

文章编号:1004-4213(2011)06-0831-4

短波红外棱镜-光栅-棱镜成像光谱仪光学系统设计

袁立银,何志平,舒嵘,王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:提出了一种基于棱镜-光栅-棱镜分光器件的短波红外成像光谱仪光学系统,该系统由离轴三反射式望远物镜、准直镜、棱镜-光栅-棱镜和会聚镜组成,光谱覆盖 950~2 500 nm,空间视场达到 22.5°。在实现宽视场、宽波段设计的同时,优化设计了棱镜-光栅-棱镜分光器件的各个参量。通过偏斜会聚镜光轴和棱镜-光栅-棱镜光轴在光谱维的角度,可以良好地校正色畸变 keystone 和谱线弯曲 smile,将二者控制在 5 μm 以下,使得成像光谱仪获取的光谱信息更为准确。

关键词:光学设计;成像光谱仪;离轴三反射镜;棱镜-光栅-棱镜器件

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114006.0831

0 引言

1991 年,Aikio 首次提出了一种直视型棱镜-光栅-棱镜 (Prism-Grating-Prism, PGP) 成像光谱仪^[1],后来迅速发展应用到工业探测和科学研究中。1993 年,在 AISA 中便利用了这种光谱仪器^[2]。国内,上海技术物理研究所首先在航空高光谱成像仪以及显微光谱系统^[3]中应用了这种分光技术;之后苏州大学也有一些该方面的研究,但其是基于直视型窄光谱波段的研究。直视型系统中仍有可观的 keystone 和 smile 存在^[4],尤其在宽视场宽波段光谱成像系统中更为明显。本文基于 PGP 这种分光器件,设计了一个宽视场、宽波段、良好校正光谱弯曲的短波红外成像光谱仪光学系统。

1 设计思想

该推帚式成像光谱仪由望远物镜、狭缝、准直镜、色散器件 (PGP)、会聚镜和面阵探测器组成。望远物镜采用长线性视场的离轴三反射镜系统。

1.1 主要技术指标

系统的主要空间技术指标和光谱技术指标如表 1。

1.2 系统工作原理

来自条带形地表目标的辐射进入仪器的望远物镜中,成像在置于望远物镜焦面上的狭缝处,通过狭缝的连续光谱辐射,经由准直镜准直后,经 PGP 色

散器件色散,再由会聚镜会聚于面阵探测器上。此时,面阵探测器中的一维完成空间成像,称之为空间维,而另一维完成光谱成像,称之为光谱维,再经由平台的向前 (y 方向) 运动而完成大范围的推帚成像,如图 1。

表 1 主要技术指标

Table 1 Primary specifications

Specification	Design
Wave range	950~2500 nm
Focal length	40 mm
Field of view	22.5°
F Number	3.4
Slit size	15 mm×30 μm
FPA pixel size	30 μm
Spectral channels	240
Spectral sampling	6.46 nm

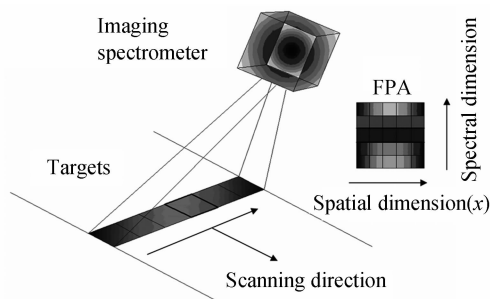


图 1 推帚式成像光谱仪原理图

Fig. 1 Sketch of pushbroom imaging spectrometer

1.3 分光原理

PGP 分光器件是由两个棱镜中间粘结一个体

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2009CB724000)资助

第一作者:袁立银(1981-),女,副研究员,博士,主要研究方向为航空航天遥感仪器的光学系统设计与应用技术。

Email:yuanliyintongji@163.com

通讯作者:舒嵘(1971-),男,研究员,主要研究方向为光电遥感。Email:shurong@mail.sitp.ac.cn

收稿日期:2010-10-22;修回日期:2011-02-21

相位全息透射光栅而制成,在棱镜和光栅之间贴有前截止和后截止滤光片以限制光谱波段范围,具有体积小、效率高及成本低的特点.在主光轴不偏转的情况下,满足布拉格条件,此时衍射效率最高.基于一个由光栅、会聚光学和探测器组成的简单模块,可以用公式来表示光栅刻线数^[5]

$$\nu(f) = \left[\sqrt{\left(\frac{\lambda_L}{Q}\right)^2 - \frac{2W\lambda_L\lambda_c}{Q^2} + \left(\frac{W\lambda_L}{QQ}\right)^2 + \lambda_c^2} \right]^{-1}$$

$$\text{式中, } Q = \frac{aH_\lambda}{2f\sqrt{1+\frac{aH_\lambda}{2f}}}, W = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{aH_\lambda}{2f}}}.$$

其中, f 为聚焦光学的焦距, λ_L 为工作谱段上限, λ_c 为中心波长, H_λ 为探测器光谱维高度, a 为探测器光谱维使用系数.

2 设计过程及结果

2.1 望远物镜的设计

物镜的设计遵循仪器轻小紧凑、与光谱仪光瞳匹配的原则,设计为 TMA 望远物镜形式,并且设计成准像方远心结构,如图 2. 主镜和三镜设计成二次非球面,次镜为凸球面.设计过程中,除考虑结构排布是否相干扰外,绩优函数中只需要设置像质约束来优化即可.设计结果列于表 2 中.

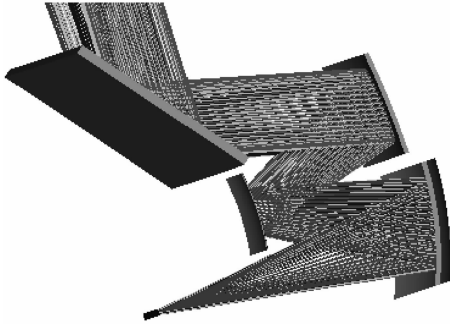


图 2 TMA 望远镜光路

Fig. 2 TMA telescope raytrace

表 2 望远镜指标

Table 2 Specification of the designed telescope

Specification	Design
Focal length	40mm
Field of view	22.5°
F Number	3.0
RMS radius	<3 μm
Slit size	15 mm × 30 μm
Curvature of slit image	0.23°

由于光谱仪用的是离轴视场,为了避免结构件相互干扰,望远镜选用了较大的离轴视场,由于对应狭缝像弯曲随着视场的增大而加大,某一条带的地

表区域通过 TMA 望远镜所成的像在像方已经不是一条直线,而是弯曲的.这可以通过简易图象处理技术可以消除这一影响.

设计中需要注意的是:为了能与后面光谱仪在光瞳位置和 F 数上都能完好匹配,因此在望远物镜的设计中, F 数设计的要比光谱仪系统的 F 数稍大.成像光谱仪的 F 数为 3.4,望远物镜的 F 数设计为 3 左右,避免对接光谱仪后产生渐晕而损失能量.由于 F 数稍微减小,因此,在设计中对像质的影响并不大.

图 3 为望远镜的点列图.由图形可知,全视场内物镜的 RMS 半径在 3 μm 以内,远小于探测器的像元 30 μm.

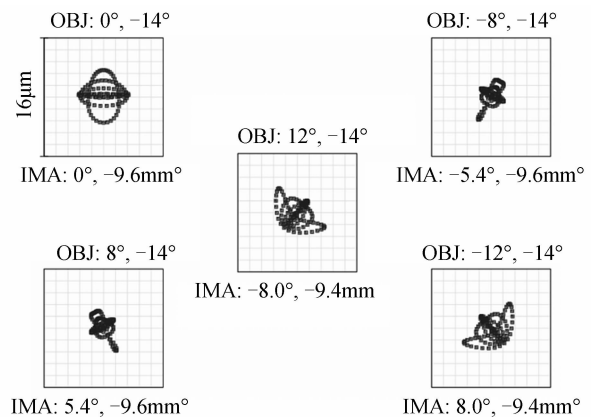


图 3 望远镜点列图

Fig. 3 Telescope spot diagrams

2.2 光谱仪设计

光谱仪设计中,分别设计出准直镜和会聚镜,计算并优化出 PGP 分光器件的光栅刻线数,将三者对接组成光谱仪的初始结构,编辑 keystone 和 smile 约束操作数进行光谱仪的优化.将光谱仪的会聚镜偏斜以校正光谱仪残余的 keystone 和 smile.光谱仪参量列于表 3 中.

表 3 光谱仪技术指标

Table 3 Specifications of the designed spectrometer

Specification	Design
Wave range	950~2 500 nm
Magnification	1 : 1
Object NA	0.167
Field of view	15 mm (slit length)
Spectral sampling	6.46 nm

图 4 是光谱仪的点列图,该图虽不能完善评价反映成像光谱仪的性能,却是对其残余像差平衡优化的反映^[6].图 4 中,CONFIG 1, $\lambda = 0.95 \mu\text{m}$; CONFIG 2, $\lambda = 1.75 \mu\text{m}$; CONFIG 3, $\lambda = 2.50 \mu\text{m}$.图 5 为光谱仪残余 keystone 和 smile.

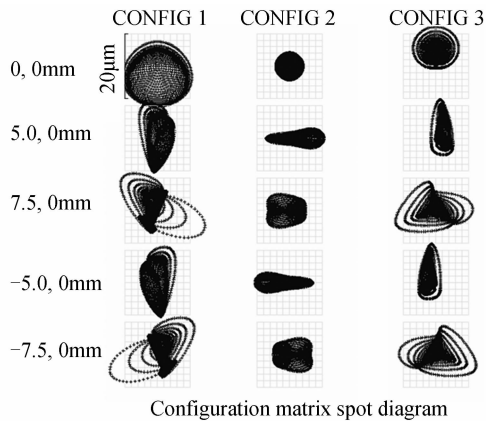


图 4 光谱仪点列图

Fig. 4 Spot diagrams of the designed spectrometer

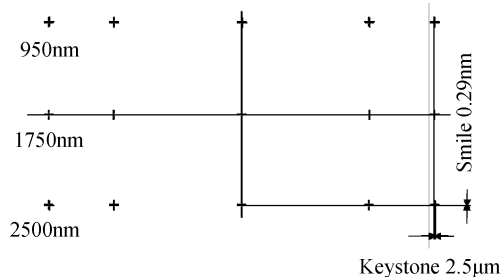


图 5 光谱仪光谱弯曲和谱线弯曲

Fig. 5 Keystone and smile of the spectra

分光器件几何参量还有衍射特性的设计,取决于成像光谱仪光学系统. PGP 中的体相位透射光栅的衍射级次为-1 级,根据波段数和光谱采样率以及会聚镜的焦距等参量,确定光栅和棱镜的参量,见表 4.

表 4 PGP 指标

Table 4 PGP specifications

Specification	Design
Diffraction order	-1
Clear aperture	$\phi 26$
Prism material	IR silica
Prism1 wedge	6.603°
Prism2 wedge	1.317°
Grating material	IR silica

2.3 光学系统集成

光学系统的望远物镜和 PGP 光谱仪根据不同的绩优函数操作分别独立设计,然后进行光学系统集成. 光谱仪设计中,既要考虑到成像质量,也要考虑色畸变 keystone 和光谱弯曲 smile;而望远物镜中只需要考虑成像质量. 连接两者的是,光瞳需要实现准匹配,即望远物镜的出瞳要与光谱仪的入瞳准匹配. 系统集成之后,系统光阑可以在望远物镜的次镜上,也可以在 PGP 分光器件的光栅前表面上. 系统集成过程中,系统像质良好,不再进行系统优化. 系统集成之后的光路如图 6. 系统的点列图如图 7.

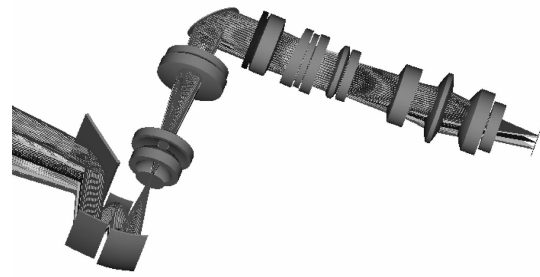


图 6 光学系统光路

Fig. 6 Beam path of the optical system

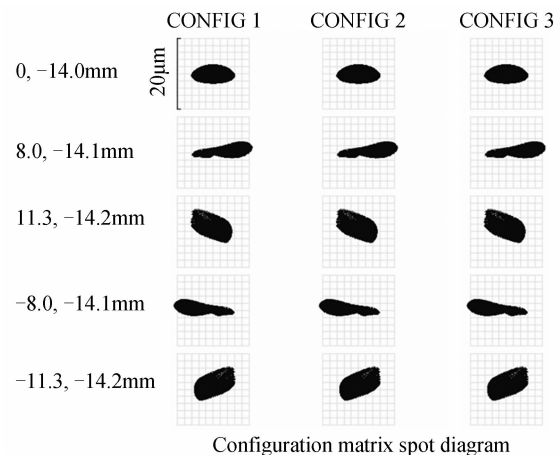


图 7 光学系统点列图

Fig. 7 Spot diagrams of the optical system

图 7 中, CONFIG 1, $\lambda = 0.95 \mu\text{m}$; CONFIG 2, $\lambda = 1.75 \mu\text{m}$; CONFIG 3, $\lambda = 2.50 \mu\text{m}$.

PGP 分光器件-1 级衍射级次的光谱工作范围覆盖 950 nm 至 2 500 nm. 利用干涉显影技术实现体相位透射光栅.

3 结论

设计了一种由离轴三反射式望远物镜、准直镜、PGP 分光器件和会聚镜组成的成像光谱仪光学系统. 离轴三反射式望远物镜可以实现宽视场空间成像,提高系统的光学效率,并且三反系统中只有主镜和三镜为二次非球面,次镜为球面,尺寸小,易于加工. PGP 分光器件可以实现宽光谱分光,衍射效率较高. 光谱仪设计中,通过偏斜会聚镜光轴和 PGP 光轴在光谱维的角度,能有效降低分光系统的光谱弯曲 keystone 和 smile,设计值可以控制在 $5 \mu\text{m}$ 以下,解决了已有的直视型 PGP 成像光谱仪在该方面的缺陷. 该类系统应用在航空遥感领域具有一定优势.

参考文献

- [1] AIKIO M. Optinen komponentti (An optical component): Finland, 921564[P]. 1992.
- [2] KAI M, MARKO M, MARKKU R. Airborne imaging spectrometer for application (AISA)[C]. Tokyo: Geoscience and remote sensing symposium, 1993, 2: 479-481.

- [3] XIAO Gong-hai, SHU Rong, XUE Yong-qi. Design of microscopic hyperspectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(4): 367-372.
肖功海, 舒嵘, 薛永祺. 显微高光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(4): 367-372.
- [4] ZHU Shan-bing, JI Yi-qun, GONG Guang-biao, *et al.* Optical design of prism-grating-prism imaging spectrometers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 2270-2273.
朱善兵, 季佚群, 宫广彪, 等. 棱镜-光栅-棱镜光谱成像系统的_{光学设计}[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 2270-2273.
- [5] AIKIO M. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph[D]. Finland: VTT Electronics, 2001: 43-44.
- [6] MOUROULIS P, SELLAR G R, WILSON D W, *et al.* Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(6): 3001-3009.

Optical Design of a SWIR PGP Imaging Spectrometer

YUAN Li-yin, HE Zhi-ping, SHU Rong, WANG Jian-yu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: An optical system for short wave infrared imaging spectrometer was proposed based on prism-grating-prism (PGP) component. The system is composed by off-axis TMA, collimator, PGP and re-imaging lens, and its response covers the range 950 to 2 500 nm with a 22.5° field of view. The system is able to achieve wide field and broadband. By optimizing the PGP parameters and tilting the re-imaging lens along the spectral dimension, keystone and smile became slight and were even less than 5 micrometer. Thus the obtained spectral data were more exact.

Key words: Optical design; Imaging spectrometer; Off-axis three-mirror system; Prism-Grating-Prism (PGP) component