

机载大视场高光谱成像系统设计

董 伟^{1,2} 周锦松¹ 聂云峰¹ 黄 旻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 为适应机载高光谱成像系统的发展需要,设计了一种机载大视场高光谱成像系统。前置望远系统为大视场宽谱段透射式系统,高光谱成像仪为基于 Offner 次镜的改正型 Féry 棱镜中继系统。系统设计过程中两次使用 Zemax 多重组态设计;尝试将 Offner 次镜的改正型 Féry 棱镜设计为高光谱成像仪;将 Féry 棱镜高光谱成像仪集成为高光谱成像系统进行一体化系统分析。该设计在结构和设计方法上均有改进。设计的大视场可见近红外高光谱成像系统视场可达 28°,机载载荷高度为 5 km 时,全系统的刈幅宽度为 2.493 km,地面分辨率可达 0.6 m。左半视场和右半视场全谱段调制传递函数均大于 0.6,最大谱线弯曲和谐带弯曲不到 0.2 pixel,成像质量接近衍射极限。

关键词 成像系统;大视场;高光谱成像仪;Féry 棱镜;多重组态

中图分类号 TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0511007

Optical Design of Airborne Hyperspectral Imaging System with Wide Field of View

Dong Wei^{1,2} Zhou Jinsong¹ Nie Yunfeng¹ Huang Min¹

(¹ Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to meet the development needs of airborne hyperspectral imaging system, an airborne hyperspectral imaging system with wide field of view is presented. In the system, the pre-telescope system is a transmission system with wide field and wide-spectrum, and the hyperspectral imager is an improved Féry-prism relay system based on Offner secondary. Zemax multi-configuration is used twice in the system design process, and we attempt to design the improved Féry-prism of Offner secondary as a hyperspectral imager for the first time. Besides, the Féry-prism hyperspectral imager is firstly integrated as hyperspectral imaging system for system analysis. The design is innovative both on the structure and methods. The design results show that the field of view of the system is 28°, when the height of the airborne payload is 5 km, Swath width with the total system is 2.493 km, and the ground sampled distance is 0.6 m. The full spectral modulation transfer functions of field half right and field half left are greater than 0.6. Keystones and smiles about maxium are close to 0.2 pixel, and the image quality closes to the diffraction limit.

Key words imaging systems; wide field of view; hyperspectral imager; Féry prism; multi-configuration

OCIS codes 110.4234; 230.5480; 300.6550

1 引言

Féry 棱镜提出于 20 世纪初期,20 世纪 90 年代

开始应用于光谱成像技术领域。Féry^[1]棱镜是把传统棱镜的两个平面加工为球面,能够获得“纯净的光

收稿日期: 2013-11-26; 收到修改稿日期: 2013-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(61225024)

作者简介: 董 伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事光谱成像技术和光学设计方面的研究。

E-mail: dongwei@aoe.ac.cn

导师简介: 周锦松(1977—),男,博士,研究员,主要从事新型光谱成像技术和仪器等方面的研究。

E-mail: jszhou@aoe.ac.cn

谱”,并通过理论研究表明 Féry 棱镜可以直接放置
在非平行光路中,从而避免准直镜和成像镜的使用,
降低谱带弯曲和谱线弯曲。近年来,Féry 棱镜光谱
成像仪在机载和星载光谱成像技术中获得迅猛发
展。Warren 等^[2]研制出了美国机载光谱成像仪
BASS 和 SEBASS;Cutter 等^[3]将 Féry 棱镜引入
Offner 中继成像结构的两臂,获得一种紧凑型高分
辨率光谱成像仪 CHRIS;此外,德国宇航中心的
EnMAP^[4]和韩国的 COMIS^[5]均是 Féry 棱镜在
Offner 中继成像结构中的应用。国内方面,中国科
学院光电研究院研制了基于 Féry 棱镜和 Offner 光
学系统的航空高光谱相机^[6-7];中国科学院长春光
学精密机械与物理研究所设计把 Féry 棱镜插入
Offner 同心系统和 Dyson 同心光学系统的光谱成
像仪^[8-10]结构。

视场影响机载光谱成像系统的遥感作业效率。
光谱成像系统前置镜的视场受光学设计方面的限
制,获得大的刈幅宽度目前采用较多的方法是多台
独立光谱成像系统的视场拼接^[11]。这种拼接方
案造成全系统的体积过大,不能满足光谱成像系
统小型化、轻量化的发展需求。

本文提出一种大视场的设计方案,使单个前置
镜和两个光谱成像仪的视场内拼接,采用透射式
系统作为前置镜和基于 Offner 次镜的改正型 Féry
棱镜中继系统作为光谱成像仪。与目前常用的视
场外拼接相比,该结构紧凑、轻量化、简单化。在
系统设计过程中,使用 Zemax 软件分别设计前置
镜和光谱成像仪,然后使用 Zemax 多重组态结构
仿真大视场高光谱成像系统,最后对仿真结果进
行分析。

2 主要技术指标

大视场可见近红外高光谱成像系统的光谱范
围为 $0.45\sim 1\ \mu\text{m}$,飞行高度为 $H=5\ \text{km}$,地面像
元分辨率为 $G_{\text{SD}}=0.6\ \text{m}$,视场角为 $2\omega=28^\circ$,高
光谱成像仪

的放大率为 $1:1$,探测器像元尺寸 M 为 $12\ \mu\text{m}\times$
 $12\ \mu\text{m}$ 的 CCD 面阵探测器。

刈幅宽度表示为

$$G_w = 2 \times H \tan(\omega), \quad (1)$$

系统焦距表示为

$$f' = \frac{H}{G_{\text{SD}}} \times M, \quad (2)$$

瞬时视场角表示为

$$I_{\text{FOV}} = \arctan\left(\frac{M}{2f'}\right), \quad (3)$$

总狭缝长度表示为

$$d = 2 \times f' \times \tan(\omega). \quad (4)$$

根据给出的参数可得刈幅宽度、系统焦距、瞬
时视场角、总狭缝长度分别为 $2.493\ \text{km}$, $0.1\ \text{m}$,
 0.0068° , $49.86\ \text{mm}$ 。

3 前置望远系统

3.1 分光拼接原理

视场拼接^[12]分为视场外拼接,即物方拼接;
和视场内拼接,即像方拼接。根据以上分析,光
谱成像系统的视场大刈幅宽,同时受探测器的
尺寸限制,宜采用视场内拼接,狭缝设置于前
置镜像面处,机载载荷高度为 $5\ \text{km}$,前置镜
对应地面 $2.493\ \text{km}$ 的刈幅宽度,对应 $49.86\ \text{mm}$
的狭缝长度。高光谱成像仪的狭缝长度均为
 $25.2\ \text{mm}$,狭缝处视场重叠 $0.408\ \text{mm}$,地
面重叠 $0.0204\ \text{km}$ 。

前置镜视场角为 28° ,线视场平均分配为左
半视场和右半视场,如图 1 所示。左半视场在
离轴方向上离轴 0.5° ,刈幅方向 $-0.117^\circ\sim$
 14° 的左半视场入射到反射镜 1,然后进入高
光谱成像仪 1,色散接近 $1\ \text{mm}$;右半视场在
离轴方向上离轴 -0.5° ,刈幅方向 $0.117^\circ\sim$
 -14° 的右半视场入射到反射镜 2,然后进
入高光谱成像仪 2,色散接近 $1\ \text{mm}$ 。

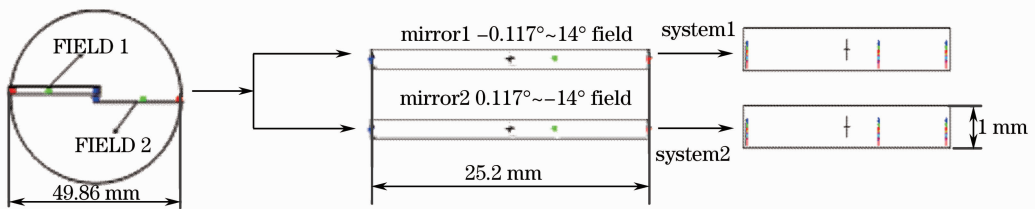


图 1 机载大视场高光谱成像系统成像分析

Fig. 1 Imaging analysis of airborne hyperspectral imaging system with wide field of view

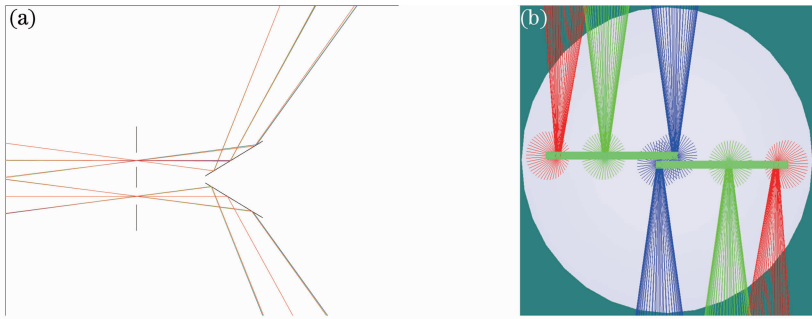


图2 视场分割。(a)侧视图；(b)正视图

Fig.2 Show of the split field. (a) Side view; (b) front view

表1 前置望远系统的设计参数

Table 1 Parameters of the fore telescope

| Surface number | Radius /mm | Glass (Schott) | Thickness /mm |
|----------------|------------|----------------|---------------|
| 1 | Inf | | |
| 2 | 60.35 | BAF13 | 15.93 |
| 3 | 264.01 | | 10.37 |
| 4 | 36.32 | N-PSK53 | 12.87 |
| 5 | -108.73 | KZFSN5 | 5.99 |
| 6 | 17.66 | | 11.40 |
| 7 | Inf | STO | 10.05 |
| 8 | -44.97 | N-LAK7 | 15.49 |
| 9 | -16.11 | KZFS1 | 10.15 |
| 10 | 179.15 | N-PSK57 | 14.82 |
| 11 | -43.62 | | 0.27 |
| 12 | 96.89 | N-LASF41 | 7.36 |
| 13 | 47.06 | N-FK56 | 23.61 |
| 14 | 60.95 | N-LAF32 | 18.89 |
| 15 | -135.13 | 40.00 | |
| Image | Inf | | |

3.2 前置望远系统设计

高光谱成像系统的前置望远系统结构可以为透射式和反射式。反射式系统无色差,结构紧凑,不受

光学材料的限制,固有无热化。但是反射式系统随着视场的增大,会出现视场的遮拦,辐射能量利用率显著下降,本系统要求大视场,所以不宜采用反射式光学系统作为前置望远系统。相反透射式系统可以弥补反射式系统的不足。在获得大视场宽谱段的同时不会出现视场的遮拦,本系统的前置望远系统视场角可达 28° ,光谱波段范围从可见延伸到近红外。

所设计的透射式前置镜属于大视场宽谱段系统,需要校正的像差很多,结构也比较复杂。因此在设计前置镜的初始结构时采用镜头库中技术指标相近的前置镜为初始结构。保证光谱分辨率和探测器灵敏度的条件下,设计前置镜的像方数值孔径为0.12,像方远心。图3为系统结构和性能,表1为系统结构参数。优化前置镜时侧重考虑位置色差和倍率色差,最后得到的前置镜参数和性能如下:

焦距:100 mm

视场角: 28°

像方 NA:0.12

波长范围: $0.45 \sim 1 \mu\text{m}$

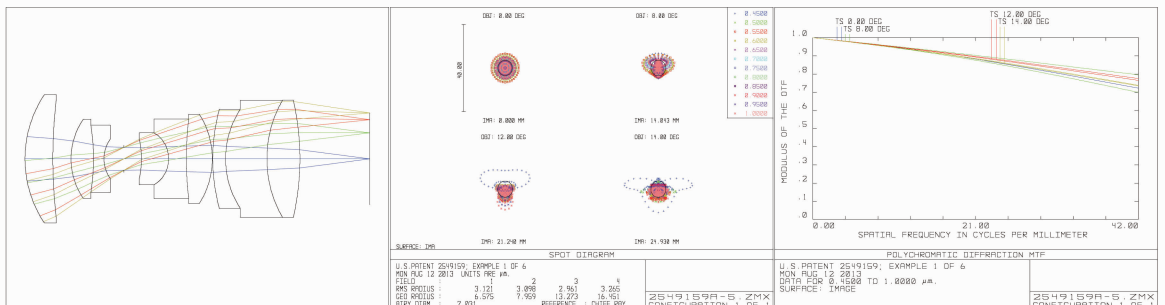


图3 前置望远系统光学结构与性能

Fig.3 Optical structure and performance of the fore telescope

4 光谱成像仪设计

4.1 理论分析

在会聚光路中曲面棱镜成像性质^[6]基础上提出

了反射式 Féry 棱镜,通过在曲面棱镜的后表面镀反射膜,实现光线反射。反射面的引入可以使 Féry 棱镜式光谱成像仪体积减小,并且可以和 Offner 中继

成像结构结合使用,组成次镜改为 F ery 棱镜的光谱成像仪。图 4 所示是一个反射式 F ery 棱镜置于会聚光路中的示意图。R₁、R₂ 分别为前后通光表面,S 为入射 R₂ 面的物,S₁ 为 S 经入射 R₂ 面的像,同时 S₁ 亦为反射 R₁ 面的物,S₂ 为 S₁ 经反射 R₁ 面的像,同时 S₂ 亦为出射 R₂ 面的物,S' 为出射 R₂ 面的像,i、i' 分别为入射角和折射角,l、l' 分别为各个面的物距和像距。

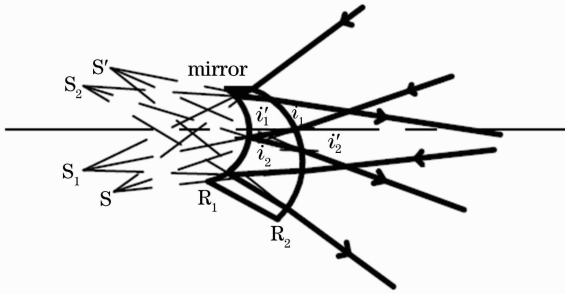


图 4 反射式 F ery 棱镜会聚光路示意图
Fig. 4 Geometry of a converging beam with a reflective F ery prism

根据阿贝不变量 Q 以及 $ni_z = h_z Q_z$,由阿贝不变量表示的赛得和数可以改写为

$$S_I = h^4 Q^2 \Delta \frac{1}{nl}, \quad (5)$$

$$S_{II} = h^3 ni_z Q \Delta \frac{1}{nl}, \quad (6)$$

$$S_{III} = h^2 n^2 i_z^2 \Delta \frac{1}{nl}. \quad (7)$$

利用阿贝成像公式、过渡公式 $2i = i/n + 2\alpha$ 、反射

镜的成像性质得出球差、彗差和像散系数。分析求解方程组得出一组解为 $l_1 = R(n+1)$,即物点放置于后表面的齐明共轭点时,初级像差系数最小,成像质量高。将此作为光学系统设计的像差理论基础。

4.2 系统性能

利用 Zemax 的多重组态控制不同组态同一光谱的谱线弯曲和不同组态不同光谱的谱带弯曲,最后设计的高光谱成像仪如图 5 所示,谱带弯曲和谱线弯曲均小于 15% 像元系统调制传递函数 (MTF) 均在 0.8 以上,如图 6 所示。表 2 为光谱成像仪的结构参数,各组态子系统合并为光谱成像仪后,光谱成像仪的指标如下:

波长范围:0.45~1 μm

色散长度:1200 μm

入射狭缝长度:25.2 mm

物方数值孔径:0.12

探测器像元尺寸:12 $\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的 CCD 面阵探测器

光谱通道数:100

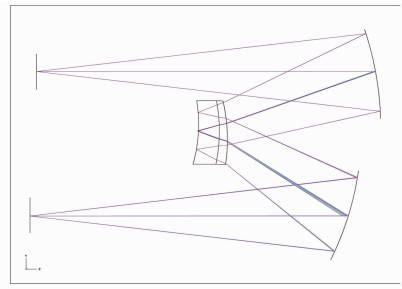


图 5 F ery 棱镜高光谱成像仪

Fig. 5 Hyperspectral imager with F ery prism

表 2 F ery 棱镜高光谱成像仪的设计参数

Table 2 Design parameters of hyperspectral imager with F ery prism

| Surface number | Radius /mm | Thickness /mm | Glass | Diameter /mm | Decenter Y /mm |
|----------------|-------------|---------------|--------|--------------|----------------|
| 1 | | 257.737544 | | | |
| 2 | -257.582667 | -114.925398 | Mirror | 35×35 | -45(number 1) |
| 3 | -139.802125 | -5.955811 | ZF52 | 25 | -3(number 2) |
| 4 | -133.891698 | -15.646459 | Silica | 25 | 0 |
| 5 | -117.065962 | | Mirror | 25 | 0 |
| 6 | -117.065962 | 15.646459 | Silica | 25 | 0 |
| 7 | -133.891698 | 5.955811 | ZF52 | 25 | 0 |
| 8 | -139.802125 | 100.493138 | Air | 25 | 0 |
| 9 | -241.380340 | -248.309992 | Mirror | 41×32 | 3(pick up 3) |
| Image | | | | | -68(number 9) |

5 高光谱成像系统及性能分析

5.1 高光谱成像系统

将前置望远系统和两个高光谱成像仪子系统集

成为高光谱成像系统,如图 7 所示。为实现光瞳匹配,前置镜的像方数值孔径为 0.12,高光谱成像仪的物方数值孔径为 0.12,前置镜为像方远心光路,

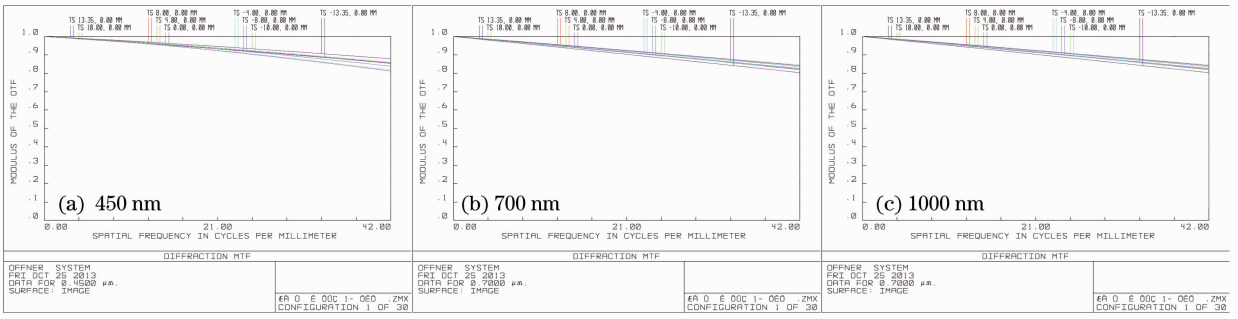


图 6 不同波长的调制传递函数

Fig. 6 MTFs of different wavelenths

高光谱成像仪为物方远心光路。狭缝后两个角度可调节的反射镜可以自由调整高光谱成像仪在全系统中的位置,整个系统的 MTF 曲线如图 8 所示。高光谱成像系统向前推扫形成空间维,狭缝处色散形成光谱维,载荷的飞行高度为 5 km,瞬时视场角为 0.0068° ,地面分辨率为 0.6 m,总刈幅宽度为 2.493 km。高光谱成像仪 1 和 2 分别接收 1.2564 km 的地面刈幅宽。获得推扫的数据之后,通过数据拼接得到完整的 2.493 km 地面图像。

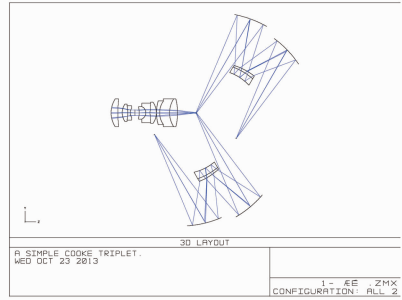


图 7 全系统图

Fig. 7 Show of the total system

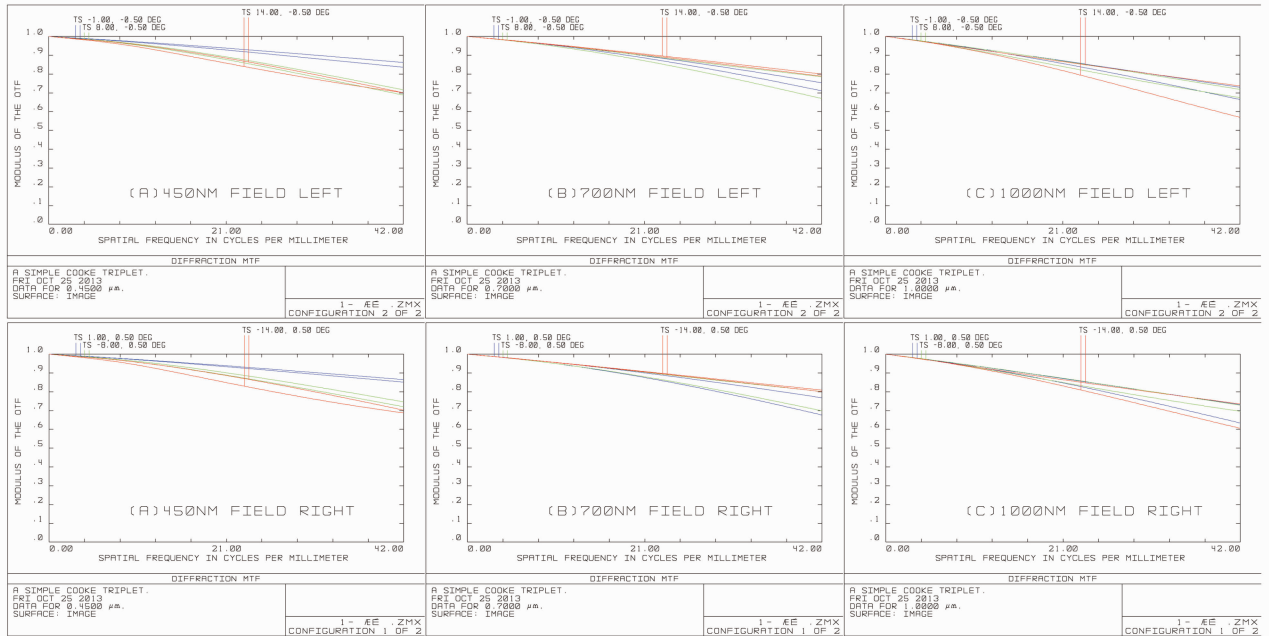


图 8 全系统不同波长的调制传递函数

Fig. 8 MTFs with different wavelenths for the total system

5.2 性能分析

对于狭缝式推扫型高光谱成像系统而言,谱线弯曲和谱带弯曲是一个很重要的指标,直接影响高光谱成像系统的成像质量和光谱分辨率。上述指标最好控制在 20% 像元,甚至 10% 像元内^[8]。单独的高光谱成像仪谱带弯曲和谱线弯曲均可以控制在

15% 像元内,集成前置镜后整个高光谱成像系统的谱带弯曲和谱线弯曲如图 9 和图 10 所示。由图 9 可以看出,左半视场对应高光谱成像仪 1,狭缝长度为 25.2 mm,以 7° 视场设为狭缝中心视场。右半视场对应高光谱成像仪 2,狭缝长度为 25.2 mm,以一 7° 视场设为狭缝中心视场。谱线弯曲近似关于狭缝

中心对称,且随狭缝长度增大谱线弯曲变大,波长越长谱线弯曲越大,狭缝长度 25.2 mm 时最大的谱线弯曲接近 20% 像元。由图 10 可以看出,谱带弯曲以 650 nm 波长为基准,谱带弯曲近似以 650 nm 波长成中心对称,最大谱带弯曲控制在 20% 像元以内。

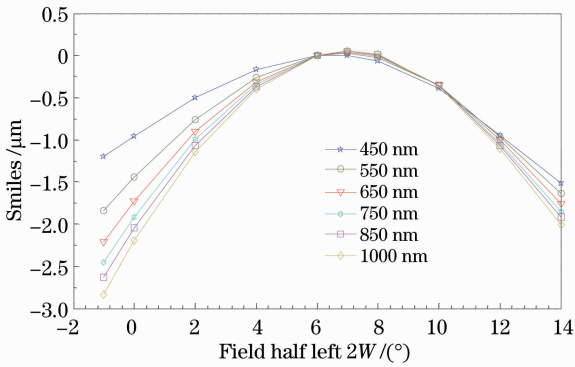


图 9 不同波长的谱线弯曲

Fig. 9 Smiles with different wavelengths

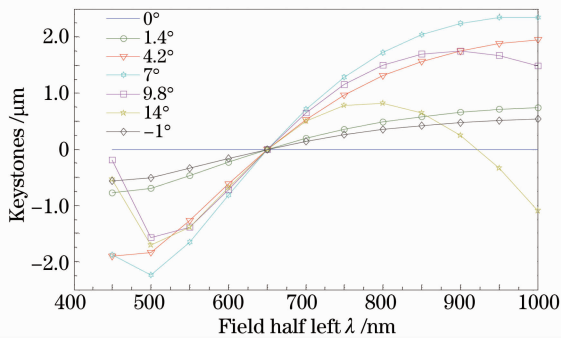


图 10 不同波长的谱带弯曲

Fig. 10 Keystones with different wavelengths

6 结 论

设计了一种机载大视场高光谱成像系统。前置望远系统采用大视场宽谱段的透射式光学系统,设计中克服了大视场宽谱段的设计难度;高光谱成像仪采用基于 Offner 次镜的改正型 Féry 棱镜中继系统,设计中克服了长狭缝所引起的大谱带弯曲和大谱线弯曲。系统设计过程中两次使用 Zemax 多重组态设计;尝试将 Offner 次镜的改正型 Féry 棱镜设计为高光谱成像仪;将 Féry 棱镜高光谱成像仪

集成为高光谱成像系统进行系统分析。最后将两系统集成仿真分析,结果显示该系统结构简单紧凑,成像质量高,谱带弯曲和谱线弯曲符合设计要求。本系统为大视场光谱成像系统设计提供了一种集成化设计的新思路。

参 考 文 献

- 1 C Féry. A prism with curved faces for spectrograph or spectroscope [J]. *Astrophysical Journal*, 1911, 34: 79–87.
- 2 D W Warren, J A Hackwell, D J Gutierrez. Compact prism spectrographs based on aplanatic principles [J]. *Opt Eng*, 1997, 36(4): 1174–1182.
- 3 M A Cutter, D R Lobb, T L Williams, *et al.*. Integration and testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [C]. *SPIE*, 1999, 3753: 180–191.
- 4 B Sang, J Schubert, S Kaiser, *et al.*. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration and technology [C]. *SPIE*, 2008, 7086: 708605.
- 5 J Lee, T Jang, H Yang, *et al.*. Optical design of a compact imaging spectrometer for STSAT3 [J]. *J Opt Soc Korea*, 2008, 12(4): 262–268.
- 6 Y F Nie, J S Zhou, X X Wei. Design of a miniature hyperspectral imager [Z]. *Proc IEEE CFP1153K-PRT*, 2011, 4: 3482–3484.
- 7 Y F Nie, B Xiangli, J S Zhou, *et al.*. Design of airborne imaging spectrometer based on curved prism [C]. *SPIE*, 2011, 8197: 81970U.
- 8 Cheng 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): 1173–1178.
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): 1173–1178.
- 9 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.
- 10 Yang Jin, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Féryprism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1130003.
杨 晋, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 基于 Dyson 同心光学系统的消色差 Féry 棱镜高光谱成像仪的设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1130003.
- 11 张 立. 机载推帚式高光谱成像仪实现宽视场的技术途径[J]. *红外月刊*, 2002, (9): 20–26.
- 12 Lei Hua. Research on a Seamless Optical Butting Technology Based on Pyramid Reflector [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
雷 华. 基于金字塔反射镜的视场无缝拼接技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

栏目编辑: 韩 峰