

文章编号: 0253-2239(2010)05-1516-06

光栅色散临边成像光谱仪的研究

薛庆生^{1,2} 王淑荣¹ 李福田¹

(¹ 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)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 临边成像光谱仪是一种对大气遥感探测有重要研究和应用价值的新型空间光学遥感仪器。从大气临边成像光谱探测的原理出发,设计并研制了光栅色散紫外/可见临边成像光谱仪原理样机。该样机采用宽波段折射式消色差前置望远光学系统与改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统匹配的结构型式,其中,前置望远光学系统为像方远心,光谱成像系统为物方远心。工作波段为 540~780 nm(一级衍射光谱)和 270~390 nm(二级衍射光谱),通过切换可见、紫外带通滤光片来实现两个波段分别探测,质量为 8 kg, 体积为 450 mm×250 mm×200 mm。实验检测结果表明,该样机的空间分辨率为 0.45 mrad,光谱分辨率为 1.3 nm,均满足设计指标要求,并且具有体积小、质量小等特点,适合空间遥感应用。

关键词 光谱学;光学设计;临边成像光谱仪;原理样机;平面光栅;空间分辨率;光谱分辨率

中图分类号 O433.1;TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1516

Study on Limb Imaging Spectrometer with Grating Dispersion

Xue Qingsheng^{1,2} Wang Shurong¹ Li Futian¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Limb imaging spectrometer is an important new remote sensor for research and application of atmospheric remote sensing. The principle of atmospheric sounding using limb imaging spectrometer is analyzed. The prototype of grating dispersion type UV/visible limb imaging spectrometer is designed and manufactured. It consists of a broadband refractive achromatic fore telescope optical system and a modified Czerny-Turner spectral imaging system. The fore telescope system is telecentric in image space and the spectral imaging system is telecentric in object space. It works over the spectral range of 540~780 nm (1st order) and 270~390 nm (2nd order). It records images from 540~780 nm when the visible filter in place, and 270~390 nm when the UV filter in place. The volume of the prototype is about 450 mm×250 mm×200 mm, and the total mass is about 8 kg. The test result demonstrates that the spatial resolution is 0.45 mrad and the spectral resolution of the prototype is 1.3 nm. Both spatial and spectral resolution satisfy the design requirement. The volume of the prototype is small and the mass is light, so it is suitable for spatial remote sensing.

Key words spectroscopy; optical design; limb imaging spectrometer; prototype; plane grating; spatial resolution; spectral resolution

1 引言

大气的探测和研究是地球和空间科学界共同关

注的热点课题,特别是由于卫星遥感比地基观测具有更高的空间覆盖率、时间的连续性和任务多样性

收稿日期: 2009-06-22; 收到修改稿日期: 2009-07-16

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z151)和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新项目资助课题。

作者简介: 薛庆生(1979—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计及空间紫外遥感仪器的研制等方面的研究。

E-mail: xueqs_ciomp@163.com

导师简介: 王淑荣(1961—),女,博士生导师,主要从事空间紫外遥感仪器及成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

而具有不可替代的优势,因而卫星遥感成为获得全球中层大气状况的主要手段^[1, 2]。对大气进行遥感探测有三种观测方式,即天底观测方式、掩星(掩日/月)观测方式和临边观测方式。天底观测方式虽然具有高空间覆盖范围,但垂直分辨率较低。掩星观测方式虽然具有高的垂直分辨率,但由于其绕轨道一周只能进行两次有限时间内的观测,因此其空间覆盖范围很低。临边观测方式是一种新的观测方式,它既具有天底观测方式的高空间覆盖范围又同时具有掩星观测方式的高垂直分辨率,因此成为国际研究的热点^[3]。

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代开始在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来的新一代光学遥感仪器,它是遥感技术的进步和发展,能够以高光谱分辨率获取景物和目标的超多波段图像,在大气、海洋和陆地观测中正在得到广泛的应用^[4~6]。以临边观测方式进行大气遥感探测的成像光谱仪称为临边成像光谱仪^[7]。近 10 年来,用于大气遥感探测的临边成像光谱仪因为其独特的优势逐渐成为美国和欧洲等发达国家研究的热点,他们投入大量的人力和物力进行临边成像光谱仪的研究,取得了一定的研究成果^[8, 9]。成像光谱仪是成像技术与光谱技术的有机结合,它的光学系统一般由前置望远光学系统和光谱成像系统组成^[10]。成像光谱仪按分光方式不同可分为光栅色散型、棱镜色散型、滤光片型和干涉型。光栅色散成像光谱仪相对于棱镜色散成像光谱仪具有色散均匀、光谱分辨率高、谱线弯曲(Smile)小、色畸变(Spectral keystone)小等优点,受到极大关注^[11]。

2 临边成像光谱探测原理

临边成像光谱仪探测地球临边大气散射光辐射,通过分析它的光谱特性,进而反演大气成分(痕量气体和气溶胶等)的垂直分布信息。图 1 为临边观测的几何原理图,可以看出,临边成像光谱仪对沿地球某高度切线方向上的大气进行观测,接受来自于临边观测路径上的散射到仪器视场内的散射辐射。由于临边探测方式是一种对大气进行切片式探测技术因此垂直分辨率很高。仪器视线由临边高度决定,它测量的临边光谱辐亮度包括单次和多次散射的太阳光谱辐射。临边散射亮度随临边高度和波长的变化反应了大气中吸收体和散射体(特别是痕量气体臭氧、二氧化氮和大气气溶胶)的空间分布。

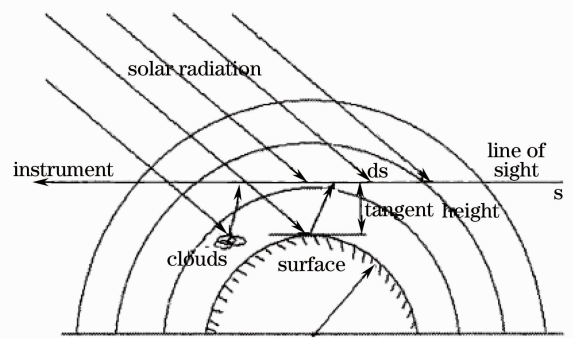


图 1 地球临边大气成像光谱探测原理

Fig. 1 Principle of earth limb atmospheric sounding using imaging spectrometer

3 应用要求及技术指标

临边成像光谱仪用来遥感大气中臭氧、气溶胶等大气成分的垂直分布,对这些大气成分较敏感的波段分别在 600 nm 和 300 nm 附近。该临边成像光谱仪原理样机预计要工作在轨道高度 400 km 的卫星平台上,仪器到临边观测点的距离 2294 km。根据以上要求确定原理样机的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 临边成像光谱仪原理样机主要技术指标

Table 1 Specification requirement of limb imaging spectrometer prototype

Spectral range	270~390 nm (2nd order)
	540~780 nm (1st order)
Spectral resolution /nm	1.4 (1st order),
	0.7 (2nd order)
Spatial resolution /mrad	0.5
Vertical field of view /($^{\circ}$)	2.3
Horizontal field of view /($^{\circ}$)	0.024
Entrance pupil diameter of telescope /mm	24
Focal length of telescope /mm	120
Focal length of system /mm	124.8
Slit dimensions	5 mm \times 50 μ m
Detector array size	1024 \times 1024
Detector pixel size	13 μ m \times 13 μ m
Outline dimension	(2 \times 2 use together)
	450 mm \times 250 mm \times 200 mm
Mass /kg	<10

4 光学系统设计

临边成像光谱仪光学系统由前置望远光学系统和光谱成像系统组成。根据应用要求,为设计轻量化的临边成像光谱仪,在工程权衡各种光学设计方

案的基础上,优选了宽波段(270~780 nm)消色差折射式前置望远光学系统与改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统匹配的 光学结构型式。该结构型式具有质量小、结构紧凑的特点。为了实现光瞳匹配,要求前置望远光学系统为像方远心,光谱成像系统为物方远心。

4.1 前置望远光学系统设计

前置望远光学系统波段宽(270~780 nm),并且包含紫外波段,光学材料在紫外波段色散大,可选择的种类少并且不能使用胶合面使得在紫外波段色差校正比较困难。随着波长变短,光学材料的色散变大,使得光学系统的像差尤其是色差校正变得困难,要校正色差,要用不同色散的材料进行不同的光焦度分配,一般情况下,正透镜用阿贝数高的材料,负透镜用阿贝数较低的材料。在综合考虑光学材料透过率、耐辐射性能、理化性能及加工性能的基础上,选择了在紫外和可见波段具有高透过率的熔石英和 CaF_2 光学材料, CaF_2 的阿贝数高,作为正透镜;熔石英的阿贝数小,作为负透镜。在结构型式选择上,首先考虑的是三片型结构,由于前置望远光学系统波段范围宽、相对孔径较大($F/5$),仅三片不能达到实际要求的结果,因此在三片型结构基础上重新对结构进行了复杂化。中间设光阑,分成前后两组,把光焦度平均分配给前后两组镜片,基本接近设计的要求,再次将后组的光焦度稍稍进行调整,得到了基本合理的初始结构,结构如图 2 所示。得到基本的初步设计结构后,利用光学设计软件 Zemax-EE 对其进行了优化设计,在入射狭缝处的点列图分布如图 3 所示。

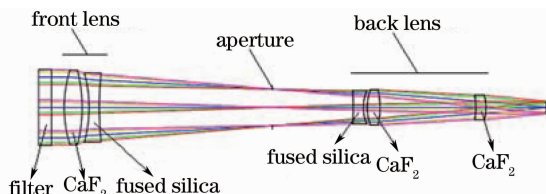


图 2 前置望远光学系统光路图

Fig. 2 Layout of the fore telescopic optical system

4.2 光谱成像系统设计

原则上凹面光栅、凸面光栅^[12]和平面光栅均可作为成像光谱仪的色散元件,但是凹面光栅和凸面光栅加工制作困难、价格昂贵,并且对具体的系统要定制,通用性差,所以选择平面衍射光栅作为色散元件,它的加工制作工艺相对成熟,技术上容易实现。在传统的平面光栅光谱仪中,采用最多的是 Czerny-Turner 结构。在传统的 Czerny-Turner 结构中,采

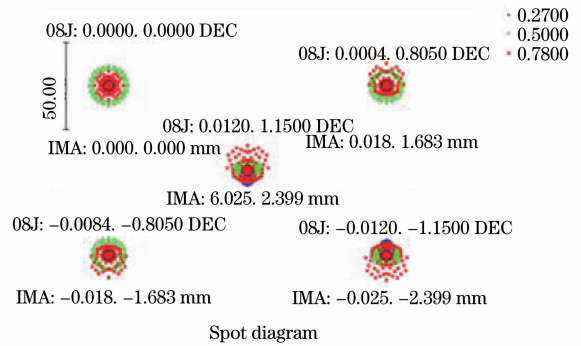


图 3 入射狭缝处的点列图分布

Fig. 3 Spot diagram at the entrance slit

用两个球面镜分别作为准直镜和成像镜,由于狭缝高度方向和狭缝宽度方向上的视场差别很大,在狭缝高度方向上存在很大的像散,严重影响狭缝高度方向上的空间分辨率。从像差理论出发对其进行了改进。改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统利用超环面成像镜代替传统 Czerny-Turner 光谱成像系统中的球面成像镜,通过超环面成像镜在子午和弧矢方向上的曲率半径的不同来校正沿狭缝高度方向上的像散。在传统的 Czerny-Turner 光谱成像系统中,光栅位于准直镜和成像镜的焦点附近,此时像差的校正严重地依赖与波长,只能在很窄的波段内同时获得良好的成像质量。经过研究发现^[13],当光栅近似与准直镜和成像镜的曲率中心共面时,在宽波段范围内可以同时获得良好的成像质量,满足临边成像光谱仪的应用要求。将优化设计的光谱成像系统和前置望远系统连接得到临边成像光谱仪全系统的结构如图 4 所示。在工作波段内,临边成像光谱仪光学系统点列图的均方根值随波长的变化如图 5 (a)和 5(b)所示。从图中可看出在整个工作波段内,点列图半径的均方根值小于 $13 \mu\text{m}$,即在整个工作波段内,同时获得了良好的成像质量,满足临边成像光谱仪的光学设计要求。

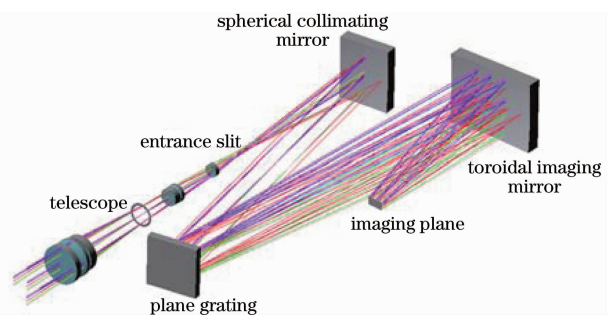


图 4 临边成像光谱仪全系统光路图

Fig. 4 Layout of optical system of limb imaging spectrometer

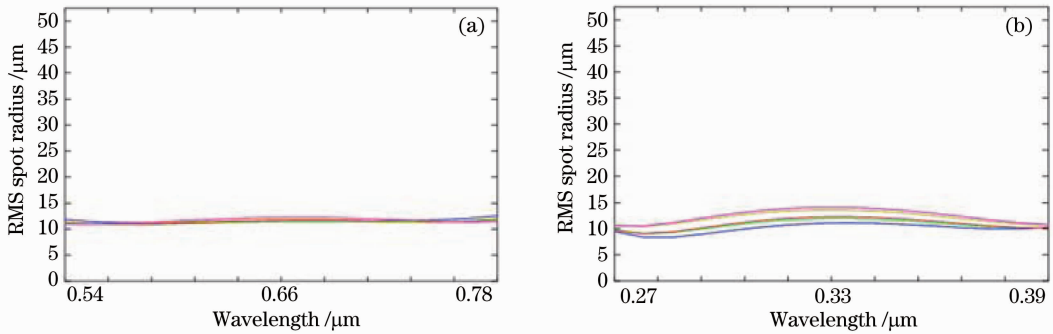


图 5 点列图半径的均方根值随波长(a) 540~780 nm 和(b)270~390 nm 的变化关系曲线

Fig. 5 RMS spot radius versus wavelength (a) 540~780 nm and (b)270~390 nm

5 CCD 探测器的选择及原理样机集成

原理样机覆盖的波段宽,且含有紫外波段,经过调研和性能比较,选择了英国 e2V 公司的紫外增强型 e2VCCD47-20 作为原理样机的探测器,这是一种高灵敏度、低暗电流、宽光谱响应、帧转移、背照明的 CCD 面阵探测器,像元尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,像元数 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 2×2 个像元合并使用,其量子效率曲线如图 6 所示。光机系统集成后的原理样机的实物照片如图 7 所示,外形尺寸 $450 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,质量 8 kg,满足设计指标要求。

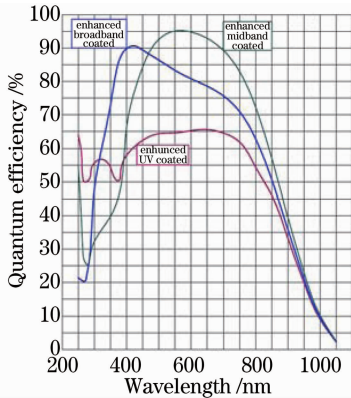


图 6 e2VCCD48-20 量子效率曲线

Fig. 6 Quantum efficiency curve of e2VCCD48-20

6 原理样机的性能检测

6.1 空间分辨率检测

空间分辨率是临边成像光谱仪的重要技术指标之一,空间分辨率检测是评价成像光谱仪性能的重要环节。空间分辨率检测就是对仪器的成像质量进行评价。实验中采用的分辨率靶标是美国空军 (USAF)1951(美军标 MIL-STD-150A)三条靶,如图 8 所示,每一个空间频率都由相互垂直的双向图

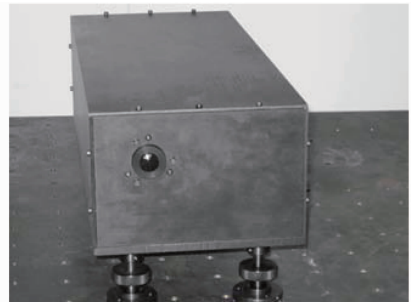


图 7 临边成像光谱仪实物照片

Fig. 7 Photograph of limb imaging spectrometer prototype

案(三条靶)构成,三条靶空间频率 N_c 可以表示为

$$N_c = 2^{(k+\frac{m-1}{6})}, \quad (1)$$

式中 k 为分组号, m 为单元号。

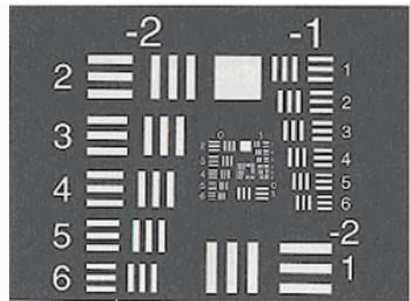


图 8 美国空军三条靶图案

Fig. 8 USAF resolution test chart

空间分辨率检测由连续谱源的条形目标进行特性测量,检测装置示意图如图 9 所示。检测装置主要由积分球光源、分辨率靶标、平行光管及相关辅助设备组成。分辨率靶标置于由平面反射镜和离轴抛物面反射镜构成的平行光管的焦点处,以模拟无穷远的目标。积分球光源照明分辨率板,从分辨率板透射的光束经平行光管准直后由临边成像光谱仪样机接收,在原理样机焦面上得到目标的图像。

图 10 为空间分辨率检测结果。图 10(a)为在

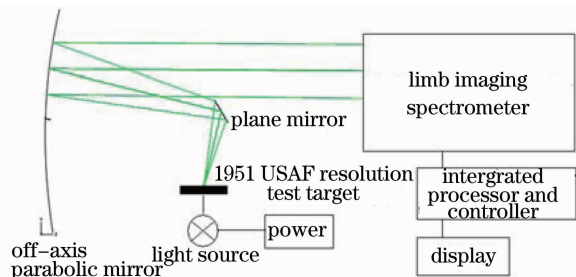


图 9 空间分辨率检测装置示意图

Fig. 9 Configuration of experimental setup for spatial resolution test

原理样机的焦面上获得的图谱合一的单帧图像, 图像的垂直方向为空间维, 图像的水平方向为光谱维

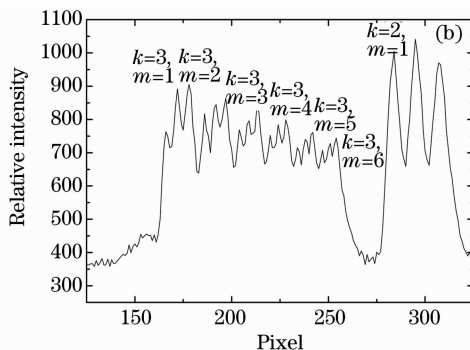
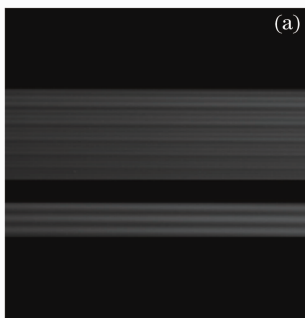


图 10 (a)原理样机焦面上分辨板图像;(b)原理样机焦面上分辨板图像强度轮廓

Fig. 10 (a) Image of resolving power test target in focal plane of the prototype, (b) intensity profile of test target in focal plane of the prototype

6.2 光谱分辨率测量

光谱分辨率的测定可以利用已知的强度相近的波长差接近理论分辨极限的谱线对进行实际测定, 然后观察可分辨的最小波长差 $\Delta\lambda$, 这只是一近似的估计方法, 由于其简单而在光谱仪的检验中应用最广。

用临边成像光谱仪样机对低压汞灯的光谱进行了测量。将汞灯置于平行光管的焦面位置处, 汞灯发出的光辐射经由平行光管形成一束平行光, 进入临边成像光谱仪原理样机, 由数据采集系统得到光谱通道的光谱响应。图 11 为 CCD 像面上获得的低压汞灯的光谱图像, 图 12 为低压汞灯的光谱图。通过测量得到汞灯在可见波段范围内的 546. 1, 576. 96, 579. 07 nm 的一级标准谱线和 312. 57 nm, 365. 02 nm 的二级谱线。由采集的低压汞灯的谱线可以看出, 临边成像光谱仪样机可以完全把汞灯汞双线 576. 96 nm 和 579. 07 nm 分开。可以近似的认为, 在波长 578 nm 处的光谱分辨能力 $\Delta\lambda \approx 2$ nm。由于低压汞灯绿光谱线自身的带宽远小于 1 nm, 实际测得低压汞灯绿光谱线的带宽为 1.3 nm, 即原理样机的光谱分辨率

(对应 CCD 光谱维的 540~780 nm 区), 图中显示了原理样机在连续光谱的光源照明下的空间分辨率检测结果(从上到下分辨率为 8, 8. 98, 10. 1, 11. 3, 12. 7, 14. 3, 4 lp/mm)。图 10(b) 为图像沿一个中心列(660 nm) 的强度廓线, 定量证明了定义的空间分辨率。从图 10(b) 中可以看出, 能分辨的最大空间频率为 $k = 3, m = 6$ 所对应的空间频率, 即 $N_c = 14. 3$ lp/mm, 检测装置中, 平行光管焦距为 $f_c = 157$ mm, 原理样机系统的的焦距为 $f_p = 124. 8$ mm, 所以原理样机的空间分辨率 N_p 为

$$N_p = N_c f_c / f_p = 18 \text{ lp/mm}, \quad (2)$$

相当于 0.45 mrad, 满足 0.5 mrad 的设计要求。

1.3 nm, 满足设计指标 1.4 nm 的要求。



图 11 CCD 像面上低压汞灯光谱图像

Fig. 11 Spectrum of low-pressure Hg lamp on CCD imaging surface

7 结 论

分析了大气临边成像光谱探测的原理, 根据应用要求和技术指标, 设计并研制了光栅色散紫外/可见临边成像光谱仪原理样机, 并在实验室内对原理样机的性能进行了检测。检测结果表明, 样机的空间分辨率为 0.45 mrad, 光谱分辨率为 1.3 nm, 均满足设计指标要求。

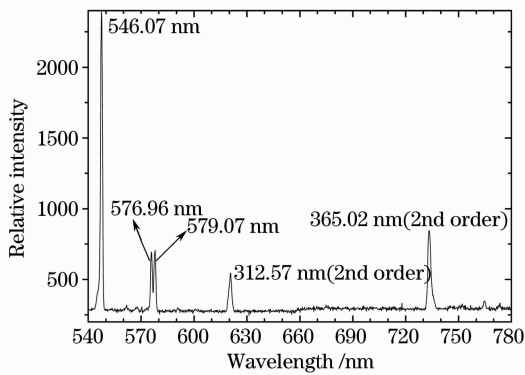


图 12 低压汞灯光谱图

Fig. 12 Spectrum of low-pressure Hg lamp

参 考 文 献

- 1 Lü Daren, Chen Zeyu, Bian Jianchun *et al.*. Advances in researches on the characteristics of multi-scale processes of interactions between the stratosphere and troposphere and its relations with weather and climate[J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 782~793
吕达仁, 陈泽宇, 卞建春等. 平流层-对流层相互作用的多尺度过程特征及其与天气气候的关系-研究进展[J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 782~793
- 2 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Song Kefei *et al.*. Measurement of ultralow spectral transmissivity by high-precision spectral radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10): 1534~1539
薛庆生, 王淑荣, 宋克非等. 高精度光谱辐射计测量超低光谱透过率[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(10): 1534~1539
- 3 S. Chen. A new technique for atmospheric chemistry observations[C]. *SPIE*, 2006, **6031**: 6031R-1~6031R-7
- 4 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
- 5 Peng Zhihong, Zhang Chunmin. Influence of depth of field on resolution of a microscope polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 239~243
彭志红, 张淳民. 显微偏振干涉成像光谱仪中景深对系统分辨率的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 239~243
- 6 Zhang Chunmin, Wang Wei, Xiangli Bin *et al.*. Interference image spectroscopy for upper atmospheric wind field measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 234~239
张淳民, 王伟, 相里斌等. 利用干涉成像光谱技术测量大气风场[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 234~239
- 7 G. D. 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 S. V. Petelina, E. J. Llewellyn, D. A. Degenstein *et al.*. Odin/ OSIRIS limb observations of polar mesospheric clouds in 2001-2003[J]. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**(1): 42~55
- 9 H. Bovensmann, M. Buchwitz, J. Frerick *et al.*. SCIAMACHY on ENVISAT: In flight optical performance and first results[C]. *SPIE*, 2004, **5235**: 160~173
- 10 Feng Yutao, Xiang Yang. Effect of spectral curvature on signal acquisition of imaging spectrometer with prism dispersion in VNIR[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 20~25
冯玉涛, 向阳. 谱线弯曲对成像光谱仪辐射信号采集的影响[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(1): 20~25
- 11 Zheng Yuquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. *J. Remote Sensing*, 2002, **6**(1): 75~80
郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. *遥感学报*, 2002, **6**(1): 75~80
- 12 Zheng Yuquan. Design of compact offner spectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(6): 650~657
郑玉权. 小型 offner 光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(6): 650~657
- 13 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(1): 11~16