

临边成像光谱仪的发展现状与进展

张晶^{1,2}, 王淑荣^{1*}, 黄煜¹, 薛庆生¹, 李博¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:介绍了临边观测模式的探测原理及其特点,给出了美国、欧洲等发达国家关于临边成像光谱仪的研究状况,并列出了各临边成像光谱仪的核心设计方案及具体的技术指标。最后,介绍了国内唯一一例临边成像光谱仪的开展情况,包括设计方案到技术指标。通过对比分析国内外临边成像光谱仪的研究进展,为我国进一步提高临边成像光谱仪的性能及技术指标提供了理论基础。

关键词:临边成像光谱仪;临边观测;大气遥感探测

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130605.0692

Status and development of limb imaging spectrometers

ZHANG Jing^{1,2}, WANG Shu-rong^{1*}, HUANG Yu¹, XUE Qing-sheng¹, LI Bo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: sr-wang@ciomp.ac.cn

Abstract: The methods and characteristics of limb viewing are introduced, and the research progress of limb imaging spectrometers is described. Then, the technical indexes of limb imaging spectrometers in the developed countries in America and Europe are compared and analyzed. Finally, the development situation of our country about the limb imaging spectrometers is introduced. Through comparative analysis of the research progress of limb imaging spectrometers at home and abroad, it provides the theoretical background basis for our country to further improve the performance and technical index of limb imaging spectrometers.

Key words: limb imaging spectrometer; limb viewing; atmospheric remote sensing detection

1 引言

大气污染是全球环境变化的焦点。目前,传统大气污染监测技术已经难以满足科学研究和国家决策的要求^[1]。随着卫星技术的高速发展和应用,空间大气遥感探测可以获得高频次、大尺度、长时间污染物时空分布特征和变化趋势,进而研究出大气化学变化对全球气候和生物地球化学循环的影响,因此得到了广泛的应用。成像光谱仪是一种在多光谱遥感成像技术基础上发展起来的新型空间大气光学遥感仪器,其能够以高光谱分辨率获取目标的超多谱段,是遥感技术的进步和发展。临边观测模式是空间大气遥感的新型观测模式,因其不仅满足天底观测方式所具备的高空间覆盖范围特点,还能够实现掩日/月观测方式所达到的高垂直分辨率,故受到空间大气遥感领域研究人员的特别关注。临边成像光谱仪是指通过临边观测方式对空间大气进行遥感探测的成像光谱仪。临边成像光谱仪的研制已成为全球各国大气遥感探测研究的一个重要方向,欧美等航天发达国家均已投入大量的人力和物力积极开展有关临边成像光谱仪的研制工作^[2]。

2 临边观测模式的介绍

临边观测方式是空间大气遥感的一种新型观测方式。太阳光经大气分子、气溶胶、云和地球表面的混合散射作用而在地球外围形成了一个约100 km厚的临边大气层。临边观测的空间大气遥感仪器探测临边大气层的光谱辐射,通过分析临边大气层的光谱辐射的特点,再根据反演算法计算得出二氧化氮、臭氧、气溶胶和痕量气体的高空垂直分布规律^[3]。

图1为临边观测方式的几何原理图,其本质上是对大气层的切片式探测。首先,临边探测仪器根据要求发射到某一固定的大气高度上,然后在其所在位置沿着切线方向对临边大气层进行观测,由于受视场角的限制,临边探测仪只能探测一

定高度范围的大气层的散射辐射,因此临边观测方式可以达到与掩日/月观测方式相当的高垂直分辨率。对准某一高度的大气后,临边探测仪的视线即确定下来,继而接收视线范围内探测到的单次散射和多次散射的太阳光谱辐射。之所以可以区分二氧化氮、臭氧、气溶胶和痕量气体这些混合在一起的各气体成分在空间范围内的垂直分布规律,是因为大气层中各气体成分由于本身的物理特性可以分为吸收体和散射体,而此物理特性会随着探测高度以及波长变化通过仪器探测到的光谱辐亮度反应得出^[4-5]。临边观测方式不仅满足天底观测方式所具备的高空间覆盖范围特点,还能够实现掩日/月观测方式所达到的高垂直分辨率,从而受到空间大气遥感领域研究人员的广泛关注。

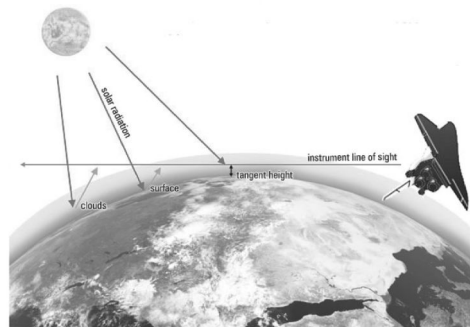


图1 临边观测的几何原理图

Fig. 1 Limb viewing geometry diagram for limb imaging spectrometer

3 国外临边光谱仪的发展

3.1 飞船臭氧临边散射试验和临边臭氧反演试验装置

1997年11月,美国通过Columbia号航天飞机开展了两项地球临边紫外/可见遥感研究:飞船臭氧临边散射试验和临边臭氧反演试验^[6-7]。

飞船臭氧临边散射试验装置(SOLSE)的主要可探测光谱为280~360 nm,此次试验欲验证大气层30~55 km高度的臭氧含量分布规律的反

演方法的可行性,以望获得较高的垂直分辨率,进而得出是否可以取代传统的天底凝视型探测仪的结论。此次试验过程主要针对3个部分进行了研究,分别是 CCD 探测器设备的简化、转动部件的减少以及成本的降低。为了能够有效地提高像面质量,并减小内部杂散光的影响,SOLSE 采用了 Czerny-Turner 型成像光谱仪结构,仪器视场角为 2.3° ,空间分辨率为 0.8 km ,SOLSE 的光学结构如图 2 所示。SOLSE 采用 300 lp/mm 的全息刻线光栅作为色散元件,通过可见/紫外滤光片切换分别实现 $530 \sim 850 \text{ nm}$ 和 $270 \sim 425 \text{ nm}$ 两个光谱的探测,光谱分辨率分别可达到 0.7 和 0.35 nm 。探测器采用背面减薄型面阵 CCD,像元数为 1024×1024 ,像元尺寸为 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ 。

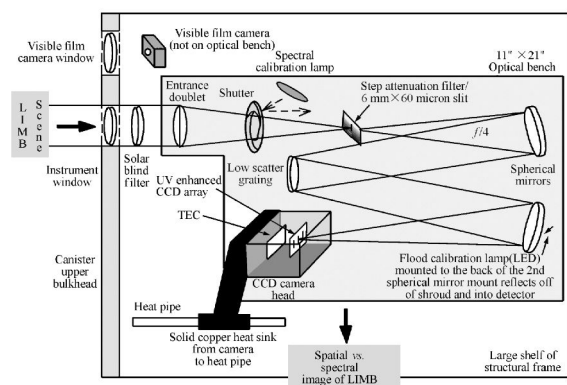


图 2 SOLSE 光路图

Fig. 2 Optic structure diagram of SOLSE

临边臭氧反演试验装置 (LORE) 是一台滤光片型的多波段辐射计,主要针对同温层 1035 km 高度的臭氧、云层以及气溶胶的含量分布进行遥感探测。LORE 主要包括 512 pixel 的线阵光电二极管阵列、5 个干涉滤光片和一台色差校正望远镜。5 个干涉滤光片的中心波长分别为 322 、 350 、 602 、 675 和 1000 nm ,光谱带宽为 4 nm ,具有很小的带外响应,凝视视场为 5×0.8 ,表 1 给出了这 5 个通道的主要探测目标和对应的分辨率。LORE 被安装于一个圆筒中,分别为圆锥形挡板、石英窗口、消色差望远镜、滤光片系统、锥形挡板和光电二极管探测器。

表 1 LORE 各通道目的及分辨率

Tab. 1 Purpose and resolution of each band of LORE

Band/nm	Purpose	Resolution	
		Spectral/nm	Vertical/nm
322	Ozone at upper stratosphere	4.2	0.5
350	Orientation/bottom stratosphere	4.5	0.5
602	Ozone at bottom stratosphere	3.6	0.75
675	Reference at bottom stratosphere	3.7	0.75
1 000	Clouds/aerosol	4.3	0.75

3.2 紫外/可见及红外成像光谱仪系统

2001 年 2 月,紫外/可见及红外成像光谱仪系统 (The Optical Spectrograph and Infrared Imager System, OSIRIS) 发射于瑞典 Odin 卫星上。OSIRIS 光学系统采用非球面光栅作为色散元件,色散均匀、光谱分辨率高,可以对大气中的臭氧、 NO_2 和气溶胶进行探测。大气中间层 $50 \sim 70 \text{ km}$ 高度的臭氧含量分布可以通过对紫外波段的临边散射辐射数据反演计算得出^[8-9]。

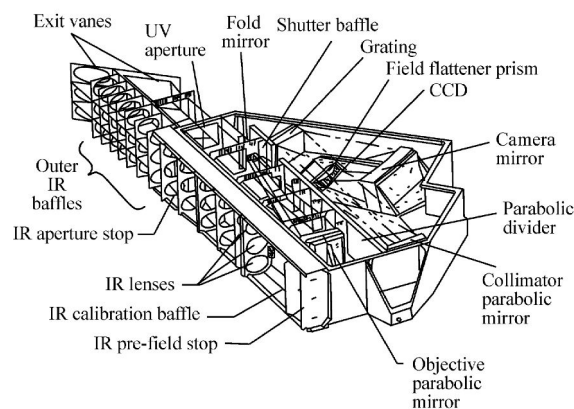


图 3 OSIRIS 光学结构图

Fig. 3 Optical schematic diagram of the OSIRIS

紫外/可见成像光谱仪的可探测光谱为 $280 \sim 800 \text{ nm}$,采用了反射式非球面刻划光栅和紫外增强型探测器。红外成像光谱仪是 3 个望远镜结构的统一体,分别工作在 1.26 、 1.27 、 $1.52 \mu\text{m}$

3 个波长,采用 InGaAs 线阵光电二极管阵列^[10]。OSIRIS 可分为 3 个子单元:光学单元、电子学单元和电源单元,体积为 200 mm × 426 mm × 485 mm,功耗为 20 W,总质量为 12 kg。OSIRIS 的光学结构如图 3 所示,图 4 为 OSIRIS 在 Odin 卫星上的实物照片。

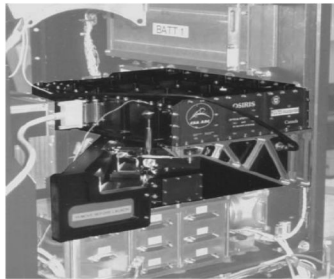


图 4 OSIRIS 在 Odin 卫星上的实物照片
Fig. 4 OSIRIS picture on secondary planet

3.3 大气制图扫描成像吸收分光计

2002 年 3 月,大气制图扫描成像吸收分光计 (SCIAMACHY) 载于欧洲空间局的环境研究卫星进入到太阳同步轨道^[11]。SCIAMACHY 可同时实现天底观测、临边观测和掩日/月观测 3 种观测模式,用于大气遥感探测的 8 通道高分辨率成像光谱仪,包括第 1~4 通道的紫外光谱区和第 5~8 通道的近红外光谱区,其中第 7 光谱通道 (1.940~2.040 μm) 的光谱分辨率可达 0.2 nm^[12-13]。图 5 为 SCIAMACHY 3 种工作观测模式的示意图。

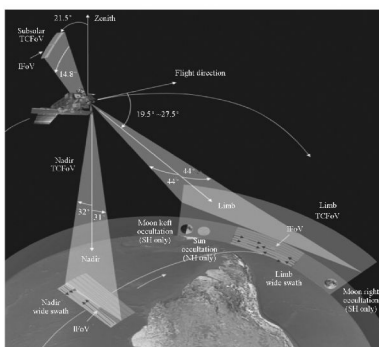


图 5 SCIAMACHY 工作模式示意图
Fig. 5 Operation schematic diagram of the SCIAMACHY

SCIAMACHY 的光学系统包括扫描镜系统、前置光学系统和光谱成像系统,如图 6 所示。扫描镜系统可以分为方位扫描镜和俯仰扫描镜,方位扫描镜和俯仰扫描镜配合使用时用来实现临边观测,俯仰扫描镜单独使用时用来完成天底观测。前置光学系统的焦距为 240 mm,入瞳直径为 31 mm,视场角为 1.8° × 0.045°,采用了一个离轴抛物面,可以实现将入射的目标景物成像到入射狭缝处^[14]。为了获得较高的光谱分辨率,光谱成像系统共实现了两次色散,依次是应用棱镜的预色散和平面衍射光栅的色散。SCIAMACHY 的总光谱为 240~2 385 nm,且要实现紫外、可见、近红外 3 个波段范围的同时探测。首先通过棱镜的预色散进行分光,然后利用 3 个双色分光镜再次区分出 8 个光谱通道。经过平面衍射光栅再次色散作用,每个光谱通道的光谱分辨率可高达 0.2~0.5 nm,最终透过透镜组聚焦成像于 1 pixel × 1 024 pixel 的线阵光电二极管探测器上^[15-16]。不同波段范围使用的探测器也有所不同,紫外、可见波段使用线阵 Si 二极管,近红外波段使用 InGaAS 光电二极管,且这些探测器均需要通过热总线装置与辐射制冷器进行连接,以确保工作温度在 150~235 K。

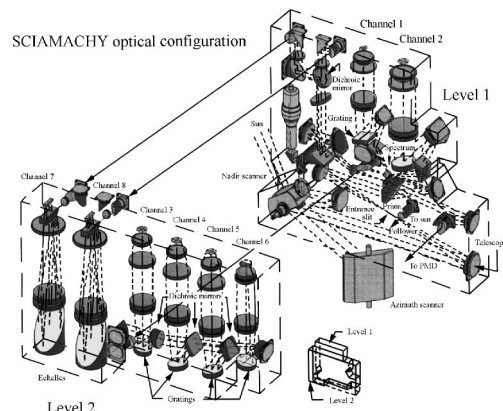


图 6 SCIAMACHY 光学结构图
Fig. 6 Optical schematic diagram of the SCIAMACHY

3.4 大气臭氧制图廓线仪

大气臭氧制图廓线仪 (OMPS) 于 2010 年载于美国国家极轨环境业务卫星系统 (NPOESS) 上,通过临边观测方式对地球临边大气进行凝视

观测,且不需要扫描镜系统。OMPS 的工作光谱为 288.5 ~ 1 020 nm, 光谱分辨率高达 1.8 ~ 40 nm^[17]。

OMPS 的光学结构如图 7 所示,包括前置望远光学系统和棱镜型光谱成像系统,而前置望远光学系统又由光阑、偏振补偿器、离轴抛物面反射镜组成。此处采用平面性偏振补偿器,可以有效控制色散棱镜和偏振敏感元件上光线的大角度入射引起的光谱响应偏振性。棱镜型光谱成像系统由入射狭缝、离轴抛物面准直镜、色散棱镜和两块聚焦透镜组成^[18-20]。采用马可尼应用技术公司定制的背景照明、帧转移、宽光谱响应面阵 CCD 探测器,像元数为 340 × 760,像元尺寸为 20 μm × 25 μm。OMPS 的视场角为 3.3° × 0.05°,空间垂直分辨率为 3 km。OMOS 光学系统采用色散棱镜作为色散元件,光谱分辨率低,并且由于色散不均匀,光谱分辨率随波长变化较大,重点监测大气臭氧成分,测量其它痕量气体会受到光谱分辨率的限制。

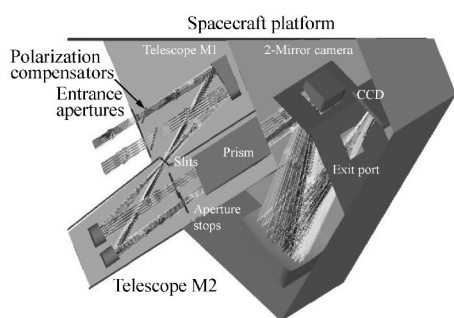


图 7 OMPS 光学结构图

Fig. 7 Optical schematic diagram of the OMPS

4 国内临边光谱仪的发展

我国对用于空间大气遥感的临边成像光谱仪的研究尚处于起步阶段。因此提高我国空间大气遥感的技术水平,紧跟国际空间大气遥感技术的发展步伐迫在眉睫。20 世纪 90 年代末,中科院大气物理所的研究人员就开始研究紫外/可见临边成像仪对于中间层和平流中上层的大气密度和臭氧含量垂直分布的基本原理和反演算法。中科院长春光机所率先与中科院大气物理所联合开展

了紫外临边成像光谱技术研究^[21-23]。

4.1 紫外/可见环形临边成像光谱仪

紫外/可见环形临边成像光谱仪是一种多波段滤光片型成像仪,通过对临边大气层的遥感探测,基于相关反演算法可计算得出大气层 20 ~ 100 km 高度的 O₃ 和 NO₂ 的浓度和垂直含量分布,理论上能够实时全方位 360° 临边探测,同时实现星下点视场的探测,空间分辨率 > 3 km。

环形临边成像仪双视场观测原理及像面成像放大图如图 8 所示。紫外/可见环形临边成像光谱仪采用姿态敏感器的折反射式设计结构,光学系统主要包括同心光学系统和视场压缩单元^[24]。对于中心视场(即星下点市场)的光线,可以直接进入到同心光学系统然后成像;而临边视场的光线则首先需要经过视场压缩器进行压缩,然后再通过同心光学镜头成像。因为两个视场可以同时进行,故成像在探测器上的为中心视场所对应的圆形图像和临边视场对应的环形图像的结合。这种双视场,多方位的探测方式为空间遥感探测提供了新的角度和数据。紫外/可见环形临边成像仪采用熔石英透镜组系统方案,透镜组的光学结构图如图 9 和图 10 所示。

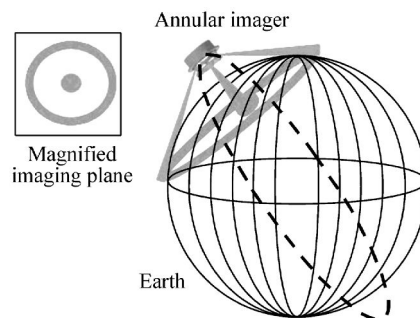


图 8 环形临边成像仪双视场观测原理及像面放大图

Fig. 8 Double field observing mode schematic diagram and magnified imaging plane of the limb annular imager

为了满足成像质量对后续透镜组的要求,应确保每个像素点与其对应的方位角成映射关系,因此此处只能采用平面型反射镜的拼接。对国内外相关姿态敏感器的研究可知,大多采用的都是

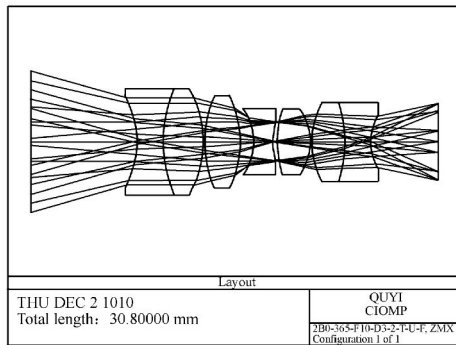


图 9 紫外环形透镜组光学结构图

Fig. 9 Optical schematic diagram of the UV annular lens

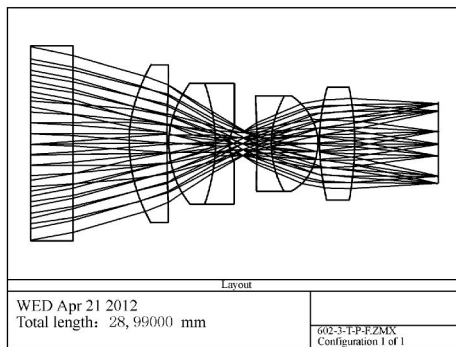


图 10 可见环形透镜组光学结构图

Fig. 10 Optical schematic diagram of the visible annular lens

两次反射的反射镜单元,但是对于紫外波段而言,为了减小能量损失和杂散光的影响,此处采用单

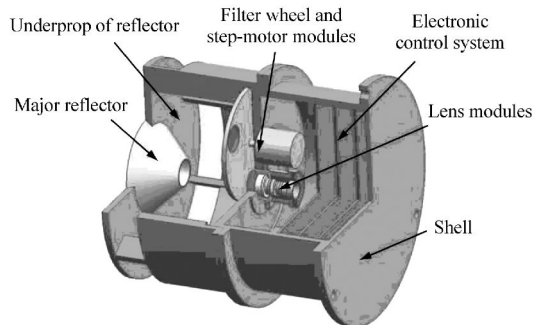


图 11 环形临边成像光谱仪的内部结构图

Fig. 11 Schematic diagram of limb imaging spectrometer

次内反射的平面型反射镜结构,一个正 12 棱锥反射器作为反射元件,承担了光学系统中唯一的反射功能,可以将环形视场接收到的信号反射到同心光学系统中。探测器采用英国 e2v 公司生产的背照式帧转移面阵 CCD,像元数 512 × 512,为了提高对紫外波段信号的接收响应,在 CCD 表面镀一层紫外增透膜^[25]。环形临边成像光谱仪的整机内部结构如图 11 所示,依次为前置反射锥结构、滤光片结构、透镜组、焦平面单元、散热单元和控制箱系统。

4.2 紫外/可见前向临边成像光谱仪

紫外/可见前向临边成像光谱仪用来遥感 300 和 600 nm 波段附近的大气中臭氧、气溶胶等大气成分的垂直分布。工作波段主要分为紫外波段(270 ~ 390 nm)和可见波段(540 ~ 780 nm),临边垂直探测范围为 10 ~ 50 km^[26-28]。紫外/可见前向临边成像光谱仪的光学结构如图 12 所示,光学系统包括前置望远光学系统和光谱成像系统。前置望远光学系统采用折射式的像方远心结构,光谱成像系统采用改进的 Czerny-Turner 型物方远心结构,以实现与前置望远光学系统更好的光瞳匹配^[29-32]。旋转滤光片轮置于望远光学系统前,可以通过切换滤光片分别探测紫外波段和可见波段,可见波段采用光栅的一级衍射,紫外波段采用光栅的二级衍射。光学性能参数如表 2 所示。

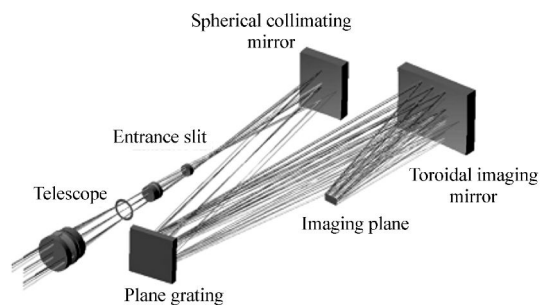


图 12 紫外/可见前向临边成像光谱仪的光学系统结构图

Fig. 12 Layout of optical system of limb imaging spectrometer

表2 前向临边成像光谱仪的光学性能参数

Tab.2 Parameters of limb imaging spectrometer

光学性能参数	数值
Spectral range	270 ~ 390 nm(2 nd order) 540 ~ 780 nm(1 st order)
Spectral resolution	114 nm(1 st order) 0.17 nm(2 nd order)
IFOV	0.12 mrad
Total field of view	0.024° × 1.6°
Entrance pupil diameter of telescope	24 mm
Focal length of telescope	120 mm
Focal length of system	124 mm
Slit dimensions	50 μm × 5 mm
Grating density	300 g [#] mm ⁻¹
Detector array size	1 025 × 1 024
Detector pixel size	13 μm × 13 μm
Outline dimension	450 mm × 250 mm × 200 mm
Mass	8 kg

5 结 论

临边观测模式是空间大气遥感的新型观测方式,因其不仅满足天底观测方式观测时具有较为宽广的空间覆盖领域的一大特点,还能和掩日/月观测方式一样具有较高的垂直分辨率,所以备受国内外空间大气遥感领域专家的关注。本文详细介绍了临边观测模式的探测原理及其特点,分别分析了国外各典型临边成像光谱仪的技术指标,并详细介绍了国内现有的临边成像光谱仪。本文的工作对我国临边成像光谱仪的发展会起到一定的借鉴作用,进而会推进空间大气遥感领域的发展与应用。

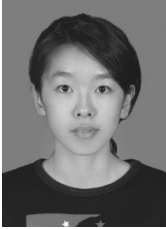
参考文献:

- [1] 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.
ZHANG X Y,ZHANG P,FANG Z Y,*et al.*. Method of retrieving refractive index of aerosol particles[J]. *Meteorological Monthly*,2007,33(7):3-13. (in Chinese)
- [2] CHEN S B. A new technique for atmospheric chemistry observations[J]. *SPIE*,2006,6031:60310R.
- [3] DIDIER R,ROBERT L. Stratospheric and upper tropospheric aerosol retrieval from limb scatter signals[J]. *SPIE*,2007,6745:674509.
- [4] CASTELLI E,DINELLI B M,CARLOTTI M,*et al.*. Retrieving cloud geometrical extents from MIPAS/ENVISAT measurements with a 2-D tomographic approach[J]. *Opt. Express*,2011,19(21):20704-20721.
- [5] FEDERICO L,SEBASTIEN V,MELANIE V,*et al.*. External occulter laboratory demonstrator for the forthcoming formation flying coronagraphs[J]. *Appl. Opt.*,2011,50(36):6632-6644.
- [6] DAVID E F,ERNEST H,SCOTT J J,*et al.*. Retrievals from the limb ozone retrieval experiment on STS107[J]. *SPIE*,2004,5542:215-226.
- [7] FLITTNER D E,HILSEN RATH E,JANZ S J,*et al.*. Retrievals from the limb ozone retrieval experiment on STS107[J]. *SPIE*,2004,5542:215-226.
- [8] MCLINDEN C A,HALEY C S. Odin/OSIRIS observations of stratospheric NO₃ through sunrise and sunset[J]. *Atoms. Chem. Phys. Discuss*,2008,8:5901-5917.
- [9] LIEWELLYN E J,LILOYD N D,DEGENSTEIN D A,*et al.*. The OSIRIS instrument on the Odin spacecraft[J]. *Can. J. Phys.*,2004,82:411-422.
- [10] HALEY C S,SAVIGNY C V,BROHEDE S,*et al.*. A comparison of methods for retrieving stratospheric ozone profiles from OSIRIS limb-scatter measurements[J]. *Advances in Space Research*,2004,34:769-774.
- [11] BOVENSMANN H,BUCHWITZ M,FRERICK J,*et al.*. SCIAMACHY on ENVISAT:n-flight optical performance and first results[J]. *SPIE*,2004,5235:160-173.
- [12] SCHYMANSKI E L,MEINER T C,MERINGER M,*et al.*. Result of a new straylight correction for SCIAMACHY[C]//Proc. of the Envisat Symposium, Montreux, Switzerland, April 23-27,2007.

- [13] BOVENSMANN H, BURROWS J P, BUCHWITZ M, *et al.*. SCIAMACHY mission objectives and measurement modes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999, 56(2):127-150.
- [14] HOOGEVEEN R W M, SPRUIJT H J, BROERS B, *et al.*. Near-infrared focal-plane arrays for SCIAMACHY [J]. *SPIE*, 1995, 2583:459-470.
- [15] MICHAEL B, HEINRICH B, MAXIMILIAN R, *et al.*. Passive satellite remote sensing of carbon dioxide and methane: SCIAMACHY, GOSAT, CarbonSat [C]//EGC General Assembly 2010, May 2-7, 2010, Vienna, Austria, 2010:6556.
- [16] MAGER R, FRICKE W, SCIAMACHY B J P. A new-generation of hyperspectral remote sensing instrument [J]. *SPIE*, 1997, 3106:84-94.
- [17] LEITCH J W, RODRIGUEZ J V, DITTMAN M. Limb scatter ozone profiling sensor for the NPOESS ozone mapping and profiler suite OMPS [J]. *SPIE*, 2003, 4891:13-21.
- [18] REMUND Q P, NEWELL D, RODRIGUEZ J V, *et al.*. The Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS): on-orbit calibration design [J]. *SPIE*, 2004, 5652:165-173.
- [19] DITTMAN M G, LEITCH J, CHRISP M, *et al.*. Limb broad-band imaging spectrometer for the NPOESS Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) [J]. *SPIE*, 2002, 4814:120-130.
- [20] PETRENKO B Z, LARSEN J C, AKMAL A. The tomography algorithm for Ozone Retrieval from the NPOESS OMPS limb measurements [J]. *SPIE*, 2003, 5157:107-115.
- [21] GUO X, LU Y, LÜ D R. Feasibility study for joint retrieval of air density and ozone concentration profiles in the mesosphere using an ultraviolet limb-scan technique [J]. *Progress in Natural Science*, 2004(6):504-510.
- [22] WANG J P, WANG S R, LIN G Y. Design of resolution testing facility for ultraviolet imager [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(7):510-512.
- [23] 梁彪, 刘伟. 二氧化碳探测仪典型透镜支撑结构的设计及分析 [J]. *中国光学*, 2012, 4(4):388-395
LIANG B, LIU W. Design and analysis of support structure for typical lens of carbon dioxide detector [J]. *Chinese Optics*, 2012, 4(4):388-395. (in Chinese)
- [24] PLEDGER D, BILLING-TOSS J, SAYLOR W, *et al.*. Low cost ultraviolet 3-axis attitude sensor system [J]. *SPIE*, 1940:231-238.
- [25] 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11):2629-2637.
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Select ion and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2629-2637. (in Chinese)
- [26] LI X, CHEN K X, HE Q SH, *et al.*. Design of freeform mirrors in Czerny-Turner spectrometers to suppress astigmatism [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(15):2871-2879.
- [27] LEE K S, THOMPON K P, ROLLAND J P. Broadband astigmatism-corrected czerny-turner spectrometer [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(22):23378-23384.
- [28] XUE Q SH. Astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer for broadband spectral simultaneity [J]. *Appl. Optics*, 2011, 50(10):1338-1344.
- [29] 安岩, 孙强, 刘英, 等. 交叉型消像散 Czerny-Turner 结构光谱仪设计 [J]. *中国光学*, 2012, 5(5):470-475.
AN Y, SUN Q, LIU Y, *et al.*. Design of astigmatism-free crossed Czerny-Turner spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5):470-475. (in Chinese)
- [30] 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.
XUE Q SH. Optical design of spaceborne broadband limb sounder for detecting atmospheric trace gas [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6):631-637. (in Chinese)
- [31] 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):2458-2462.
XUE Q SH, HUANG Y, LIN G Y. Optical system design of wide-angle and high resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optical Sinica*, 2011, 31(8):2458-2462. (in Chinese)
- [32] 刘倩倩, 郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况 [J]. *中国光学*, 2012, 5(6):566-577.
LIU Q Q, ZHENG Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions [J]. *Chinese Optics*,

2012,5(6):566-577. (in Chinese)

作者简介:



张晶(1987—),女,吉林白山人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间紫外大气遥感探测仪方面的研究。E-mail: qingjing500@sina.com



薛庆生(1979—),男,山东梁山人,博士,副研究员,主要从事空间紫外遥感仪器及成像光谱技术方面的研究。E-mail: qshxue@126.com



王淑荣(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光学检测、紫外辐射计量测试及空间紫外光谱遥感技术方面的研究。E-mail: sr-wang@ciomp.ac.cn



李博(1981—),男,吉林梨树人,博士,助理研究员,主要从事紫外光学遥感技术方面的研究。E-mail: libo0008429@sohu.com



黄煜(1979—),男,山西朔州人,博士,副研究员,主要从事紫外辐射计量测试及空间紫外光谱遥感技术方面的研究。E-mail: hysss@sina.com