

大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计

薛庆生 黄 煜 林冠宇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 大视场、高分辨力星载成像光谱仪已成为空间遥感的迫切需求。根据大视场、高分辨力的研究目标,提出了先视场分离分光再用分色片分光的设计方法,分析了视场分离分光的原理。设计了一个全反射式星载成像光谱仪光学系统,该系统由指向镜、 11.42° 远心离轴三反消像散(TMA)前置望远系统和 4 个 Offner 凸面光栅光谱成像系统组成,通过恰当选择 4 个光谱成像系统的变倍比来实现 2 种探测器的匹配。运用光学设计软件 CODE V 对成像光谱仪调制系统进行了光线追迹和优化,并对设计结果进行了分析。分析结果表明,光学系统在各个谱段的光学传递函数均达到 0.7 以上,完全满足设计指标要求;同时证明了设计方法是可行的。

关键词 光学设计;成像光谱仪;离轴三反消像散;凸面光栅;Offner 光谱成像系统

中图分类号 O433.1; TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0822001

Optical System Design of Wide-Angle and High-Resolution Spaceborne Imaging Spectrometer

Xue Qingsheng Huang Yu Lin Guanyu

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

Abstract Space remote sensing urgently requires wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer. According to the research objective of wide angle and high resolution, the design method of firstly dividing field of view (FOV) and secondly dividing beam using dichroscope is developed. The principle of dividing FOV is analyzed. A reflective spaceborne imaging spectrometer is designed, which is composed of a pointing mirror, a 11.42° telecentric off-axis three-mirror anastigmatic (TMA) telescope and four Offner convex grating spectral imaging systems. The proper magnification is chosen for each spectral imaging system to match two types of detectors. Ray tracing and optimization are performed and analyzed by CODE V software. The results demonstrate that the modulation transfer function (MTF) for different spectral bands is more than 0.7, which satisfies the pre-designed requirement. The design method is proved to be feasible.

Key words optical design; imaging spectrometer; off-axis three-mirror anastigmatic; convex grating; Offner spectral imaging system

OCIS codes 220.4830; 120.4820; 280.4788

1 引 言

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空间光学遥感仪器,它标志着遥感技术的进步和发展,能够以高光谱分辨力获取景物和目标的超多谱段图像,在陆地、大气和海洋观测中正得到广泛的应用^[1~6]。

成像光谱仪的工作波段宽、分辨力高,一般工作

波段覆盖 $0.4\sim 2.5\mu\text{m}$,地面像元分辨力从几米至几十米,光谱分辨力从几纳米至几十纳米。目前国际上已研制成功的成像光谱仪,具有代表性的有美国 TRW 公司研制的 Hyperion^[7],视场 0.624° ,刈幅宽度 7.5 km;美国海军 NEMO 卫星的主载荷 COIS^[8],视场 2.5° ,刈幅宽度 30 km;英国 Sira 公司研制的 CHRIS^[9],视场角 0.553° ,刈幅宽度 13 km。

收稿日期: 2010-10-18; 收到修改稿日期: 2011-04-20

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z151)资助课题。

作者简介: 薛庆生(1979—),男,博士,助理研究员,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

这些成像光谱仪载荷在空间遥感中发挥了重要作用,但是它们的特点是视场角较小、刈幅宽度小。随着空间遥感应用的不断深入,对成像光谱仪的要求也越来越高,要求在大视场的条件下获得高分辨力,因为视场越大则刈幅宽度越大,仪器的回访周期就越小;分辨力越高,就可在多项应用中提供更加丰富的数据和研究方法。因此大视场、高分辨力星载成像光谱仪成为空间遥感的迫切需求,而现有的小视场成像光谱仪不能满足要求。

成像光谱仪光学系统由指向镜、前置望远系统和光谱成像系统组成。地物目标的一个条带经指向镜和前置望远系统成像在光谱成像系统的入射狭缝上,光谱成像系统对其进行色散,然后按波长不同成像在探测器的不同位置上,再经卫星运行方向推扫得到图谱合一的图像。在成像光谱仪的研制过程中,光学系统的选择和设计直接影响着整个成像光谱仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等。

本文根据大视场、高分辨力成像光谱仪的应用要求和技术指标,提出了先视场分离分光再用分色片分光的光学设计方法,详细分析了视场分离分光方法的原理。运用该方法设计了大视场、高分辨力

星载成像光谱仪光学系统,并对设计结果进行了分析与评价。

2 应用要求及主要技术指标

星载成像光谱仪要求在 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内对地物特征和性质进行高光谱成像探测及实验验证目标识别,并开展在农、林、水、土和矿等资源及环境民用领域的初步应用。卫星轨道高度 $H=600\ \text{km}$,要求刈幅宽度 $W_G=120\ \text{km}$,地面像元分辨力 $R_{\text{GSD1}}=30\ \text{m}$ ($0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$,可见近红外波段,VNIR)、 $R_{\text{GSD2}}=60\ \text{m}$ ($1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$,短波红外波段,SWIR)。光谱分辨力 $5\ \text{nm}$ ($0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$,VNIR 波段)、 $10\ \text{nm}$ ($1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$,SWIR 波段)。由于受市售 CCD 产品和 HgCdTe 面阵探测器的限制,可选择的余地非常有限,在 VNIR 红外波段,可用的 CCD 探测器像元尺寸为 $p_1=18\ \mu\text{m}$,像元数为 2048 (空间维) $\times 256$ (光谱维),在 SWIR 波段,可用的 HgCdTe 探测器的像元尺寸 $p_2=30\ \mu\text{m}$,像元数 1000 (空间维) $\times 256$ (光谱维)。根据以上要求,确定成像光谱仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 成像光谱仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of imaging spectrometer optical system

Parameter	Value
Spectral range / μm	$0.4\sim 2.5$
Field of view (FOV) / $^\circ$	11.42
Focal length of telescope /mm	360
Focal length of system /mm	360 ($0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$, VNIR) 300 ($1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$, SWIR)
Entrance diameter /mm	90
Detector array size /pixel	2048×256 ($0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$, VNIR) 1000×256 ($1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$, SWIR)
Detector pixel size / μm	18×18 ($0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$, VNIR) 30×30 ($1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$, SWIR)

3 视场分离分光原理

从技术指标可以看出,这是一个大视场、高分辨力星载成像光谱仪光学系统。由于市售探测器的限制,在满足地面像元分辨力的前提下,探测器在空间维上不够大。因此为同时满足大视场和高分辨力的要求,提出了视场分离分光方法,其原理如图 1 所示,将全视场 11.42° 分成 $0^\circ\sim 5.71^\circ$ 和 $-5.71^\circ\sim 0^\circ$ 两个视场,分别定义为视场 1 和视场 2。视场 1 和视场 2 使用各自独立的狭缝,在望远系统的焦平面前放置一个刀口反射镜,精确控制刀口反射镜切入

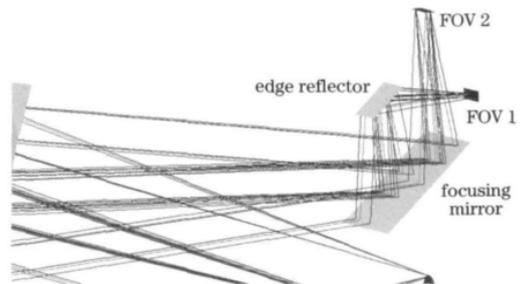


图 1 视场分离结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of viewing field splitter

光束的位置,使其既不会挡住视场 2 的入射光束、又能反射视场 1 的光束。控制刀口反射镜的方向可以转动视场 1 光束的空间位置。该设计可以减小仪器体积。在视场分离方法中,两个狭缝的位置精确匹配控制,视场 1 和视场 2 不能同时对地面同一目标成像,但通过沿卫星飞行方向推扫和数据重组,能够获得 120 km 的刈幅宽度。视场分离后,再利用分色片分别把视场 1 和视场 2 的光束分成 VNIR 和 SWIR 波段分别探测,前者为 120 个光谱通道,后者为 150 个光谱通道。

4 成像光谱仪光学系统设计

4.1 前置望远系统设计

前置望远系统覆盖的波段宽,视场大,分辨力要求高,因此前置望远系统采用离轴三反消像散(TMA)^[10, 11]结构。TMA 系统是近年发展起来的新型光学系统,由 3 块非球面反射镜组成,具有无中心遮拦、分辨力高、体积小和平像场等优点。为了与光谱成像系统实现光瞳匹配,要求前置望远系统具

有像方远心结构。应用 CODE V 光学设计软件对前置望远系统进行了优化设计,光学结构参数如表 2 所示,光学结构如图 2 所示,次镜为孔径光阑,主镜为六次非球面,次镜和三镜均为二次曲面。图 3 为前置望远系统的调制传递函数(MTF),各视场在特征频率 28 lp/mm 处(MTF)大于 0.75,远高于 MTF 大于 0.5 的设计指标要求。

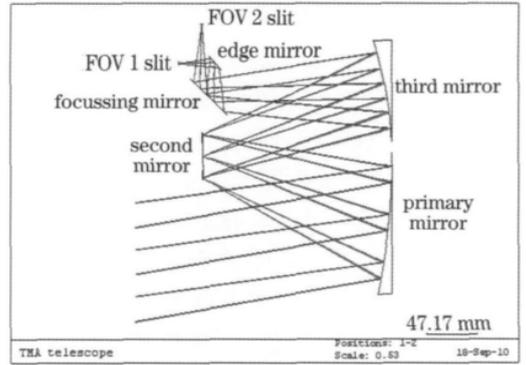


图 2 离轴三反消像散前置望远系统光学结构图
Fig. 2 Optical path of TMA fore telescope system

表 2 前置望远系统结构参数

Table 2 System parameter of fore telescope

Surface	Radius	Thickness	Glass	Conic	Sixth order coefficient
Object surface	Infinity	Infinity			
1	669.03715	178.37267	Mirror	-1.79963	9.6273×10^{-16}
Stop	229.34872	-178.37267	Mirror	-0.43315	
3	341.86967	237.51759	Mirror	0.14787	
Image	Infinity				

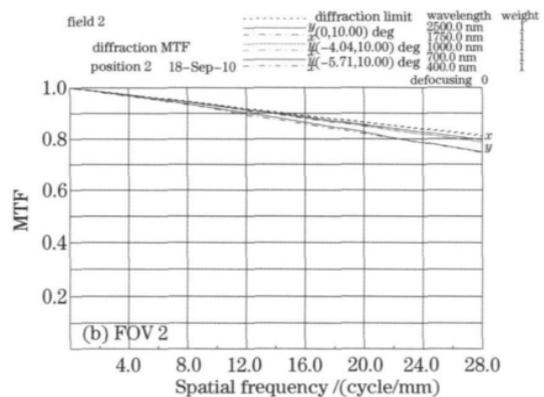
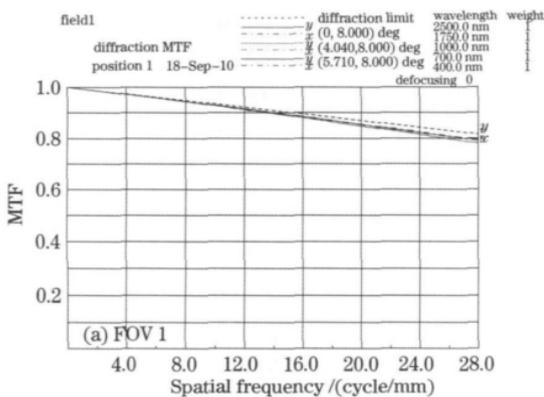


图 3 离轴三反消像散前置望远系统调制传递函数曲线

Fig. 3 MTF curves of TMA fore telescope system

4.2 光谱成像系统设计

Offner 光谱成像系统(如图 4 所示)是在反射式 Offner 中继光学系统^[12~14]的基础上发展起来的新型光谱成像系统,2 块球面反射镜分别作为主镜和

三镜,凸面光栅作为第二个面。在 Offner 中继光学系统的初始结构中,主镜和三镜具有相同的曲率半径和曲率中心,孔径光阑在次镜上,因此系统的入瞳和出瞳均位于无限远处,系统可以看作关于光阑对

称的系统,彗差和畸变因对称性而消除。当把第二个面换成光栅后,可以保证所有第三级像差为零,仅存在第五级像散^[15]。由于 Offner 光谱成像系统同心结构的优越特性,只要在光谱范围内校正像散,就可以获得良好的成像质量,适当调整主镜和三镜的旋转角度即可实现这一目标^[16]。与传统准直光束中使用光栅或棱镜的方法相比,Offner 光谱成像系统具有体积小、质量轻、谱线弯曲和色畸变小等优点。

因此,光谱成像系统采用 Offner 凸面光栅结构,入射狭缝尺寸为 $36\text{ mm} \times 18\text{ }\mu\text{m}$,物方数值孔径为 0.124。为了使狭缝像与探测器匹配,VNIR 波段光谱成像系统的变倍比为 1,SWIR 波段光谱成像系统的变倍比为 0.83。图 5 给出了 VNIR 和 SWIR 波段 Offner 光谱成像系统的设计结果。从图 5 可以看出,SWIR (16.7 lp/mm 处)和 VNIR (28 lp/mm 处)的

MTF 在特征频率处均大于 0.7,成像质量优良。谱线弯曲和色畸变极小,可以忽略。

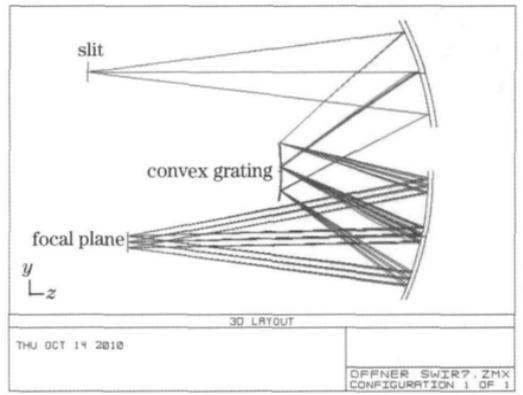


图 4 Offner 光谱成像系统光学结构图

Fig. 4 Optical path of Offner spectral imaging system

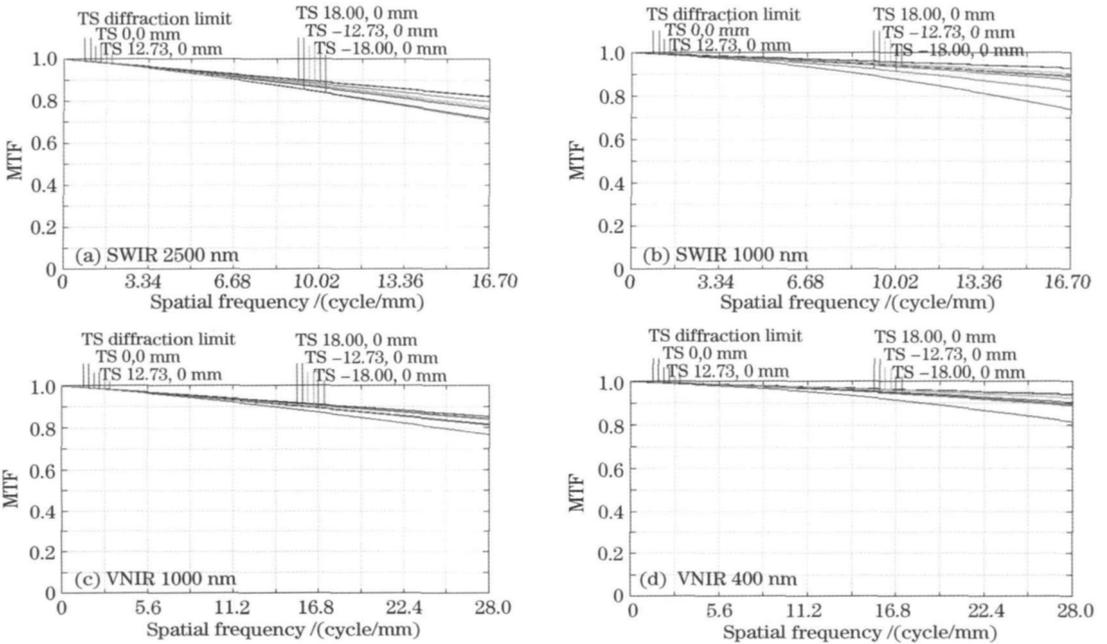


图 5 Offner 光谱成像系统不同谱段的调制传递函数

Fig. 5 MTF of Offner spectral imaging system in different spectral bands

4.3 成像光谱仪全系统设计

将指向镜、前置望远系统和光谱成像系统组合,并适当调整,得到大视场、高分辨力成像光谱仪的光学结构如图 6 所示。成像光谱仪全系统视场 1 不同谱段的 MTF 如图 7 所示,成像光谱仪全系统视场 2 不同谱段的调制传递函数 (MTF) 如图 8 所示。SWIR 波段的 MTF(16.7 lp/mm 处)和 VNIR 波段的 MTF(28 lp/mm 处)均达到 0.7 以上,设计结果远高于 MTF 大于 0.5 的设计指标要求。

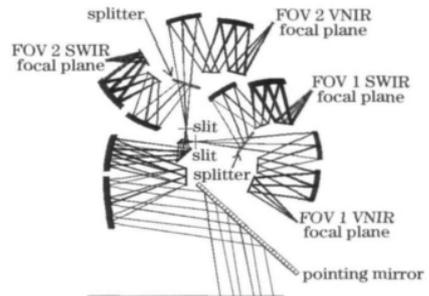


图 6 成像光谱仪全系统光学结构图

Fig. 6 Optical construction for image spectrometer system

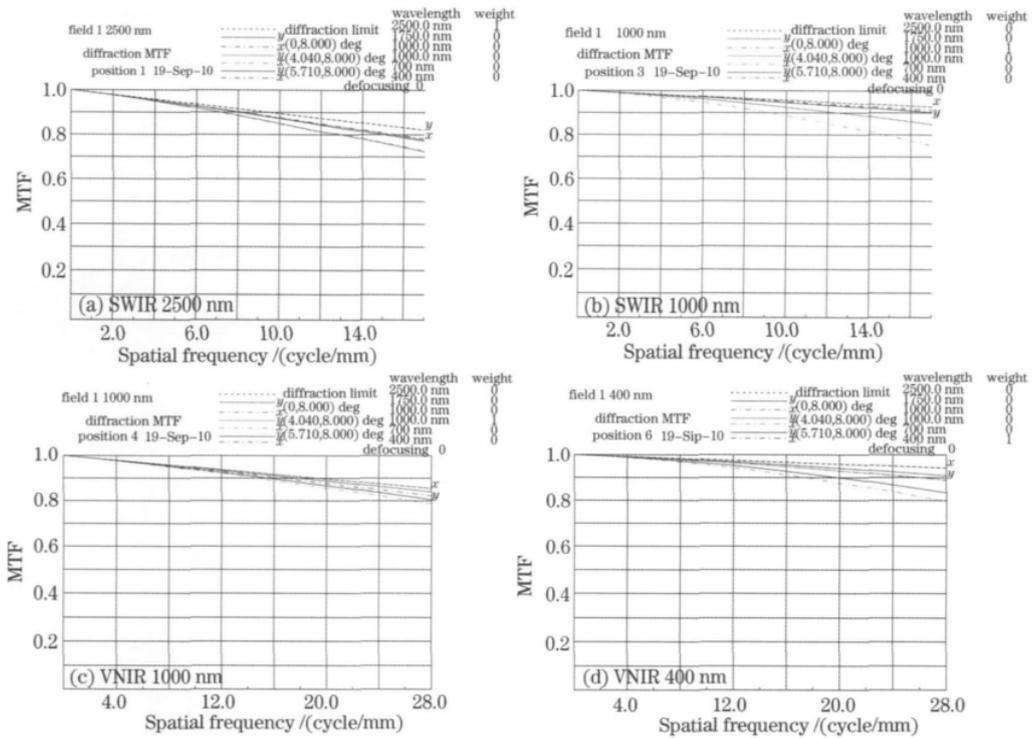


图 7 视场 1 不同谱段的调制传递函数

Fig. 7 MTFs of different spectral bands for FOV 1

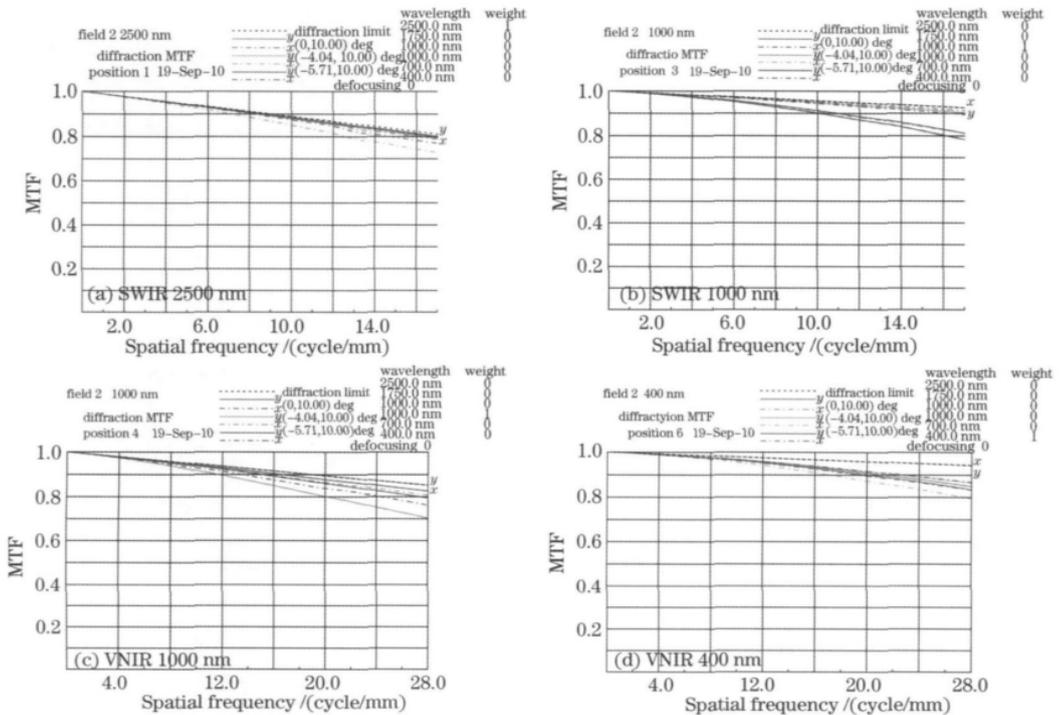


图 8 视场 2 不同谱段的调制传递函数

Fig. 8 MTFs of different spectral bands for FOV 2

5 结 论

大视场、高分辨力成像光谱仪已成为空间遥感的迫切需求。根据大视场、高分辨力成像光谱仪的要求,提出了先视场分离分光再用分色片分光的设计方法,并详细分析了视场分离分光的原理。利用这种设计方法设计了全视场 11.42° ,地面像元分辨力 30 m(VNIR) , 60 m(SWIR) ,光谱分辨力 5 nm(VNIR) , 10 nm(SWIR) ,工作波段为 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$,光谱通道为 270 的星载成像光谱仪光学系统。用光学设计软件 CODE V 行了优化设计,并对设计结果进行了分析,分析结果表明,各谱段的调制传递函数值均达到 0.7 以上,完全满足成像质量要求,并且结构紧凑,适于空间遥感应用。

参 考 文 献

- 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
- Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1516~1521
薛庆生,王淑荣,李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1516~1521
- Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. Limb imaging spectrometer for remote sensing of atmosphere[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 823~830
薛庆生,王淑荣,李福田等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(4): 823~830
- Si Fuqi, Xie Pinhua, Liu Yu *et al.*. Determination of plume by hyperspectral imaging differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2458~2462
司福祺,谢品华,刘宇等. 超光谱成像差分吸收光谱系统烟羽测量研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2458~2462
- Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yaohong *et al.*. Optical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3021~3026
常凌颖,赵葆常,邱跃洪等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 3021~3026
- Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2347~2354
郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(11): 2347~2354
- Pearlman Jay, Segal Carol, Lushalan Liao *et al.*. Development and operations of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 243~253
- Wilson Thomas, Curtiss Davis. Naval earthmap observer (NEMO) satellite[C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 1~11
- A. Cutter Mike, Hill South. Compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) design and performance [C]. *SPIE*, 2004, **5546**: 126~131
- Yan Changxiang, Xu Jie, Peng Yan. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(2): 289~293
颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(2): 289~293
- Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1754~1759
巩盾,田铁印,王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(8): 1754~1759
- A. Offner. Unit Power Imaging Catoptric Anastigmat[P]. U. S. Patent 3748015, 1973
- Chen Xin, Hong Yongfeng, Zhang Bao *et al.*. Design of compact Offner hyperspectral imaging system with Féry prism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1773~1780
程欣,洪永丰,张葆等. 插入 Féry 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(8): 1773~1780
- 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
- X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce *et al.*. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9156~9168
- Tong Yajun, Wu Gang, Zhou Quan *et al.*. Design method of Offner-type imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1148~1152
佟亚军,吴刚,周全等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1148~1152