 Ebert-Fastie 结构相比,提高了校正彗差的能力,但

在狭缝高度方向上存在很大的像散.而临边探测仪要求在狭缝高度方向上(临边垂直方向)具有良好的空间分辨力,因此传统的 Czerny-Turner 光谱仪不能满足临边探测仪的要求.本文经过研究把传统的 Czerny-Turner 光谱仪进行了改进^[10].为了校正像散,把传统 Czerny-Turner 光谱仪中的球面聚焦镜用一个超环面聚焦镜来代替,利用超环面聚焦镜子午和弧矢方向半径的不同达到校正像散的目的.为了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,优化设计了光栅到聚焦镜的距离,光栅到聚焦镜的距离 L_{gf} 满足

$$L_{gf} = R_T \cos \alpha_2 \quad (3)$$

式中, R_T 为聚焦镜子午方向(色散方向)的曲率半径, α_2 为聚焦镜的离轴角.在平面光栅和聚焦镜之间插入一个平面折转镜折叠光路使光谱仪的十分紧凑.

图 4 为改进型 Czerny-Turner 光谱仪的光学结构图.图 5 为改进型 Czerny-Turner 光谱仪狭缝上

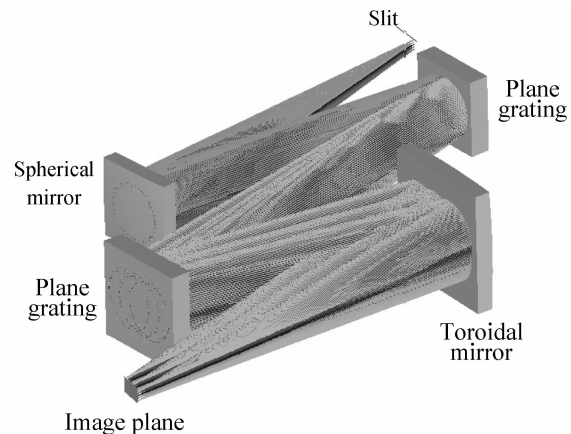


图 4 改进型 Czerny-Turner 光谱仪光学结构

Fig. 4 Optical construction for modified Czerny-Turner spectrometer

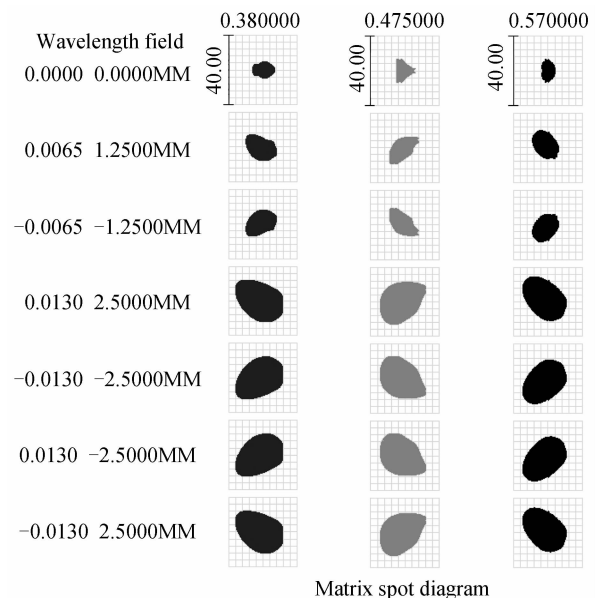


图 5 改进型 Czerny-Turner 光谱仪的点列图分布

Fig. 5 Spot diagram of modified Czerny-Turner spectrometer

不同高度的点在光谱仪像面上的点列图分布,从点斑的形状可以看出,像散得到良好的校正。

为了作为比较,图 6 给出了采用球面聚焦镜的传统 Czerny-Turner 光谱仪像面上的点列图分布,从图 6 可以看出,点列图呈长条形,在狭缝高度方向上(空间维)点斑扩展到了 1 mm,严重影响狭缝高度方向上的空间分辨力。

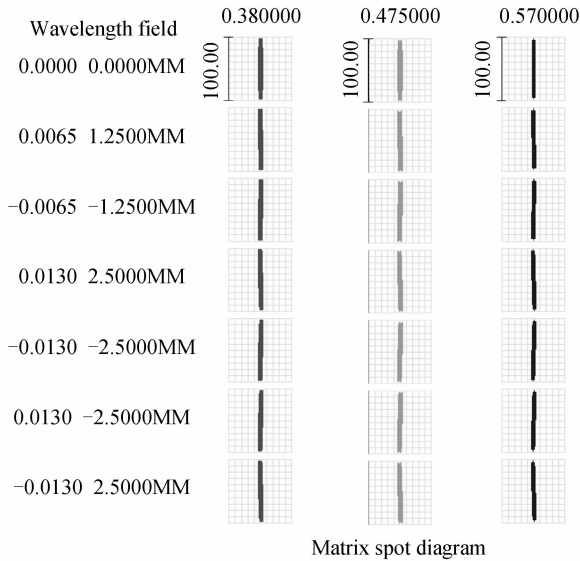


图 6 传统 Czerny-Turner 光谱仪的点列图分布
Fig. 6 Spot diagram of classical Czerny-Turner spectrometer

图 7 为改进型 Czerny-Turner 光谱仪点列图半径的均方根(Root-Mean-Square, RMS)值随波长的变化关系曲线.从图中可以看出,点列图半径的 RMS 值随波长变化很小,且均小于 9 μm,在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量,实现了宽波段内像差同时校正。

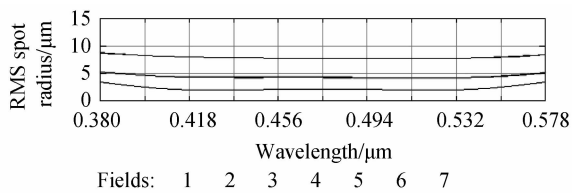


图 7 改进型 Czerny-Turner 光谱仪点列图半径的 RMS 值随波长的变化关系曲线
Fig. 7 RMS spot radius VS wavelength for modified Czerny-Turner spectrometer

临边探测仪的光谱分辨力由光谱仪决定,与光谱仪的狭缝宽度 a_1 、光谱仪的线色散长度 L 、探测器的等效像元尺寸 a 及光谱仪的像差弥散半径 r 有关.改进型 Czerny-Turner 光谱仪的狭缝宽度 $a_1 = 26 \mu\text{m}$,探测器的等效像元尺寸 $a = 26 \mu\text{m}$,像差弥散斑的半径最大半径 $r_{\text{max}} = 15 \mu\text{m}$,光谱仪的线色散长度 $L = 13.3 \text{ mm}$,光谱仪的放大倍率为 $1:1$,光谱仪的狭缝像的宽度为 $a'_1 = 26 \mu\text{m}$.探测器的等效像元尺寸 a 决定的光谱带宽 $\delta\lambda_p$ (单位: nm) 为

$$\delta\lambda_p = \left(\frac{\Delta\lambda}{L}\right) \cdot a = 0.371 \quad (4)$$

式中, $\Delta\lambda = 190 \text{ nm}$, 为工作波段宽度. 考虑到像差的影响,实际的狭缝像宽度 a'_e (单位: μm) 为

$$a'_e = a'_1 + 2r_{\text{max}} = 56 \quad (5)$$

实际的狭缝像宽度 a'_e 大于探测器的等效像元尺寸 a , 因此,探测仪的实际光谱分辨力由实际狭缝像的宽度决定(单位: nm)

$$\delta\lambda = \left(\frac{\Delta\lambda}{L}\right) \cdot (a'_1 + 2r_{\text{max}}) = 0.8 \quad (6)$$

满足光谱分辨力 1 nm 的指标要求。

将离轴抛物面望远镜与改进型 Czerny-Turner 光谱仪连接组成临边探测仪全系统,临边探测仪全系统的光学结构如图 8. 临边探测仪的空间分辨力由临边探测仪全系统的性能决定. 图 9 为临边探测仪全系统不同波长的光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线,不同波长的 MTF 在特征频率 20 lp/mm 处均大于 0.7 ,在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量。

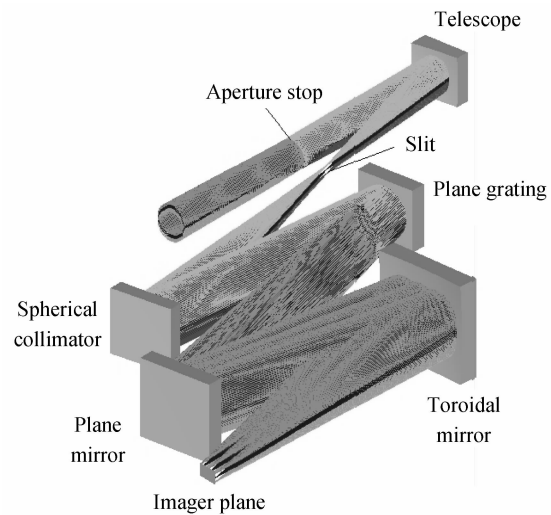
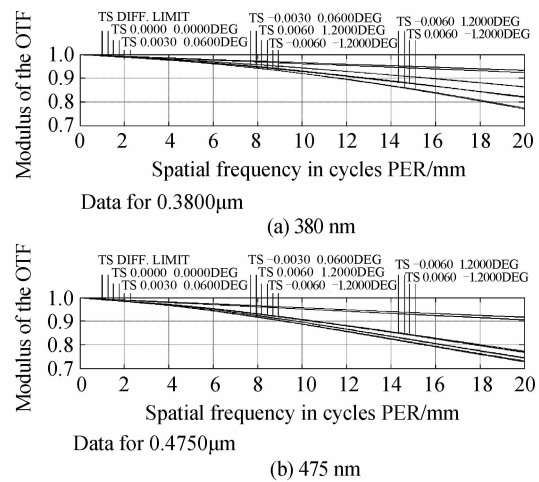


图 8 临边探测仪全系统光学结构
Fig. 8 Layout of optical system of limb sounder



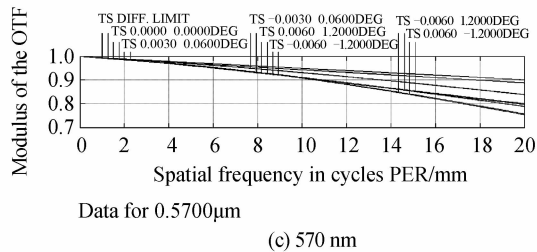


图9 临边探测仪全系统光学传递函数曲线
Fig.9 MTF of optical system of limb sounder

3.2 系统集成及性能检测

光学元件在中科院长春光机所光机工厂加工完成,其中加工难度较大的为超环面聚焦镜,其子午和弧矢方向的曲率半径分别为 $R = 427.06 \text{ mm}$ 、 $\rho = 407.4 \text{ mm}$.超环面镜的加工经过粗磨、细磨、抛光过程.加工时先用数控车床车出磨具并铣成两半,一半做粗细磨用,另一半做成抛光用胶盘.超环面的检验主要在细磨阶段和抛光阶段进行,细磨阶段用千分表测出矢高从而计算出半径.抛光阶段采用光学零位检验,检验光路如图10,利用“无像差点”,主要考

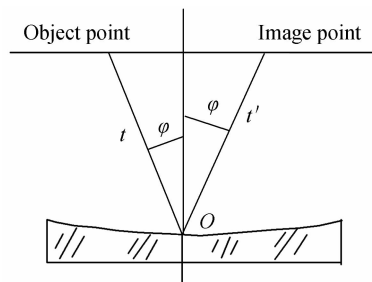


图10 超环面镜检测光路

Fig.10 Optical path for testing toroidal mirror

虑像散.物点为点光源发出,本身不存在像散,希望像方也没有像散,根据杨氏公式可得

$$t = t' = \sqrt{R\rho} \quad (7)$$

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{\rho}{R}} \quad (8)$$

根据式(7)和(8)求出, $t = t' = 417.114$, $\varphi = 17.453^\circ$,在像面用刀口检验,看到很好的阴影图,表明超环面镜加工质量良好.

根据临边探测仪光学系统的设计结果,设计了临边探测仪的机械支撑结构,编制了数据采集和处理软件.对临边探测仪进行了整机集成和性能检测.集成的临边探测仪整机的实物照片如图11,重量 12 kg ,体积 $420 \times 350 \times 200 \text{ mm}^3$.利用低压汞灯作为光源,置于平行光管的焦面上,平行光管发出的平行光入射到临边探测仪上,在临边探测仪的焦平面上得到低压汞灯的特征光谱线如图12,从左到右依次为 546.0753 nm , 435.8337 nm 和 404.6572 nm ,实测临边探测仪的光谱分辨力为 0.86 nm ,接近设计值 0.8 nm ,满足光谱分辨力 1 nm 的指标要求.

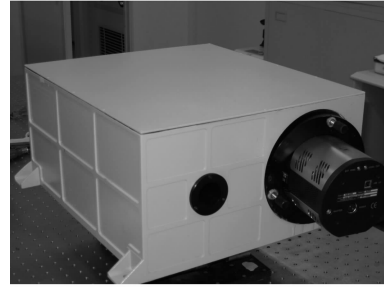


图11 临边探测仪实物照片
Fig.11 Photograph of limb sounder

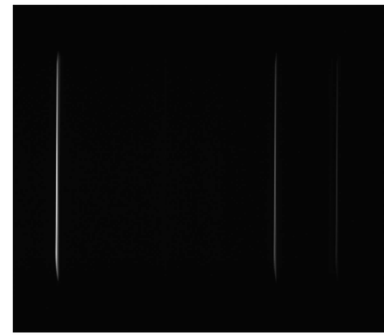


图12 低压汞灯的光谱像

Fig.12 Spectral image of low-voltage mercury lamp

把目标模拟板置于平行光管的焦面上以模拟无穷远目标,以积分球的氙灯为光源照明目标模拟板,在临边探测仪的焦面上得到目标模拟板的图像如图13.图像的底部表明,临边探测仪可分辨的最大空间

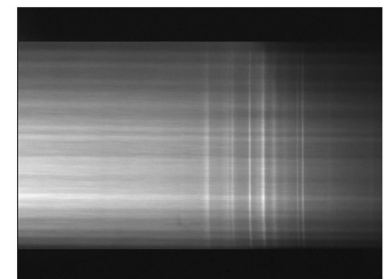


图13 目标模拟板图像

Fig.13 Image of resolving power test target

频率为 38 lp/mm ,平行光管的焦距 $f_c = 240 \text{ mm}$,临边探测仪可分辨的最大空间频率(单位: lp/mm)为

$$N_s = \frac{N_c f_c}{f_s} = 19 \quad (9)$$

对应的空间像元分辨力为 0.5 km ,优于空间像元分辨力 0.6 km 的指标要求.根据调制对比度测量法实测临边成像光谱仪整机的实验室静态调制传递函数为(单位: lp/mm)

$$\text{MTF}(f) = (\pi/4) \text{CTF}(f) = 0.28@19 \quad (10)$$

式中, $\text{CTF}(f)$ 为对比传递函数.

理论上整机静态传函为(单位: lp/mm)

$$\text{MTF}_{\text{theory}}(f) = \text{MTF}_{\text{design}}(f) \times \text{MTF}_{\text{fabrication}}(f) \times \text{MTF}_{\text{detector}}(f) = 0.28@19 \quad (11)$$

式中, $\text{MTF}_{\text{design}}(f) = 0.72$ 、 $\text{MTF}_{\text{fabrication}}(f) = 0.8$,

$MTF_{\text{detector}}(f) = 0.5$, 分别为光学设计传函、加工和装调引起的传函、探测器的传函, 式(10)和式(11)表明, 整机静态传函的理论 with 实测结果一致。

表 2 为应用要求的技术指标与仪器实际达到的技术指标的对比表, 从表 2 可以看出, 各项指标均满足要求。

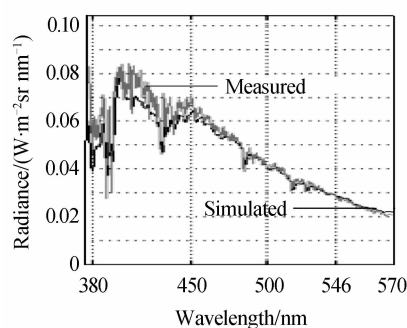
表 2 临边探测仪要求的与达到的技术指标对比

Table 2 Comparison of specifications required with specifications achieved for limb sounder

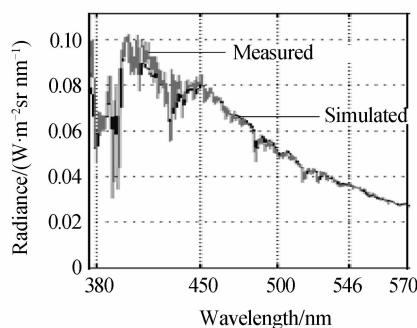
Specification	Required	Achieved
Spectral range/nm	380~570	380~570
Spectral resolution/nm	≤ 1	0.86
Target spatial coverage/km	0~90	0~96
Spatial pixel resolution/km	≤ 0.6	0.5
Vertical field of view/(°)	2.4	2.4
Horizontal field of view/(°)	0.012	0.012
Entrance pupil diameter of telescope/mm	20	20
Focal length of telescope/mm	120	120
Focal length of system/mm	120	120
Slit dimensions	5 mm \times 26 μ m	5 mm \times 26 μ m
Equivalent detector pixel size	26 μ m \times 26 μ m	26 μ m \times 26 μ m

4 外场试验及结果分析

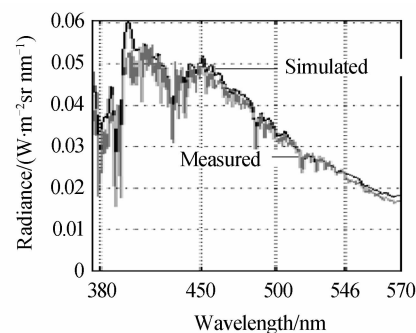
2011 年 10 月, 在中国科学院青藏高原研究所纳木错综合观测站(北纬 30°46.44', 东经 90°59.31', 海拔 4 800 m), 进行了外场准临边观测试验, 对临



(a) Time: 10:00, am; October 6, 2011



(b) Time: 13:30, am; October 6, 2011



(c) Time: 13:30, am; October 6, 2011

图 15 纳木错地面光谱与模拟比较

Fig. 15 Comparison of measured spectral with simulated spectral at Namucuo

边探测仪观测数据的比较. 从图中可以看出, 在工作波段内, 光谱数据的差别小于 5%, 观测数据与模拟数据具有很好的一致性, 表明临边探测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。

5 结论

空间遥感大气痕量气体临边探测仪已成为空间大气痕量气体探测领域的迫切需求, 分析了大气痕量气体临边探测原理, 根据大气痕量气体探测的应

用要求, 设计并研制了空间遥感大气痕量气体临边探测仪原型样机. 样机光学系统采用离轴抛物面望远镜与改进型 Czerny-Turner 光谱仪组合, 工作波段 380~570 nm, 体积 420 \times 350 \times 200 mm³, 质量 12 kg. 原型样机的性能检测结果满足指标要求. 利用临边探测仪原型样机进行了外场观测试验, 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. 临边探测仪原型样机的研制成功, 为最终实现临边探测技术在空间大气痕量气体探测领域

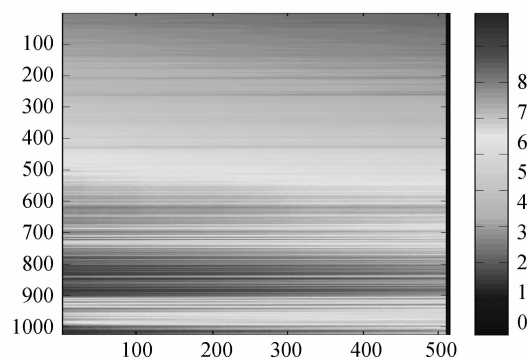


图 14 临边探测仪光谱图像

Fig. 14 Spectral imager of limb sounder

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 O₃ 资料、结合辐射传输模式模拟了三个时次的纳木错地面光谱数据, 图 15 为模拟数

据与临边探测仪观测数据的比较. 从图中可以看出, 在工作波段内, 光谱数据的差别小于 5%, 观测数据与模拟数据具有很好的一致性, 表明临边探测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。

的应用奠定了技术基础.

参考文献

- [1] ZHANG Xin-ying, ZHANG Peng, FANG Zong-yi, *et al.* Method of retrieving refractive index of aerosol particles[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, **33**(7): 3-13.
张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术检测大气痕量气体的研究进展[J]. *气象*, 2007, **33**(7): 3-13.
- [2] ZHU Yan-wu, LIU Wen-qing, XIE Pin-hua, *et al.* Monitoring and analysis of atmospheric pollutants in traffic ban period of Beijing with DOAS[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2040-2045.
朱燕舞, 刘文清, 谢品华, 等. 北京限行期间大气污染物的差分吸收光谱监测与分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 2040-2045.
- [3] WANG Zi-jun, CHEN Sheng-bo, YANG Chun-yan, *et al.* DOAS tomography for the retrieval of trace gas profiles from satellite-based UV-Vis limb spectra [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **9**(2): 020101-1-020101-4.
- [4] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne broadband limb ssounder for detecting atmospheric trace gas[J]. *Acta Photonica 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.
- [5] RAULT D. Stratospheric and upper tropospheric aerosol retrieval from limb scatter signals[C]. *SPIE*, 2007, **6745**: 674509-1-674509-12.
- [6] RAULT D F, LUMPE J, EDEN T, *et al.* The OMPS limb profiler instrument an alternative data analysis and retrieval algorithm[C]. *SPIE*, 2009, **7474**: 74741R-1-74741R-12.
- [7] WANG Chao, SHI Run-he, Zhou Cong, *et al.* Comparison of SCIAMACHY and AIRS CO₂ measurement over China from 2003 to 2005[C]. *SPIE*, 2011, **8156**: 81560N-1-81560N-9.
- [8] LIEWELLYN E J, LLOYD N D, DEGENSTEIN D A, *et al.* The OSIRIS instrument on the Odin spacecraft[J]. *Canada Journal of Physics*, 2004, **82**: 411-422.
- [9] KOU Jie-ting, Bayanheshig, TANG Yu-guo, *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 Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(1): 11-16.