

doi: 10.3788/gzxb20164507.0722004

紧凑型图像复分光谱成像系统光学设计及优化

马培培^{1,2}, 刘扬扬¹, 吕群波¹, 裴琳琳¹, 方煜¹

(1 中国科学院光电研究院 中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:从图像复分光谱成像系统的图谱输出理论模型出发,对已有 16 波段系统进行改进,研究了大相对孔径和结构紧凑型系统.模拟实现了 16 波段成像的整体设计与优化,对棱镜分光易造成图谱图像区域混叠问题进行了分析.采用光谱成像系统匹配结构形式,利用 Zemax-EE 的多重结构特性,设计了视场为 $\pm 1.25^\circ$,相对孔径达到 1:3,系统结构尺寸约为 220 mm 的图像复分光谱成像仪系统,且各个波长光学传递函数值均大于 0.75.与已有等同空间分辨率的 16 波段图像复分光谱成像系统比较,所设计系统结构紧凑、衍射极限和通光能力明显改善、光谱质量大幅提高,可满足小型化需求.该研究为新型快照式光谱成像技术的理论研究和图像复分光谱成像仪的光学系统设计提供了依据.

关键词:多光谱成像;图像复分光谱成像仪;光学设计;Wollaston 棱镜;快照式

中图分类号:O433.1;TH741

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)07-0722004-6

Optical System Design and Optimization of Compact Image Replicating Imaging Spectrometer

MA Pei-pe^{1,2}, LIU Yang-yang¹, LÜ Qun-bo¹, PEI Lin-lin¹, FANG Yu¹

(1 Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

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

Abstract: From the output atlas theoretical model of the image replicating imaging system, to improve the existing 16-band system and focused on the design of large relative-aperture and compact system, the design and optimization of 16-band spectral imaging system were performed with Zemax-EE software. This work focused on the analysis of the problem of the image aliasing resulted from the birefringence of the prisms. By matching the spectral imaging system and using the Zemax multi-configuration, the imaging quality of the system was simulated. The viewing field angle is $\pm 1.25^\circ$, the relative-aperture is 1:3 and the size of the system is about 220 mm (z). The modulation transfer function of every viewing field of every wavelength is more than 0.75 under the Complementary Metal Oxide Semiconductors (CMOS) Nyquist frequency situation. Compared with the existing equivalent spatial resolution of 16-band image replicating imaging spectrometer, this design is more compact which meets the requirement of miniaturization. The diffraction limit and light quantity are improved, so the imaging quality is significantly improved. The research provides a new design basis for the theoretical study of new type of snapshot imaging technology and for the design of the image replicating imaging spectrometer.

Key words: Multispectral imaging; Image replicating imaging spectrometer; Optical design; Wollaston prism; Snapshots

OCIS Codes: 220.3620; 300.6190; 300.6550; 260.1440

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61405203, 61405204)和国家杰出青年科学基金(No. 61225024)资助

第一作者:马培培(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计. Email: mapeipei111@126.com.

导师(通讯作者):刘扬扬(1976-),女,研究员,博士,主要研究方向为计算光学和光谱成像技术. Email: liuyangyang@aoe.ac.cn

收稿日期:2016-01-15;录用日期:2016-03-16

0 引言

光谱成像仪能够同时获得探测目标的二维空间信息和一维光谱信息,构建目标的三维数据立方体^[1].典型光谱成像方法有波长、空间、时间扫描和快照(Snapshot)4种,前3种扫描方式的光谱成像仪采用滤光片、棱镜、光栅色散,或者迈克尔逊干涉仪的 Fourier 变换,通过扫描获取完整数据立方体.而快照式光谱成像仪则采用了特殊分光器件将一束入射光分解成多个谱段,然后成像在像面上不同位置.一次曝光即能直接或通过计算得到三维数据库,没有扫描方式中带来的误差^[2].成像无需扫描运动补偿,没有运动部件,是一种具有高稳定性的实时遥感技术.图像复分光谱成像仪(Image Replicating Imaging Spectrometer, IRIS)是一种基于 Wollaston 棱镜分光的光谱成像仪,采用了新型快照式光谱成像技术,一次曝光就能同时获得目标的空间信息和光谱信息,成像速度非常快^[3].相比其他快照式光谱成像仪,IRIS 结构没有入射狭缝,光通量高;没有运动部件,不需要扫描成像,稳定度高;不需要后续反演算法,能够对动态目标实时光谱测量;加工工艺相对简单,由此容易控制仪器的体积、重量、功耗等,满足各种小型设计要求. IRIS 在空间活动目标遥感成像和医疗生物等领域有着非常广泛的应用前景.

Heriot-Watt 大学的 Andrew Harvey 教授等在 2003 年提出 8 波段 IRIS 系统理论,并完成了原理设计和实验验证,可将其应用于人眼视网膜的病理检测中^[4]. Andrew Harvey 教授的学生 Alistair S. Gorman 通过光线追迹得到了典型的 8 波段和 16 波段图像复分光谱成像系统的仿真模型^[5].针对国内实用化的需求,本实验室开展了 IRIS 光谱成像技术研究.在一定光谱范围、空间分辨率、视场角和相对孔径等参数基础上,完成了 16 波段 IRIS 系统光学设计,并对系统进行了优化.

光谱成像系统的光学设计直接影响整个光谱成像系统的性能和体积^[6],要实现多光谱成像系统的高质量成像需要集光能力强,即需要光学结构的相对孔径大^[7-8];光学结构的小型化和轻量化也是设计成像系统时重要的参考标准.本文在一个已有 16 波段 IRIS 光学系统的基础上,以大相对孔径和结构紧凑为改进目标,运用光学设计软件 Zemax-EE 进行了 16 波段成像的整体设计和优化.在采用相同的探测器参数和视场角的前提下,与本实验室目前已有的等同空间分辨率 16 波段的 IRIS 光学设计(相对孔径为 1:5,系统结构尺寸约为 290 mm(z))相比,本文所设计系统结构尺寸(z)减少了 24%,相对孔径由 1:5 增大为 1:3,光通量增大,像质更佳.

1 光学系统原理

IRIS 系统 16 波段成像原理如图 1,光学系统主要包括物镜、准直镜、分光结构、成像镜和滤波片阵列五个部分.在成像过程中,物镜将无限远地目标成像在像面上,光线经准直镜准直后,平行入射到分光结构.在分光结构中,光束被分光为 2^n (n 表示 Wollaston 棱镜的个数)束,最后 2^n 束光经成像镜成像.由于光束间存在光程差,每束光经成像镜成像后的像面位置不同,因此探测器前需要放置一个滤波片阵列补偿光程差并滤波.使得 2^n 个光束成像在同一个平面即探测器上,成像准确且波段纯净.利用 Zemax-EE 完成物镜、准直镜、分光结构和成像镜的单独设计优化.然后对系统整体进行优化,即调整像面位置以优化像质.暂不涉及滤波片阵列的设计.光学设计时,不仅要清楚知道每个部分的参数要求,还要考虑各部分间的衔接问题^[9].

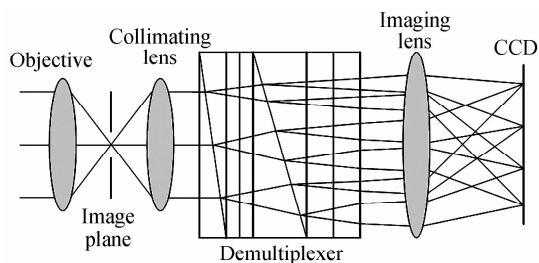


图 1 IRIS 系统原理

Fig. 1 Layout of IRIS system

IRIS 的核心部分为基于双折射棱镜和偏振片等元器件形成光束分离器,平行光束经过光束分离器后在一帧探测器靶面内可以生成光谱波段独立、小幅同景、阵列式区域组合的图像.在光束分离部件中,主要分光元件是复分棱镜,复分棱镜的典型例子是 Wollaston 棱镜,其具有起偏和分束特性^[10-11].对于复分棱镜分光光谱成像技术来说,不仅需考虑复分棱镜材料的双折射率、色散率,还需考虑棱镜的角度设计.这些因素直接影响复分图像成像的大小,关系到复分图像彼此之间是否能够整齐有序、无重叠地排列在探测器上,以及色散对不同光谱波段图像的光谱辐射度的影响等.

冰洲石作为双折射晶体,常用于可见光波段部分,其双折射和偏振现象明显,并且具有很低的色散能力^[12].选择冰洲石作为双折射晶体材料设计 Wollaston 棱镜,其 16 波段的分光结构的原理图如图 2.分光结构包含平行设置的起偏器、4 个波片以及 4 个 Wollaston 棱镜,其中穿插设置的 4 个波片以及 4 个 Wollaston 棱镜组成 4 个光束分离器,当光束射入分光结构后,被分束为 2^4 即 16 束光.分光结构可以让一束平行光随光波长不同分别折射成不同角度输出到探测器上,通过多次双折射方法实现光谱和图像同时快照式一次成像.

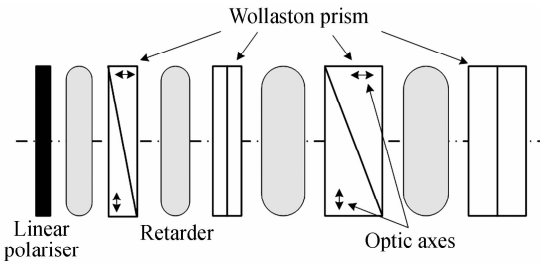


图2 基于 Wollaston 棱镜的分光结构原理

Fig.2 The demultiplexer based on Wollaston prisms

2 光学系统参数

系统设计中采用的成像探测器主要技术指标见表

1. 根据探测器参数,考虑系统分辨率以及信噪比要求,光学系统主要技术参数见表2.

表1 探测器参数

Table 1 Parameters of CCD

Item	Value
Effective pixel number/pixel	4032(H)×2688(V)
Pixel size / μm	9×9
Target size / mm	36(H)×24(V)

表2 光学系统主要参数

Table 2 Parameters of IRIS

Item	Value
Spectrum range/nm	450~850
Bands	16
FOV/(°)	±1.25
Relative-aperture	1:3
Spatial resolution/mrad	0.2

本文设计的光谱成像仪可以对目标场景进行多光谱成像探测. 根据空间分辨率的要求,多光谱成像仪全系统的焦距 f'_s 为

$$f'_s = \frac{pH}{R_{\text{GSD}}} = \frac{p}{R_{\text{GSD}}/H} = \frac{p}{R_{\text{SD}}} = 45 \text{ mm} \quad (1)$$

式中, H 为飞行轨道高度, R_{GSD} 为地面像元分辨率, R_{SD} 为空间分辨率, p 为探测器像元尺寸. f'_1 为物镜焦距, f'_2 为准直镜的焦距, f'_3 为成像镜的焦距. 光谱成像系统的变倍比取 1:1, 关系为

$$f'_1 = f'_2 = f'_3 = 45 \text{ mm} \quad (2)$$

计算单个像元的大小对应的 Nyquist 频率如式

(3). 一般在优化过程中应保证在 Nyquist 频率 56lp/mm 处, 传递函数值大于 0.5 [13].

$$\frac{1}{2p} = 55.6 \text{ lp/mm} \quad (3)$$

3 光学系统设计

3.1 物镜和准直镜设计

成像物镜对地面目标成像,设计谱段范围为可见光到近红外光. 物镜焦距为 $f'_1 = 45 \text{ mm}$, 相对孔径 $D/f = 1:3$. 相对孔径选取需考虑目标能量收集问题,既要满足一定的信噪比要求,又要兼顾设计加工的可行性[14]. 为与光谱成像系统实现光瞳匹配,要求物镜像方远心. 普通光学元件产生的色差由它们本身的材料决定,进行优化设计时,通过更换材料等方法进行优化,从而控制色差、球差等指标[15].

准直镜与物镜的结构和材料等参数完全对称,这样的优点是:1)使用对称结构有助于系统自动校正彗差、畸变和垂轴色差,优化系统像质[16-17];2)简化了设计难度,减少设计工作量;3)加工时只要将同样的镜片加工两套,降低了成本. 但是对称后,轴上色差、球差等会加倍以至于成像点的均方根直径大于探测器像元尺寸[18],所以在它们对称的基础上还要添加评价函数进行整体优化.

3.2 基于 Wollaston 棱镜的分光结构设计

在分光结构的设计中,确定每个棱镜的厚度和楔角大小之后,还要设定多重结构参数,包括模式参数阵列、波长参数等. Zemax-EE 不能同时追迹两束及以上光线,设计中通过设置 16 个多重结构来同时追迹 16 束不同波段的光: mode=0 追迹寻常光, mode=1 追迹非寻常光,为 16 个多重结构设置了一个 8×16 的 mode 值阵列;因为一束光垂直进入分光结构后,经过 4 次双折射,出射光为 16 束光,所以还需要分别设置 16 个多重结构的波长值.

3.3 成像镜设计

为满足光谱成像系统光瞳匹配要求,需要准直镜出瞳与成像镜的入瞳的大小、位置匹配. 采用设计方法是:准直镜的出瞳位置作为成像镜的入瞳位置,两者大小也相等. 物镜和准直镜的结构完全对称,物镜入瞳(距物镜的第一个面 1 mm)对称后得到准直镜的出瞳(距准直镜最后一个面 1 mm). 完成分光结构设计后,将其与成像镜的初始结构一起添加到光学设计软件中,将准直镜的出瞳作为它们的入瞳. 基于 Wollaston 棱镜的分光结构的出射光即成像镜的入射光与 Z 轴存在一定夹角,所以为保证有效视场内的成像质量,选择成像镜初始结构时其视场角不能为零[19]. 然后优化成像镜设计:设置视场角 $\pm 1.25^\circ$, 添加评价函数优化成像镜设计.

3.4 优化设计的结果

完整系统设计完成后,需进行滤光片镜组设计,通

过补偿光程差使像质最优. IRIS 系统的光学设计如图 3.

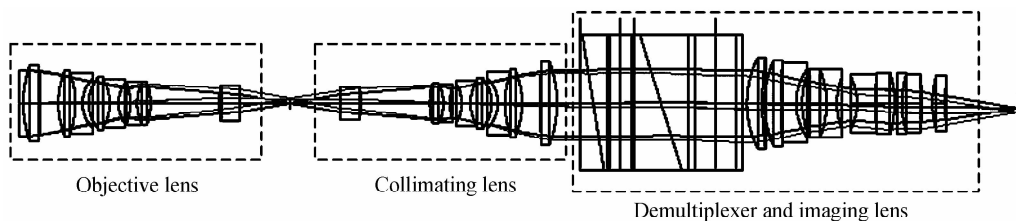


图 3 IRIS 系统的光学设计
Fig. 3 Layout of IRIS system

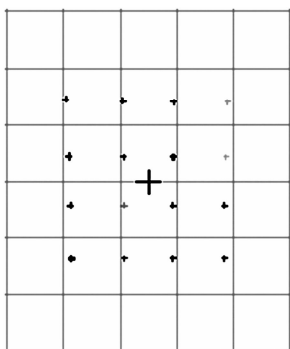


图 4 系统 16 波段成像
Fig. 4 The 16 images in the image surface

表 3 16 个子图像对应的波长

Table 3 Wavelength of each image			
Wavelength/nm			
462.5	487.5	512.5	537.5
562.5	587.5	612.5	637.5
662.5	687.5	712.5	737.5
762.5	787.5	812.5	837.5

图 4 是 IRIS 成像阵列,复分图像彼此之间有序、整齐地排列在探测器上. 每个子图像所对应的波长值

见表 3. 准确实现了 16 波段成像,成像清晰,无成像重叠或成像模糊现象.

3.5 像质分析与评价

评价该光学系统的成像质量主要考虑点列图、调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值两个指标. 由于系统采用 Wollaston 棱镜进行分光,将整幅图像在空间上分为 16 个准单色区域,因此必须要求各准单色光在所占据的视场范围内校正像差才能满足成像质量要求.

为分析各单色光的成像质量,进行了 16 个光谱的成像质量分析. 选取 462.5、587.5、712.5 和 837.5 nm 四个光谱波段进行各视场的点列图和 MTF 值分析. 图 5 为像平面上的点列图,图中的圆表示光学系统的艾里斑大小. 各个视场光线所成像点的 RMS 半径均小于 $4.5 \mu\text{m}$ (探测器像元尺寸 $9 \mu\text{m}$),从而保证系统具有良好成像质量. 图 6 为优化设计得到的 IRIS 系统的 MTF 曲线,在焦平面等效像元尺寸对应的 Nyquist 频率 56lp/mm 处,各视场的 MTF 值均大于 0.75,其成像质量接近衍射极限.

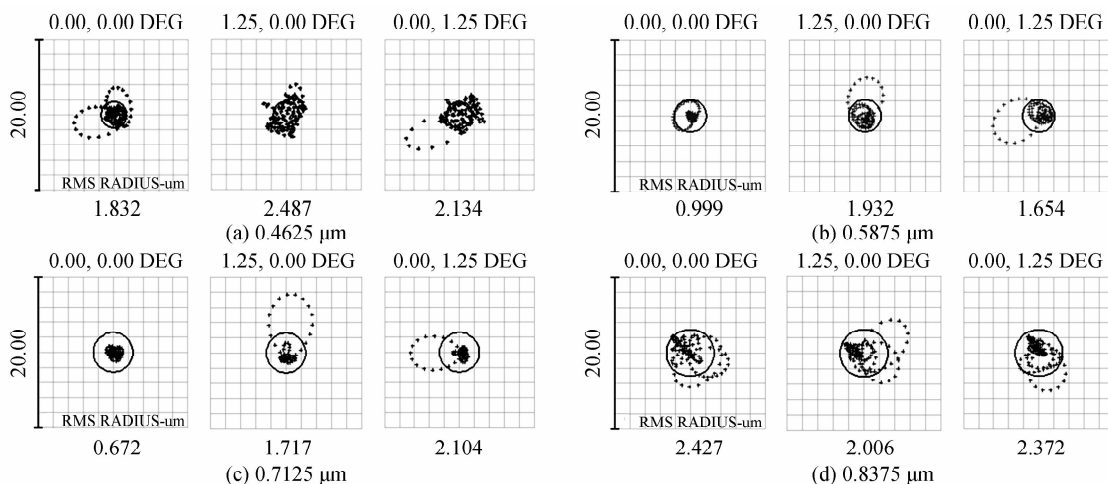


图 5 像平面上的点列
Fig. 5 Spot diagram of the image surface

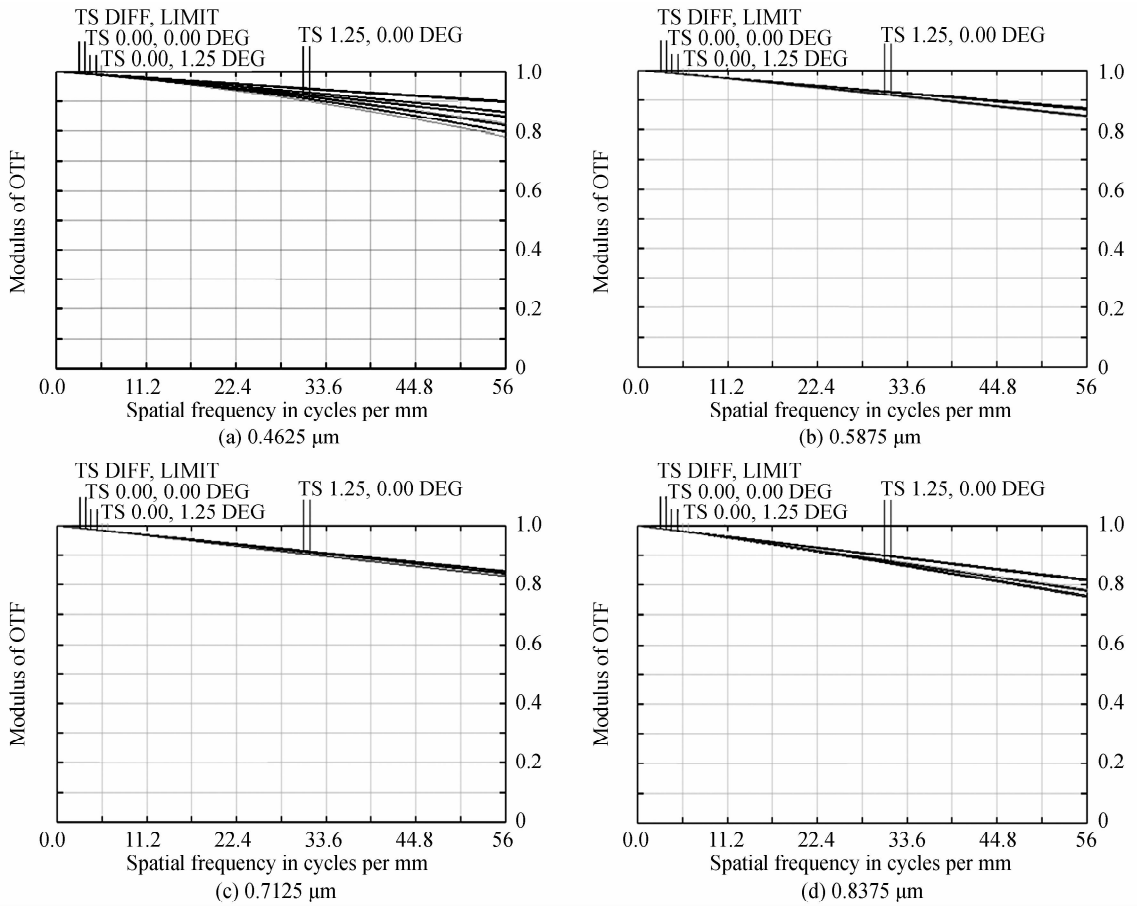


图6 IRIS系统MTF曲线
Fig.6 MTF curves of IRIS

4 结论

根据自行研制的IRIS系统的技术指标参数,分析了设计原理.运用光学设计软件Zemax-EE进行了16波段成像的整体设计和优化,包括物镜、准直镜、分光结构及成像镜的设计,优化得到一个紧凑型IRIS系统,并给出像质评价.相比其他快照式光谱成像仪,该IRIS器件的优势在于:没有入射狭缝和运动部件;在面阵探测器一帧成像,不同光谱的二维空间信息成阵列组合成像在探测器上;无需后续反演算法,在探测灵活变化目标方面具有很大的优势;仪器的体积、重量、功耗等容易控制,满足小型设计需求.相对于目前已有的等同空间分辨率16波段的IRIS光学设计而言,该系统结构紧凑,有利于设备小型化;相对孔径较大,使得集光能力增强;各波段的MTF值较高,表明成像质量优异.本研究作为新型快照式光谱成像技术的理论研究和图像复分光谱成像仪的光学系统设计提供了依据.

参考文献

[1] HAGEN N, KUDENOV M W. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(9): 090901-090901.
[2] WANG Xin-quan. The technical study of static

spectropolarimetric imager[D]. Xi'an: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2011.

王新全. 静态光谱偏振成像仪技术研究[D]. 西安:中国科学院, 2011.

[3] PEI L L, MIN H, LV Q B, *et al.* Optical system design of the snapshot imaging spectrometer using image replication based on Wollaston prism[C]. SPIE, 2015: 94440Y-94440Y-6.
[4] HARVEY A R, FLETCHER-HOLMES D W, KUDESIA S S, *et al.* Imaging spectrometry at visible and infrared wavelengths using image replication[C]. SPIE, 2004: 190-198.
[5] GORMAN A S. Snapshot spectral imaging using image replication and birefringent interferometry: principles and applications[D]. Heriot-Watt University, 2011.
[6] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, YU Xiang-yang. Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(10).
薛庆生, 王淑荣, 于向阳. 大相对孔径宽波段Dyson光谱成像系统[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(10).
[7] CHEN Wei, ZHENG Yu-quan, XUE Qing-sheng. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(1): 15-21.
陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(1): 15-21.
[8] GONG Guang-biao, JI Yi-qun, ZHU Shan-bing, *et al.* Design of a fore-optical objective with large relative aperture for spectral imagers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009,

38(5): 889-892.

宫广彪, 季铁群, 朱善兵, 等. 一种大相对孔径成像光谱仪前置物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 889-892.

- [9] YUAN Li-yin, HE Zhi-ping, SHU Rong, *et al.* Optical design of a SWIR PGP imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 831-834.
袁立银, 何志平, 舒嵘, 等. 短波红外棱镜-光栅-棱镜成像光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 831-834.
- [10] LIN Yu-ling, ZHOU Feng, WANG Huai-yi, *et al.* Spatially modulated interference imaging spectrometer based on Wollaston prism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1798-1802.
林栩凌, 周峰, 王怀义, 等. 采用 Wollaston 棱镜的空间调制干涉成像光谱仪[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1798-1802.
- [11] WU Hai-ying, ZHANG Chun-min, ZHAO Bao-chang. Principle analysis of viewing field expansion of imaging spectrometer based on combined Wollaston prism[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009(2): 930-935.
吴海英, 张淳民, 赵葆常. 基于组合 Wollaston 棱镜成像光谱仪的视场扩大原理分析[J]. 物理学报, 2009(2): 930-935.
- [12] SONG Li-he, HONG Guang. Technology of Iceland spar polarized light prism manufacture and its performance test[J]. *Optical Technique*, 1994(1):15-19.
宋利鹤, 洪光. 冰洲石偏振光棱镜的性能测试及制造工艺[J]. 光学技术, 1994(1):15-19.
- [13] LI Yong-shuai, WANG Zhi-bin, CHEN You-hua, *et al.* Optical design of large FOV imaging system for AOTF imaging spectrometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015(1):41-45.
李永帅, 王志斌, 陈友华, 等. 大视场声光可调谐滤波器成像光谱仪光学设计[J]. 应用光学, 2015(1):41-45.
- [14] FANG Yu. Optical design of imaging spectrometer and research on the assessment of image quality[D]. Xi'an: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2013.
方煜. 成像光谱仪光学系统设计与像质评价研究[D]. 西安: 中国科学院, 2013.
- [15] YU Lin-yao, XIE Jing-jiang, WEI Qun, *et al.* Super compact optical system design based on single lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015(4): 321-327.
虞林瑶, 谢京江, 魏群, 等. 超紧凑型单片成像光学系统设计[J]. 光学学报, 2015(4): 321-327.
- [16] MENG Qing-yu, DONG Ji-hong, QU Hong-feng, *et al.* System design with wide spectral band, large field of view for deep space exploration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0122001.
孟庆宇, 董吉洪, 曲洪丰, 等. 用于深空探测的宽波段大视场小型光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, 44(1):0122001.
- [17] PEI Lin-lin, LV Qun-bo, WANG Jian-wei, *et al.* Optical system design of coded aperture spectral imager[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 210702-210702.
裴琳琳, 吕群波, 王建威, 等. 编码孔径成像光谱仪光学系统设计[J]. 物理学报, 2014, 63(21): 210702-210702.
- [18] WANG Hu, MIAO Xing-hua, WEN De-sheng, *et al.* Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1822-1824.
王虎, 苗兴华, 汶德胜, 等. 宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计[J]. 光子学报, 2005, 34(12):1822-1824.
- [19] WANG Wei, SHEN Zhi-xue. Optical system design of LCTF-based airborne high spectral resolution camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7):711003.
汪伟, 沈志学. LCTF 机载高光谱相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, 44(7):711003.