

文章编号: 1004-4213(2011)05-0673-6

星载大视场短波红外成像光谱仪光学设计

薛庆生, 林冠宇, 宋克非

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 根据大视场短波红外成像光谱仪的要求, 考虑到市售探测器的限制, 提出了视场分离的方法, 分析了视场分离方法的原理, 利用此方法设计了一个星载大视场短波红外成像光谱仪光学系统, 该系统由 11.42 远心离轴三反消像散前置望远系统和 2 个 Offner 凸面光栅光谱成像系统组成, 运用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 对成像光谱仪光学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, 光学系统在各个波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。

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: TH744.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114005.0673

0 引言

成像光谱仪能够同时获取观测目标的空间几何和光谱信息, 具有独特的信息获取和特征识别能力, 它作为一种重要的空间对地观测手段, 在陆地、大气和海洋观测中正在得到越来越广泛的应用^[1-3]。短波红外 (Short-Wave Infrared, SWIR) 成像光谱仪在国民经济、科学研究等诸多领域具有广泛的应用前景^[4]。目前国际上具有代表性的短波红外成像光谱仪有美国 TRW 公司研制的 Hyperion^[5], 视场 0.624, 刈幅宽度 7.5 km; 美国海军 NEMO 卫星的主载荷 COIS^[6], 视场 2.5, 刈幅宽度 30 km; 英国 Sira 公司研制的 CHRIS^[7], 视场角 0.553, 刈幅宽度 13 km。国内上海技术物理研究所的王欣等设计的短波外成像光谱仪视场 1.4^[8], 这些短波红外成像光谱仪的地面像元分辨力一般为几十米, 光谱分辨力为几十纳米, 缺点是视场角较小, 刈幅宽度小。随着空间遥感应用的不断深入, 对短波红外成像光谱仪的要求也越来越高, 在满足高分辨力的条件下, 还要求具有大视场角。因为视场越大则刈幅宽度越大, 仪器的回访周期就越小。因此星载大视场短波红外成像光谱仪成为空间遥感的迫切需求, 而现有的小视场短波红外成像光谱仪不能满足要求。

短波红外成像光谱仪光学系统由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

成像系统对入射狭缝进行色散, 按波长不同成像在探测器的不同位置上。与入射狭缝长度方向平行的一维为空间维, 与狭缝宽度方向平行的一维为光谱维, 再经随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。

本文根据星载大视场短波红外成像光谱仪的应用要求和技术指标, 考虑到市售短波红外焦平面探测器产品的限制, 提出了视场分离的方法, 详细分析了视场分离分光的原理, 运用该方法设计了星载大视场短波红外成像光谱仪光学系统, 并利用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 对设计结果进行了分析与评价。

1 主要技术指标

短波红外成像光谱仪预计将来工作轨道高度 $H = 600$ km 的卫星平台上, 要求刈幅宽度 $GW = 120$ km, 地面像元分辨力 $GSD = 60$ m, 光谱分辨力 10 nm。由于受市售短波红外焦平面探测器产品的限制, 可选择的余地非常有限, 在 1.0~2.5 μ m 波段, 可用的 HgCdTe 焦平面探测器像元尺寸为 $p = 30$ μ m, 像元数为 1000 (空间维) 256 (光谱维)。根据仪器轨道高度和刈幅宽度的要求, 确定仪器的视场角为

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2009AA12Z151) 资助

作者简介: 薛庆生 (1979-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为光学设计和成像光谱技术。Email: qshxue2006@163.com

收稿日期: 2010-11-17; 修回日期: 2010-12-21

$$2 = \arctan \left[\frac{GW}{2H} \right] = 11.42 \quad (1)$$

短波红外成像光谱仪全系统的焦距 f 为

$$f = \frac{H-p}{GSD} = 300 \text{ mm} \quad (2)$$

成像光谱仪的光谱成像系统的放大倍率取 1:1, 则望远系统的焦距 f_t 为 300 mm. 综合考虑成像质量和信噪比要求, 取入瞳直径为 75 mm, 仪器的相对孔径为 1:4. 根据光谱分辨力为 10 nm 的要求, 确定光谱通道数为 150 个. 短波红外成像光谱仪光学系统的主要技术指标总结如表 1.

表 1 短波红外成像光谱仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of SWIR imaging spectrometer optical system

Spectral range/ μm	1.0~2.5
Field of view (FOV) / °	11.42
Focal length of telescope/mm	300
Focal length of system/mm	300
Entrance diameter/mm	75
Detector array size/pixel	1000 256
Detector pixel size / μm	30 30

2 前置望远系统设计

2.1 视场分离分光原理

从技术指标可以看出, 这是一个星载大视场短波红外成像光谱仪光学系统, 在满足地面像元分辨力的前提下, 要求探测器在空间维上的尺寸为 60 mm, 但由于市售短波红外焦平面探测器的限制, 探测器在空间维上的尺寸为 30 mm, 不够大. 因此为同时满足高分辨力和大视场的要求, 本文提出了视场分离分光方法, 原理如图 1, 将全视场 11.42 分成 0~5.71 和 -5.71~0 两个视场, 分别定义为视场 1 (Field of view, FOV1) 和视场 2 (Field of view, FOV2). 视场 1 和视场 2 使用各自独立的狭缝, 在前置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光束的位置, 使其边缘不挡住视场 2 的入射光束, 又能完全反射视场 1 的

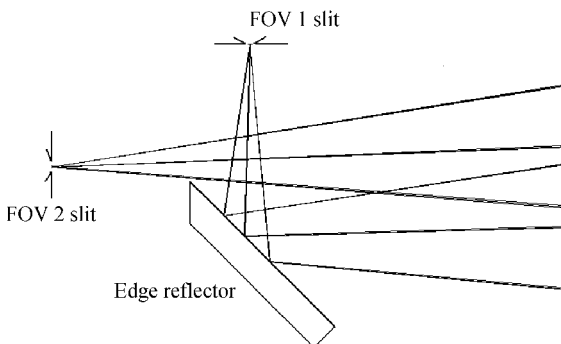


图 1 视场分离结构

Fig. 1 Principle of split field of view

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, 减小仪器体积. 视场分离的方法, 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.

2.2 前置望远系统光学设计

短波红外成像光谱仪的前置望远系统视场大, 分辨力要求高, 因此前置望远系统采用离轴三反消像散 (Off-axis Three-mirror Anastigmatic, TMA)^[9] 结构, 离轴三反系统是近些年发展起来的新型光学系统, 由三块非球面反射镜组成, 具有无中心遮拦、分辨力高、体积小、平像场等优点. 为了与光谱成像系统实现光瞳匹配, 要求前置望远系统像方远心. 离轴三反系统根据离轴方式不同分为光阑离轴和视场离轴两种类型. 光阑离轴的 TMA 系统, 孔径光阑在主镜上, 一般有中间像面, 光学系统很不对称, 所以视场角不能做太大. 视场离轴的三反系统, 孔径光阑放在次镜上, 使光学系统比较对称, 可以设计成很大的视场角, 成像质量好, 并且容易实现像方远心. 因此根据短波红外成像光谱仪的前置望远系统的特点, 选择视场离轴的三反系统作为其结构型式.

离轴三反系统是在同轴三反系统求得初始结构参量的基础上进行离轴、优化得到的. 因此首先由共轴三反系统求解系统的初始结构参量. 全反射系统无色差, 主要有四种初级像差: 球差、彗差、像散、场曲. 利用三反系统的 8 个变量 (三个曲率半径 r_1, r_2, r_3 , 三个二次非球面系数 k_1, k_2, k_3 , 两个间隔 d_1, d_2) 可对上述像差进行校正. 根据高斯光学理论, 可得到系统结构参量的有关公式^[10]

$$r_1 = \frac{2}{1} f_t \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{2}{2 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{1} \right)} f_t \quad (4)$$

$$r_3 = \frac{2}{1 + \frac{1}{2}} f_t \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{1}{1} \frac{1}{2} f_t \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{2} \right) f_t \quad (7)$$

式中, r_1, r_2, r_3 分别为主镜、次镜和三镜的曲率半径, $\frac{1}{1}, \frac{1}{2}$ 分别为主镜对次镜、次镜对三镜的遮拦比, $\frac{1}{1}, \frac{1}{2}$ 分别为次镜和三镜的放大率, f_t 为前置望远系统的焦距.

求出初始结构参量后, 将孔径光阑置于次镜上, 选取适当的离轴量, 避免中心遮拦, FOV1 离轴 8°, FOV2 离轴 10°, 二者在像面上错开约 10 mm 的距

离, 在焦面附件加了一个刀口反射镜实现视场分离. 利用 CODE V 软件的多重结构 (Zoom) 优化功能, 在初始结构基础上进行了优化设计, 优化后的光学结构参量如表 2, 形成如图 2 的离轴三反前置望远系统, 次镜为孔径光阑, 无中间像, 主镜为六次非球面, 次镜和三镜均为二次曲面, 系统总长约为系统焦距的 1/2. 图 3 为前置望远系统的焦面附近的立体图. 图 4 为前置望远系统的调制传递函数

表 2 离轴三反前置望远系统光学结构参量

Table 2 Parameters of the fore TMA telescope system

Surface	1	2	3	Image plane
Radius/mm	- 551.868	- 187.996	- 278.098	Infinity
Thickness/mm	- 152.2	152.2	186.964	
Glass	Mirror	Mirror	Mirror	
k	- 1.649 61	- 0.433 14	0.153 64	
6 th order	- 1.845 65	e^{-15}		

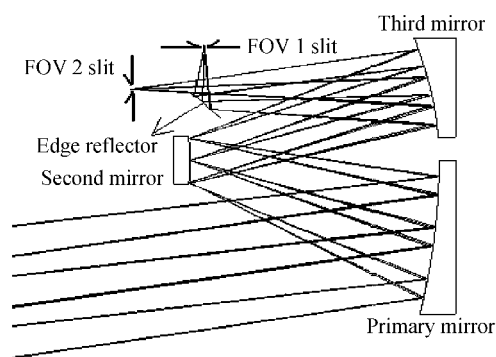


图 2 离轴三反前置望远系统光学结构
Fig. 2 Optical path of the fore TMA telescope

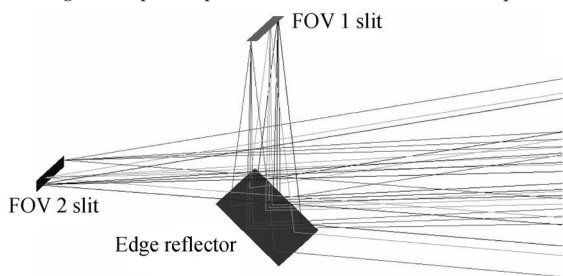
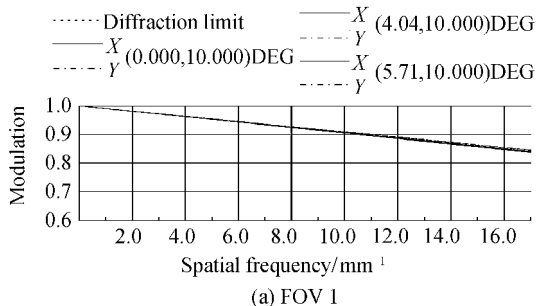
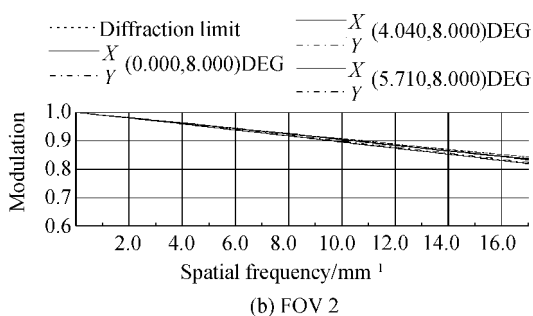


图 3 前置望远系统的焦面附近的立体图
Fig. 3 Three-dimensional picture of focal plane neighborhood of the fore telescope



(a) FOV 1



(b) FOV 2

图 4 离轴三反前置望远系统调整传递函数
Fig. 4 MTF of the fore TMA telescope

(Modulation Transfer Function, MTF), 各视场在特征频率 16.7 lp/mm 处大于 0.8, 成像质量接近衍射极限.

3 光谱成像系统设计

Offner 光谱成像系统 (如图 5) 是在反射式 Offner 中继光学系统^[11-12]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 (M₁) 和三镜 (M₃), 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, 系统可以看作关于光阑对称的系统, 彗差和畸变因对称性消除. 当把第二个面换成光栅后, 尽管在一定程度上破坏了系统的对称性, 但可以适当调整主镜和三镜的旋转角度来获得良好的成像质量. 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.

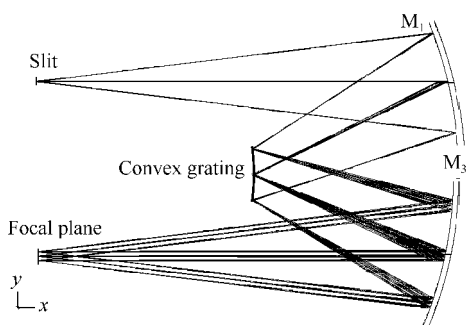
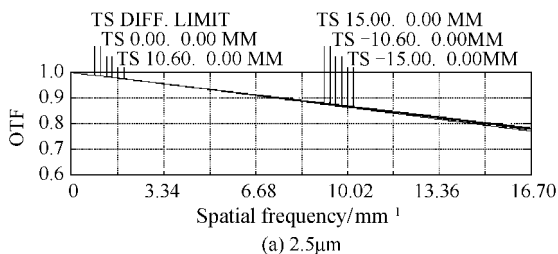


图 5 Offner 光谱成像系统光学结构
Fig. 5 Optical path of Offner spectral imaging system

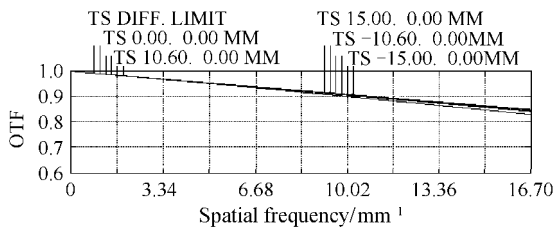
因此, 光谱成像系统采用 Offner 凸面光栅结构, 入射狭缝尺寸为 30 mm × 30 mm, 物方数值孔径为 0.124. 为了使狭缝像与探测器匹配, 光谱成像系统的放大率取为 1:1, 利用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 进行了优化设计, 表 3 为 Offner 光谱成像系统的光学结构参量. 图 6 为 Offner 光谱成像系统不同波长的调制传递函数 (MTF). 从图 6 可以看出, 不同波长的调制传递函数 (MTF) 在奈奎斯特空

表 3 Offner 光谱成像系统光学结构参量
Table 3 Parameters of Offner spectral imaging system

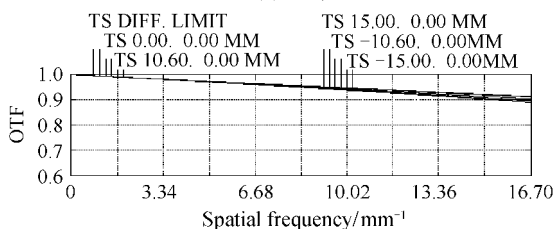
Surface	Object	1	2	3	Image plane
Radius/mm	Infinity	-197.82	-99.18	-195.74	Infinity
Thickness/mm	200	-97.3	95.2	-196.06	
Glass		Mirror	Mirror	Mirror	
Decenter X/mm	0	0	0	0	0
Decenter Y/mm	40	40	0	-34.5	-35.1



(a) 2.5μm



(b) 1.75μm



(c) 1.0μm

图 6 Offner 光谱成像系统不同波长的调制传递函数
Fig.6 MTF of different wavelengths for Offner spectral imaging system

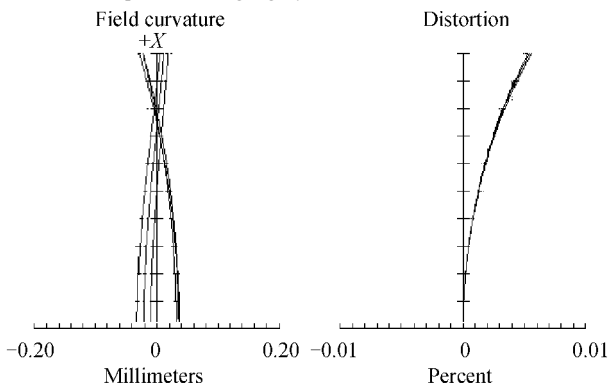


图 7 Offner 光谱成像系统的场曲和畸变

Fig.7 Field curvature and distortion of Offner spectral imaging system

大于 0.75, 成像质量优良. 图 7 为场曲和畸变曲线, 可以看出, 畸变小于 0.01%, 可以忽略.

4 短波红外成像光谱仪全系统设计

将离轴三反前置望远系统与 Offner 光谱成像系统组合, 并适当调整, 得到星载大视场短波红外成像光谱仪全系统的光学结构如图 8. 短波红外成像光谱仪全系统视场 1(FOV 1) 不同波长的调制传递函数(MTF) 如图 9. 短波红外成像光谱仪全系统视场 2 不同波长的调制传递函数(MTF) 如图 10. 可以

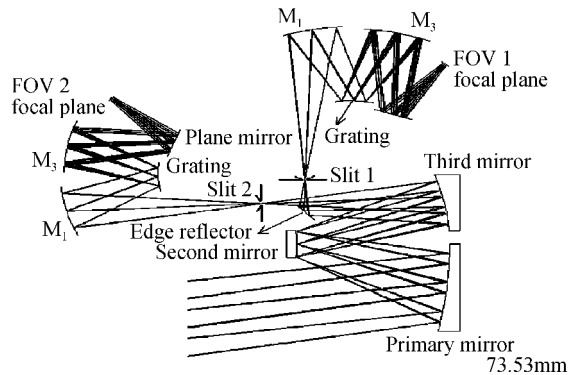
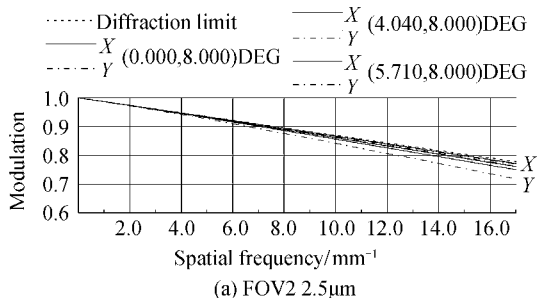
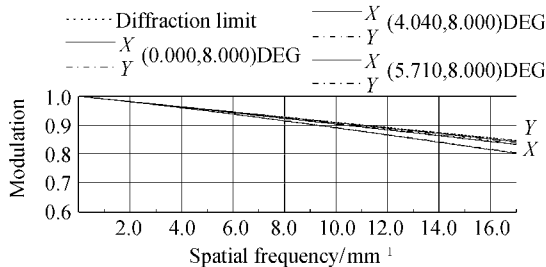


图 8 短波红外成像光谱仪全系统光学结构

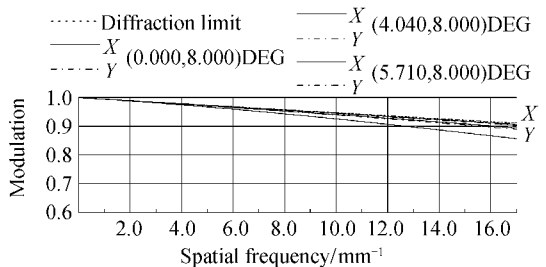
Fig.8 Optical path of SWIR imaging spectrometer



(a) FOV2 2.5μm



(b) FOV2 1.75μm



(c) FOV2 1.0μm

图 9 视场 1 不同波长的调制传递函数

Fig.9 MTF of different wavelengths for FOV 1

间频率 16.7 lp/mm (对应 30 μm 探测器像元) 处均

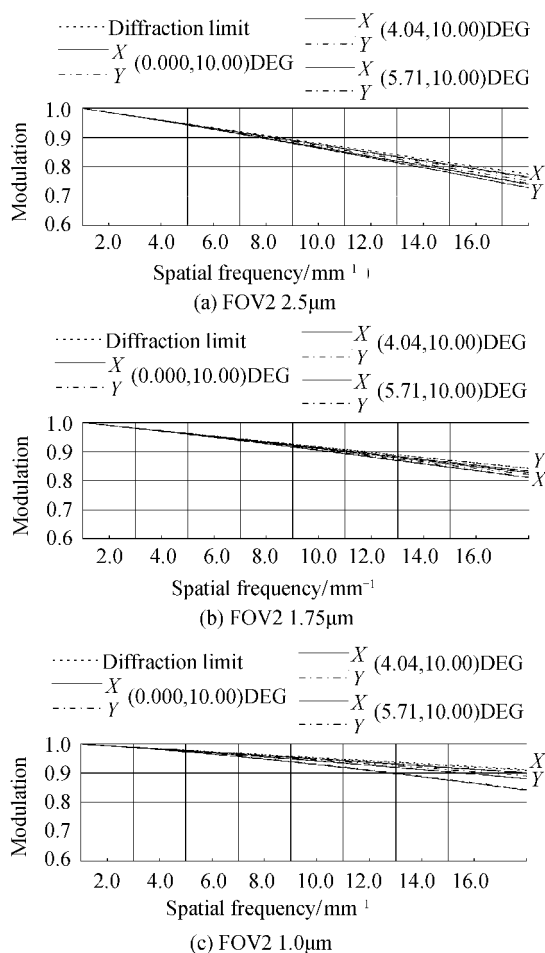


图 10 视场 2 不同波长的调制传递函数

Fig. 10 MTF of different wavelengths for FOV 2

看出, 各视场不同波长的调制传递函数(MTF)在奈奎斯特空间频率 16.7 lp/mm 处(对应 30 m 探测器像元)均大于 0.7, 远高于 MTF 0.5 的设计指标要求。

5 结论

星载大视场短波红外成像光谱仪已成为空间遥感的迫切需求, 本文根据大视场短波红外成像光谱仪的要求, 考虑到市售短波红外焦平面探测器的限制, 提出了视场分离方法, 并详细分析了视场分离方法的原理. 利用这种设计方法设计了全视场 11.42°, 地面像元分辨率 60 m, 光谱分辨率 10 nm, 工作波段为 1.0~2.5 μm, 光谱通道为 150 的星载大视场短波红外成像光谱仪光学系统, 用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 进行了优化设计, 并对设计结果进行了分析, 分析结果表明, 不同波长的调制传递函数(MTF)均达到 0.7 以上, 完全满足成像质量要求, 并且结构紧凑, 适合空间遥感应用。

参考文献

- [1] ZHAO Bao-chang, YANG Jian-feng, XUE Bin, et al. Calibration of Chang E-1 satellite Interference imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 769-775.
赵葆常, 杨建峰, 薛彬. 嫦娥一号干涉成像光谱仪的定标[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 769-775.
- [2] LI Xiang-juan, YANG Jian-feng, XU E Bin. Destriping HIM images with modified linear interpolation algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 164-168.
李湘眷, 杨建峰, 薛彬. 改进的插值法用于干涉成像光谱仪影像条带噪声去除[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 164-168.
- [3] XU E Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fei-tian, et al. Limb imaging spectrometer for remote sensing of atmosphere[J]. *Opt Precision Eng*, 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.
- [4] BAI Qing-lan. Apochromatized design of teleobjective in Short wave infrared band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 115-119.
白清兰. 复消色差短波红外望远物镜设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 115-119.
- [5] PEARLMAN J, SEGAL C, LUSHALAN L, et al. Development and operations of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 243-253.
- [6] DAVIS C. Application of hyperspectral imaging in the coastal ocean[C]. *SPIE*, 2002, **4816**: 33-41.
- [7] CUTTER M A, HILL S. Compact high resolution imaging spectrometer (CHRIS) design and performance [C]. *SPIE*, 2004, **5546**: 126-131.
- [8] WANG Xin, YANG Bo, DING Xue-zhuan, et al. The optical design of shortwave infrared imaging spectrometer in space. [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(12): 115-119.
王欣, 杨波, 丁学专, 等. 空间遥感短波红外成像光谱仪的光学设计[J]. *红外技术*, 2009, **31**(12): 687-693.
- [9] GONG Dun, TIAN Tie-yin, WANG Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients[J]. *Opt Precision Eng*, 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.
- [10] YANG Xing-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang, et al. Computer-aided alignment of off-axis three mirror system by using Zernike coefficients[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 573-575.
杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 基于二元光学红外成像光谱仪离轴系统设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 1754-1759.
- [11] PRIETO B X, MONTERO O C, COUCE B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20): 9156-9168.
- [12] CHEN Xin, HONG Yong-feng, ZHANG Bao, et al. Design of compact Offner hyperspectral imaging system with F ry prism [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, **18**(8): 1773-1780.
程欣, 洪永丰, 张葆, 等. 插入 F ry 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.

Optical Design of Spaceborne Shortwave Infrared Imaging Spectrometer with Wide Field of View

XUE Qing-sheng, LIN Guang-yu, SONG Ke-fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 13033, China)

Abstract: Based on the requirements of shortwave infrared imaging spectrometer with wide field of view, considering the restrictive off-the-shelf detectors, a split field of view (FOV) method was developed. The principle of split field of view was analyzed. A spaceborne shortwave infrared imaging spectrometer with wide field of view was designed using the method. The imaging spectrometer are composed of a 11.42 telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope and two offner convex grating spectral imaging system. Ray tracing, optimization and analyzing were performed by CODE V and ZEMAX software. The analyzed results demonstrate that the modulation transfer function for different spectral band is more than 0.7 which satisfies the pre-designed requirement.

Key words: Optical design; Imaging spectrometer; Off-axis three-mirror anastigmatic; Convex grating; Offner spectral imaging system