

空间紫外光学遥感技术与发展趋势

王淑荣, 李福田, 曲 艺

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 空间紫外光学遥感技术是除可见、近红外、热红外和微波遥感以外的一个具有突出优势的遥感领域,全球气候变化研究是目前国际上空间紫外-真空紫外光学遥感的热点课题。本文对空间紫外光学遥感的作用、国内外研究现状及发展趋势进行了综述和分析。介绍了一组紫外光学遥感仪器的功能和特点,给出了它们的主要性能参数,指出我国目前的工作重点是推进星载紫外光谱遥感仪器的应用、积累空间探测数据、建立反演算法等,而未来发展目标将是研制集天底、临边和掩星成像探测于一体的新一代紫外成像探测仪器,高精度观测全天候的整层大气密度和臭氧的三维分布,实时监测大气组分及化学成分(如 O_2 、 N_2 、 NO 、 OH 和 O_3)的变化及变化趋势,以及进一步拓展我国紫外光学遥感仪器的应用领域。

关键词 紫外遥感;空间遥感;大气成分;综述

中图分类号:TP722.3 文献标识码:A

Space UV optical remote sensing technology and development

WANG Shu-rong, LI Fu-tian, QU Yi

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: Space ultraviolet optical remote sensing is a preponderant field besides visible light, near infrared, thermal infrared and microwave remote sensing technologies. Now, research on change of global circumstances by space ultraviolet and vacuum ultraviolet optical remote sensing technique is a hot topic in the world. In this paper, the function, status and development of space ultraviolet optical remote sensing are reviewed, and the characteristics and performance parameters of several kinds of space UV remote sensing instruments are introduced. Finally, it indicates that the key points for UV remote sensing at present are applications of the space-borne ultraviolet optical remote sensing instruments, accumulations of space detection data, and establishment of reversion algorithm. This paper suggests that the objectives of the UV optical remote sensing in future are to develop the instruments with nadir, limb and obscuration function synchronously, detect the three-dimensional ozone in high accuracy, all-weather and whole atmosphere, monitor the change and changing trend of atmospheric components in real time, and to expand the application scopes for space ultraviolet remote sensing instruments.

Key words: ultraviolet remote sensing; space remote sensing; atmospheric component; review

1 引言

空间紫外光学遥感技术是除可见、近红外、热红外和微波遥感以外的一个具有突出优势的遥感领域。该项技术基于紫外波段的太阳光被低、中、高层大气分别强烈散射和被大气中的臭氧等微量气体强烈选择吸收的特点为工作原理。所观测的大气紫外散射光谱对大气密度、大气臭氧、气溶胶及其它微量气体的密度和垂直分布极为敏感。因而,利用紫外光谱观测可以同时遥感整层大气密度和臭氧等的三维分布,这是其它波段难以做到的。夜间,在中高层大气中存在着紫外气辉发光和极光,可以表征氧原子、大气密度等成分结构的变化和受到太阳等天体活动变化产生的强扰动,而地表与低层大气为暗背景,这些为全天时观测提供了最佳原理性基础。

空间紫外光学遥感主要作用有:

1) 进行全球极光观测,获得极光谱图及全球极光分布科学数据。极光光谱数据反演可用来估算引发极光的荷电粒子流量和能量,进而得到地磁暴期间电离层及磁层扰动等空间环境信息。

2) 进行大气辉光探测,大气辉光光谱资料通过反演可以揭示主要和次要大气组分(如 O_2 、 N_2 、 NO 、 OH 和 O_3) 的浓度、温度及高度分布廓线,提供热层及电离层电子、离子、中性粒子和原子氧密度信息。

3) 研究太阳在 120 ~ 400 nm 间的紫外光谱辐射分布及其变化,反映太阳光球中发生的复杂物理过程。研究太阳紫外辐射,对了解太阳物理、行星大气物理、彗星化学和星际介质相互作用等有重大价值。此外,研究 120 ~ 400 nm 间的紫外光谱辐射及其随时间的变化对了解地球大气层中光电离及其动力学过程,进而了解地球环境的变化有重要意义。

4) 通过地球大气反射-散射的太阳紫外-真空紫外光谱观测,获得对流层和平流层中大气臭氧和其它微量气体总量的全球分布、垂直分布及其随时间的变化。

2 国外发展动态

全球环境变化研究是目前国际上空间紫外-真空紫外波段光学遥感的热点课题。

美国哥达德(Goddard)空间飞行中心于 1978 年研制成功了太阳后向散射紫外谱仪(SBUV)和臭氧总量绘图谱仪(TOMS),搭载“雨云七号”(Nimbus-7)卫星,实现了大气臭氧垂直分布和总量全球分布的同时测量^[1]。1984 年又研制成改进型太阳后向散射紫外谱仪(SBUV/2),搭载诺阿(NOAA)业务卫星进行全球大气臭氧长期监测,取得了一系列重要研究成果。

同温层气溶胶和气体实验装置(SAGE III)是美国国家宇航局在地球观测系统(EOS)中用于长期监测大气臭氧、气溶胶及其它大气成分全球变化的载荷。它是 SAM II、SAGE I、SAGE II^[2]等采用掩星观测技术的更新版本,用于完成 21 世纪前 10 年的监测任务。如图 1 所示。

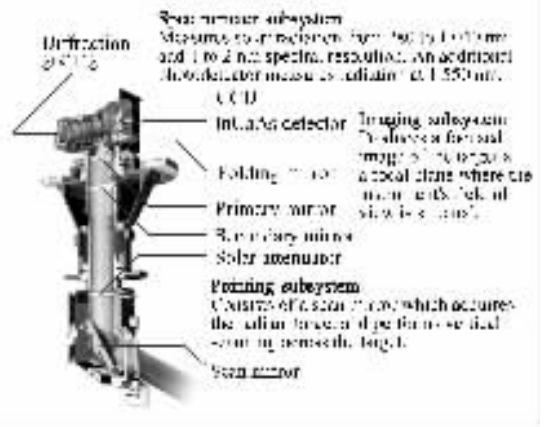


图 1 SAGE III

Fig. 1 SAGE III

臭氧临边散射实验装置(SOLSE)2001 年搭载于“哥伦比亚号”航天飞机,主要任务是验证使用临边观测法测量大气臭氧垂直分布的可行性,其垂直分辨率优于传统的天底观测方式。另外,还验证使用 CCD 技术减少转动部件,使设备简化,降低成本的可行性。SOLSE 采用 Czerny-Turner 型成像光谱仪设计以提高像质并减少内部杂散光,如图 2 所示。

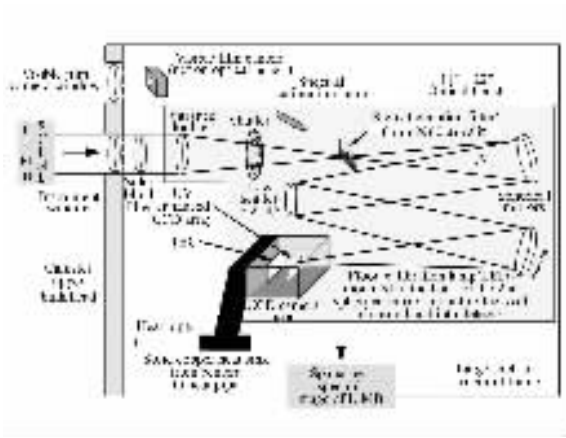


图 2 SOLSE 光路图

Fig. 2 SOLSE optical layout

临边臭氧反演实验装置(LORE)用于测量大气临边散射 2003 年搭载 STS107 进行飞行试验。该实验装置是滤光片型辐射计,由 512 像元的光电二极管线阵、干涉滤光片和经色差校正的望远镜系统组成。滤光片光谱带宽约 4 nm,带外响应极小。5 个通道(外加一个暗电流测试通道)分辨率及用途如表 1 所示。

表 1 LORE 各通道分辨率及用途

Tab.1 LORE spectral resolutions and purposes for each spectral channel

通道/nm	用途	分辨率	
		光谱/nm	垂直/km
322	同温层顶 O ₃	4.2	0.5
350	定位/同温层底(参考)	4.5	0.5
602	同温层下 O ₃	3.6	0.75
675	同温层下(参考)	3.7	0.75
1 000	云层/气溶胶	4.3	0.75

90 年代欧空局研制了全球臭氧监测实验装置^[3](GOME)和扫描成像大气吸收光谱仪^[4](SCIA-MACHY),它们分别搭载 ERS2 和 ENVISAT-1 太阳同步极轨卫星进行大气成像光谱探测。主要目的是确定大气各组分,如微量气体、气溶胶和云的分布情况。GOME 和 SCIAMACHY 的基本设计思想相同,GOME 是 SCIAMACHY 的原理性实验装置,工作波段为 240 ~ 790 nm,光谱分辨率分别为 0.2 nm(240 ~ 400 nm)和 0.4 nm

(400 ~ 790 nm),空间分辨率为 40 km × 40 km,如图 3 所示。SCIAMACHY 由光学探测系统、辐射制冷系统和电子学系统等 3 部分组成,如图 4 所示。为满足 240 ~ 2 330 nm 紫外/可见/近红外这样大波段范围的测量,SCIAMACHY 采用双单色仪结构。表 2 给出 SCIAMACHY 各通道及相应探测器参数。

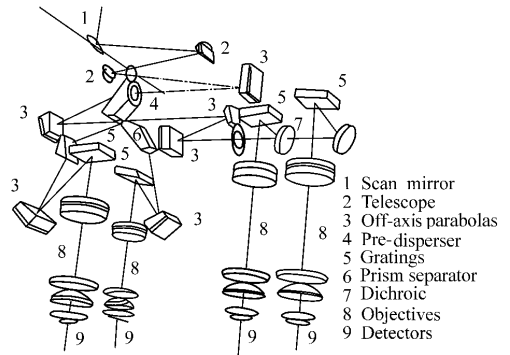


图 3 GOME 光路图

Fig. 3 GOME optical layout

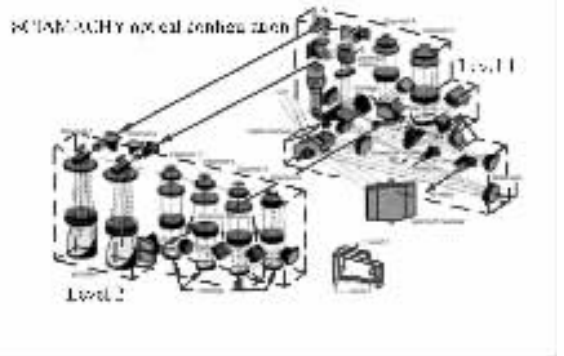


图 4 SCIAMACHY 光路图

Fig. 4 SCIAMACHY optical layout

SCIAMACHY 和 GOME 相比有 3 点改进:

- 1) 有 8 个光谱通道,覆盖 240 ~ 2 330 nm 光谱范围;
- 2) 既可进行天底扫描又可进行临边扫描和掩日测量,如图 5 所示;
- 3) 除铂-铬空心阴极光源外还采用卤钨灯进行在轨定标。

表 2 SCIAMACHY 各通道及相应探测器参数
Tab.2 SCIAMACHY channels and detecting parameters

光谱通道	波长/nm	光谱分辨率/nm	有效像元数	探测器材料	探测器温度/K
1	240 ~ 314	0.21	700	Si	200
2	309 ~ 405	0.22	1 024	Si	200
3	394 ~ 620	0.47	1 024	Si	235
4	604 ~ 805	0.42	1 024	Si	235
5	785 ~ 1 050	0.55	1 024	Si	235
6	1 000 ~ 1 750	1.56	1 024	In _{0.53} Ga _{0.47} As	200
7	1 940 ~ 2 040	0.21	1 024	In _{0.71} Ga _{0.29} As	150
8	2 265 ~ 2 380	0.24	1 024	In _{0.82} Ga _{0.18} As	150

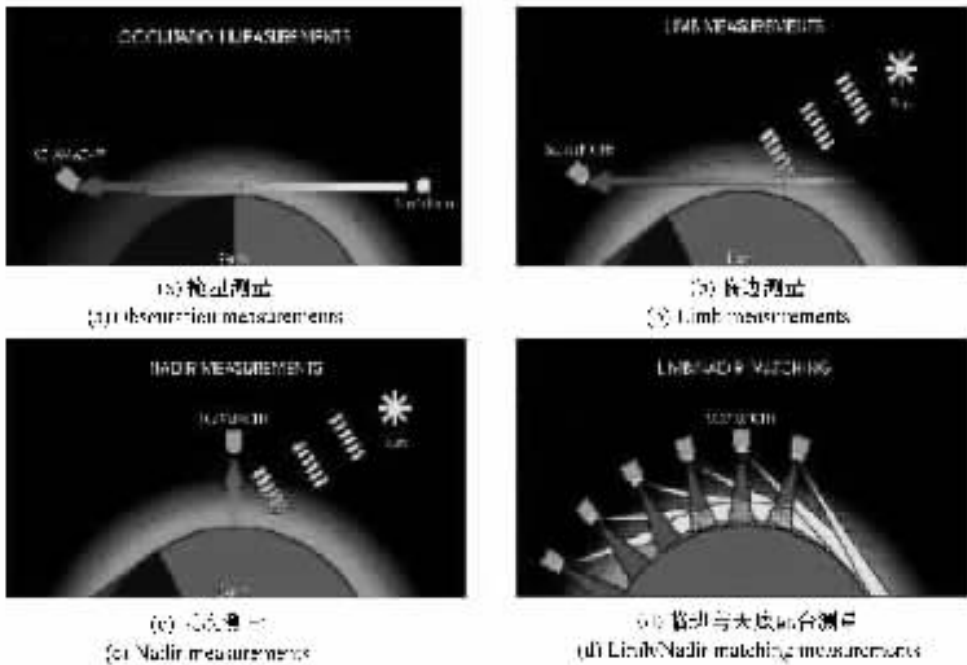


图 5 探测方式示意图

Fig.5 Detecting modes

美国下一代臭氧绘图和轮廓仪(OMPS)计划 2009 年搭载国家极轨环境业务卫星(NPOESS),用以收集紫外光谱数据,反演大气层臭氧垂直和水平分布^[5]。

OMPS 系统采用模块化的双探测系统设计,由紫外天底探测器和紫外-可见-近红外临边探测器组成。图 6 为外形图,详细性能指标参数见表 3。

表 3 OMPS 主要性能参数
Tab.3 Main performance parameters of OMPS

OMPS 系统	天底探测器		临边探测器
	天底总量仪	天底轮廓仪	临边轮廓仪
工作波段	300 ~ 380 nm	250 ~ 310 nm	290 ~ 1 000 nm
光谱采样间隔	2.4 pixels/FWHM	2.4 pixels/FWHM	2.0 pixels/FWHM
光谱分辨率(FWHM)	1.0 nm	1.0 nm	1.5 ~ 40 nm
瞬时视场(FOV)	110° × 0.3°	16.7° × 0.3°	8.5° × 2.7°(3 个狭缝)

注 FWHM 指半波带宽



图 6 OMPS 外形图

Fig. 6 OMPS

3 国内研究状况

3.1 太阳紫外光谱辐照监视器气球飞行试验

1997 年,长春光机所成功地进行了太阳紫外光谱辐照监视器高空气球飞行试验(石家庄正定机场至太原)取得 32 km 处太阳/大气紫外光谱数据,使我国成为继美国、欧洲外第 3 个进行高空气球上太阳/大气紫外光谱测量的国家。

3.2 “神舟三号”飞船太阳紫外光谱监视器

2002 年 3 月,长春光机所研制的太阳紫外光谱监视器搭载“神舟三号”飞船,成功地进行了飞行试验,在国内首次获得地外太阳紫外光谱及大气的太阳后向散射紫外光谱。

3.3 “风云三号”气象卫星紫外臭氧探测仪

针对“风云三号”气象卫星的应用,长春光机所和国家空间中心分别开展了“风云三号”气象卫星有效载荷紫外臭氧垂直探测仪和臭氧总量探测仪研制,国家卫星气象中心开展了臭氧反演等算法研究。“风云三号”紫外臭氧探测仪的主要任务是测量臭氧总量及其垂直分布,为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供重要参数。

2008 年 5 月 27 日,“风云三号”气象卫星首发星成功发射;“风云三号”紫外臭氧探测仪投入在轨运行及探测。长春光机所研制的 FY-3 紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)如图 7 所示,由探测头部和电箱组成,是一台能在 160 ~ 400 nm 波段测

量绝对光谱辐亮度和绝对光谱辐照度的扫描式光谱仪器,其波长重复性为 ± 0.02 nm,波长精度为 ± 0.05 nm。紫外臭氧垂直探测仪将我国气象卫星空间光学遥感仪器的光谱范围延拓到紫外-真空紫外波段,是我国气象卫星应用的首台紫外-真空紫外光谱遥感仪器。



图 7 紫外臭氧垂直探测仪

Fig. 7 UV ozone vertical profile probe

3.4 紫外临边成像光谱仪

临边观测方式是继天底观测方式和太阳/月亮等掩星观测方式后的第三种空间对地观测方式,具有独特的优势,即同时具有对天底观测方式的高空间覆盖范围以及掩星观测方式的高垂直分辨率。在卫星高度上观测的大气紫外临边散射光谱对大气密度、大气臭氧、气溶胶及其它微量气体的密度和垂直分布极为敏感,可以同时遥感整层大气密度和臭氧等的三维分布。因此利用紫外临边观测技术可望获得高空间-时间覆盖和高垂直分辨率的全球资料,而且可以有效避开或者减小地表、云、雨的影响,这是其它波段难以同时做到的。近年来,本课题组开展了紫外临边成像光谱仪的关键技术攻关,完成了前向临边成像光谱仪方案设计。前向临边成像光谱仪的关键技术攻关、研制及其算法研究将为气象卫星紫外遥感仪器的后续发展奠定技术基础。

4 结束语

空间紫外光学成像遥感探测技术方兴未艾,本课题组将在拓展星载紫外光谱遥感探测仪器应用,积累空间紫外辐射数据资料同时,继续深入细

致地开展卫星臭氧探测、仪器定标、数据处理及反演方法的研究,提升现有仪器应用的整体水平。

鉴于空间紫外光学遥感探测技术在空间物理现象及环境科学研究等方面的重要性,基于国际上该项技术的发展和国内现有的紫外光谱遥感技术的基础,未来发展目标将是:在星载紫外光谱遥感探测仪器应用、空间探测数据积累、反演算法建

立等技术储备基础上,发展集天底、临边和掩星成像探测于一体的新一代紫外成像探测仪。通过天底、临边及掩星同时探测,实现高精度全天候的整层大气密度和臭氧等的三维分布,实时监测大气成分(如 O_2 、 N_2 、 NO 、 OH 和 O_3)的变化及变化趋势,同时拓展空间紫外遥感仪器在其它领域的应用。

参考文献:

- [1] HEATH D F, AHMAD Z, WEI Z Y. Applications of ultraviolet absolute radiometry in satellite and surface-based remote sensing of atmospheric ozone[J]. *Opt. Eng.* 2002 41(12): 3104-3110.
- [2] ACKERMAN M, BROGNIEZ C, DIALLO B S *et al.*. European validation of SAGE II aerosol profiles[J]. *J. Geophys. Res.* 1989 94D6: 8399-8411.
- [3] BURROWS J P, WEBER M, BUCHWITZ M *et al.*. The Global Ozone Monitoring Experiment(GOME) mission, concept, and first scientific results[C]. *Proc 3rd ERS Symposium*(Florence), 1997.
- [4] NOEL S, BOVENSMANN H, BURROWS J P *et al.*. SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1[J]. *SPIE*, 1998, 3498: 94-104.
- [5] DITTMAN M G, LEICH J W, CHRISP M *et al.*. Limb broad-band imaging spectrometer for the NPOESS Ozone Mapping and Profiler Suite(OMPS)[J]. *SPIE* 2002 4814: 120-129.

作者简介:王淑荣(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,研究方向为紫外光学遥感技术。

E-mail: srwang@ciomp.ac.cn