

文章编号 1004-924X(2010)08-1773-08

插入 Féry 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计

程 欣^{1,3}, 洪永丰¹, 张 葆¹, 薛庆生^{2,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了减小超光谱成像系统的质量和体积,校正光谱成像的谱线弯曲,提出了一种新型带有 Féry 曲面棱镜的 Offner 超光谱成像系统。在该系统中,一对 Féry 曲面棱镜位于 Offner 中继系统的两臂,光束两次通过 Féry 棱镜进行分光,因此当获得指定大小的色散值时该结构具有比传统结构更小的质量和体积。为了减小可见近红外(VNIR)光谱通道的非线性色散,在该结构中引入一对消色差火石 Féry 棱镜。设计了应用于 VNIR 和短波红外(SWIR)两个光谱通道的超光谱成像系统,并给出了设计结果。结果表明,该光谱成像系统在两个光谱通道内的谱线弯曲均小于 0.1 个像元,色畸变均 <0.045 个像元,而非线性度小于 0.1,可满足机载或星载超光谱成像仪的要求。

关键词:成像光谱仪;Féry 棱镜;Offner 结构;光学设计

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1773

Design of compact Offner hyperspectral imaging system with Féry prism

CHENG Xin^{1,3}, HONG Yong-feng¹, ZHANG Bao¹, XUE Qing-sheng^{2,3}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to decrease the volume and quality of an imaging system and to correct the smile of a spectral image, a novel Offner hyperspectral imaging system with Féry prisms is presented. In this system, a pairs of Féry curved surface prisms are located at two arms of the Offner relay configuration and the light beam passes through the prisms twice to be dispersed. Therefore, the system shows a lighter and smaller structure as compared with conventional one when it gains a given dispersion value. To decrease the nonlinear dispersion of spectral channel in Visible-Near Infrared (VNIR), a couple of anti-dispersion flint Féry prisms are introduced into this system again. Then, two kinds of hyperspectral imaging systems applied to VNIR and Short-Wave Infrared (SWIR) channels are de-

收稿日期:2009-07-22;修订日期:2009-10-23.

基金项目:国防科技基础预研基金资助项目(No. 1040603)

signed, respectively. The analytical results indicate the smiles and keystones of the two spectral imaging systems are less than 0.1 pixel and 0.045 pixel, respectively, and the nonlinearity is less than 0.1, which satisfies the requirements of airborne or spaceborne hyperspectral imagers.

Key words: imaging spectrometer; Féry prism; Offner configuration; hyperspectral imaging system; optical design

1 引言

超光谱成像光谱仪(简称成像光谱仪)是指既能对目标成像又可以测量目标光谱特性的光学遥感器,其特点是光谱分辨率高、波段连续性强、图谱合一,目前已经广泛应用于军事和商业各领域。随着现代航空航天技术的飞速发展,要求飞行器搭载的有效载荷在具有高分辨率的同时还具有更小的质量和体积。因此,如何减小成像光谱仪的体积和重量的工作很受关注。光谱成像仪的体积和质量主要由光机结构决定,而整个光学系统主要由前置望远镜系统和成像光谱仪系统组成,因此,成像光谱系统的分光结构的选择直接影响成像光谱仪的体积和质量。近年来,很多国内外学者研究了将光栅或棱镜应用于 Offner 中继结构组成 Offner 结构的光谱成像系统^[1-4],得到的研究表明这种结构在一定程度上实现了光谱成像系统的小型化和轻量化,减小了谱线弯曲和谱带弯曲。

虽然上述 Offner 结构光谱成像系统具有结构上的优点,但是它们本质上的缺点依然存在。对 Offner 光栅光谱成像系统,由于采用的是凸面光栅,具有衍射效率低,光通量小,偏振灵敏度高,有级次重叠,高级衍射杂光、鬼像多等缺点。另外,国内外凸面光栅的加工技术均不够成熟,且价格昂贵,目前国内的应用需求主要还是依赖进口。因此,在宽光谱范围内的应用主要还是考虑采用棱镜作为色散元件。棱镜的缺点是光谱成像谱线弯曲较大,并且具有很大的色散非线性,这种非线性在波长较大(如短波红外(SWIR)光谱通道)时不是很明显,但在接近紫外方向波长较小(如 VNIR 光谱通道)时很严重,给数据处理和后续应用带来很大难度^[5]。解决该问题的办法之一是在光路中使用复合棱镜或消色差棱镜。

本文针对 Offner 光谱成像结构提出了一种

结构改进方法,该方法分别在 Offner 光谱成像结构的主镜和三镜之前加入 Féry 曲面棱镜,并使光路两次通过 Féry 棱镜,从而获得两倍于传统 offner 棱镜光谱成像系统的角色散,因此当获得指定需要的色散时这种新型结构具有更小的质量和体积,并且继承了 Offner 成像结构和棱镜分光结构的所有优点。对于 VNIR 光谱通道,在上述结构中再加入一对消色差火石 Féry 棱镜,就可以很好解决非线性色散问题。本文分析并设计了 VNIR 和 SWIR 两个谱段的这种光谱成像结构,给出了设计结果,并对结果进行了分析。

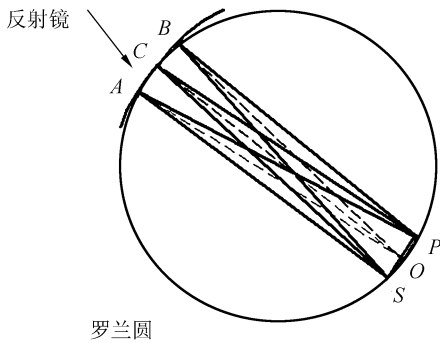
2 插入 Féry 棱镜的 Offner 光谱成像系统的分析

2.1 Féry 棱镜原理

上个世纪初,为了使摄谱仪得到“纯净”的光谱,C. Féry 提出用曲面棱镜取代平面棱镜,结果表明这种改进具有很多平面棱镜无法比拟的优点^[6]。几十年后,Lobb 等人提出 Féry 棱镜概念并将其应用到光谱成像系统,进而引入到 Offner 结构光谱成像系统,获得了很好的光谱成像效果^[7]。

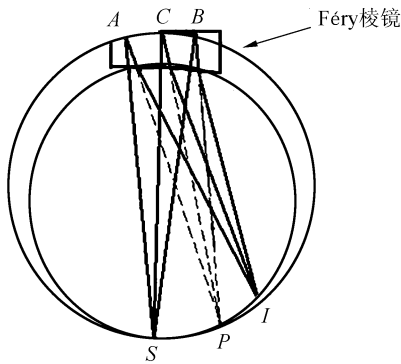
Féry 棱镜成像原理如图 1 所示。图 1(a)中以任意点 C 为中心点作一短圆弧 AB ,圆心为 O ,过 O 点作弧 AB 的罗兰圆,则 OA, OC, OB 为该圆的直径(理论上点 A, B 不在罗兰圆上,但在很短的圆弧上可以近似认为点 A, B 在该圆上),即为点 A, B 在该弧的法线。设一反射镜置于弧 AB 处,狭缝位于罗兰圆上某点 S 上,使从该点射向反射镜的入射光具有相同的入射角,由反射定律知它们具有相同的反射角,故 $\angle A, \angle B, \angle C$ 彼此相等,由中心角定理,反射光线将会聚于罗兰圆上的 P 点,即狭缝经过反射镜所成的像在 P 点。但在弧矢面,由参考文献^[1]知, S 点所成的像并不

位于 P 点,即该结构还有像散存在,并且像散是该结构的主要像差。



(a) Féry 棱镜后表面成像示意图

(a) Imaging sketch of back surface of Féry



(b)féry 棱镜成像示意图

(b)Imaging sketch of Féry prism

图 1 féry 棱镜成像原理图

Fig. 1 Principle diagram of Féry prism imaging

假设 Féry 棱镜的后表面与弧 AB 重合,如图 1(b)所示,以 S 点为圆心作一段垂直于 SC 的圆弧,而 Féry 棱镜的前表面与该弧重合,再作该表面的罗兰圆。设从狭缝 S 点出射的光线垂直通过棱镜前表面入射到与图 1(a)所示相同的 A, C, B 点,此时,反射光线同样将 S 点的狭缝像成在 P 点。当反射光线通过前表面后发生折射,由前面的分析可知,折射角彼此相等,所以同理折射光线将交于前表面罗兰圆上的 I 点。即 Féry 棱镜将狭缝的像成在偏离反射前主光线一定角度的某处,而且像点与物点位于棱镜同一侧,这种特点适合应用于 Offner 成像结构,并且光束通过 Féry 时具有相同的入射角和折射角,三级球差和彗差在每一个表面都得到了校正,而且不随波长变化^[8],具有很好的成像质量。

2.2 Offner 结构的 Féry 棱镜成像结构的分析

Féry 曲面棱镜应用于 offner 结构,是将成对的 Féry 棱镜分别放在 Offner 结构两臂上,即主镜和三镜上,让后表面与 Offner 反射面重合,使光线两次通过 Féry 棱镜。但是从像差校正角度出发,若将 Féry 棱镜与 Offner 反射面之间拉开一段距离,如图 2 所示,则增加至少 6 个变量(上下两臂棱镜后表面半径、离轴量以及与 Offner 反射面之间的距离),因此该结构具有很大的像差校正能力。Offner 结构的特点是成像质量好、畸变小、结构简单、设计方便,3 个反射镜共心且曲率半径比为 $2:1$,系统的三级和五级彗差均为 0,对称的主镜和三镜自动校正三级像散、场曲、子午离轴彗差,只剩下五级像散^[9]。当引入 Féry 曲面棱镜后,光线第一次通过棱镜产生负的像散,正的彗差和畸变,当光线再次通过 Féry 棱镜后,产生与第一次符号相反的像差,只剩下很小的负像散。成对引入 Féry 棱镜后,剩余像差也会加倍,但当棱镜前后表面曲率半径相同时这些像差达到最小^[10],并且由 Offner 结构产生的剩余的正的像散会抵消部分像散,只剩下很小的剩余像差,通过棱镜和 Offner 反射面的偏心和倾斜可以很好地校正这些像差。

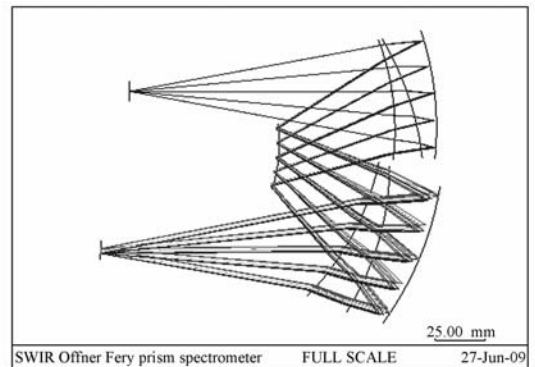


图 2 SWIR 通道光谱成像系统光学结构图

Fig. 2 Optical layout of spectrometer for SWIR channel

3 设计实例

3.1 SWIR 光谱通道光谱成像系统的设计

该系统主要设计指标如下:

光谱:900~2450 nm

物方数值孔径:0.18

入射狭缝长度:15 mm

探测器像元大小:25 μm \times 25 μm

设计体积:175 mm \times 80 mm \times 45 mm

光学结构如图 2 所示,一对 F \acute{e} ry 曲面棱镜分别置于 Offner 主镜和三镜前一定距离,光阑位于 Offner 结构的次镜上。为保证该系统在整个光谱范围有很高的光通量,选择融石英作为棱镜的材料。与普通硅酸盐玻璃相比,融石英玻璃在整个波长具有优良的透过性能,即使不镀膜,反射损失也很小;在红外区光谱透过比普通玻璃大;在可见区,石英玻璃的透过率也是比较高的;在近紫外光谱区,光谱透过率也比其他玻璃高得多。表 1 给出了该系统的结构参数,图 3 为系统的网格畸变,其中水平方向为狭缝长度方向,其畸变值 $< 0.01\%$,图 4 为中心波长和边缘波长的 MTF 曲线,该系统采用物方远心光路。

表 1 SWIR 通道光谱成像系统结构参数

Tab. 1 Construction parameters of spectrometer for SWIR channel

面序列号	半径/mm	材料	偏心量(Y 方向)
1(5)	-134.71	融石英	-19.22
2(4)	-151.05		-19.22
3	-154.59	反射镜	-18.50
6(光阑)	-75.00	反射镜	-9.24
7(11)	-134.10	融石英	-10.42
8(10)	-137.65		-10.42
9	-161.18	反射镜	-7.39
像面	Inf		-52.31

(倾斜 -3.63 $^\circ$)

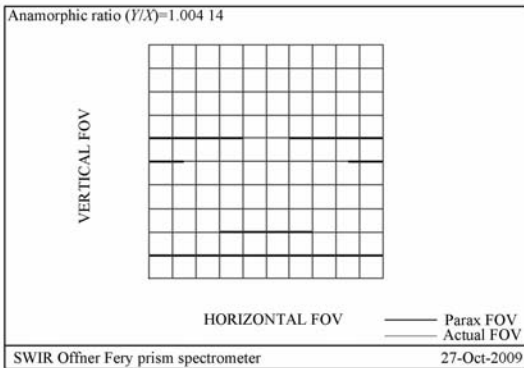
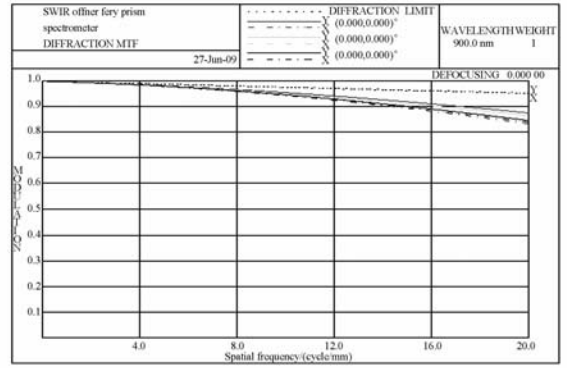


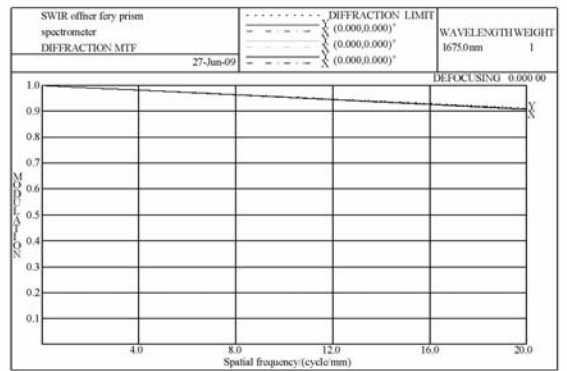
图 3 网格畸变

Fig. 3 Distortion grid



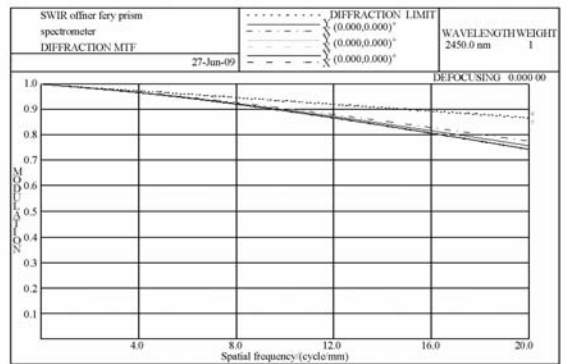
(a) 波长为 900 nm 的 MTF 曲线

(a) MTF curve of 900 nm



(b) 波长为 1 675 nm 的 MTF 曲线

(b) MTF curve of 1 675 nm



(c) 波长为 2 450 nm 的 MTF 曲线

(c) MTF curve of 2 450 nm

图 4 中心波长和边缘波长的 MTF 函数曲线

Fig. 4 MTF curves of central and marginal wavelengths

3.2 VNIR 光谱通道光谱成像系统的设计

主要设计参数如下:

光谱:420~1 000 nm

物方数值孔径:0.18

入射狭缝长度:15 mm

探测器像元大小:18 μm×18 μm

设计体积:190 mm×140 mm×60 mm

与 SWIR 光谱通道不同,在 VNIR 通道,光谱色散具有严重的非线性,故需要引入火石材质的棱镜来减小这种非线性。在结构上体现为, VNIR 光谱成像系统用另外两个 Féry 棱镜来取代前者的两个以铝作基底的反射镜,同时为了得到大的色散值,选择阿贝数小的 ZF6 玻璃。为了减小系统的质量和体积,不再另外使用反射镜,而是直接在火石玻璃的背面镀上反射膜,这样还能减小系统的偏振敏感度。所以该系统共有四块 Féry 棱镜:两块火石棱镜,两块融石英棱镜,并且仍然设计为光束两次通过这些棱镜。系统的光学结构图如 5 所示,结构参数如表 2 所示,网格畸变

如图 6 所示,其中水平方向为狭缝长度方向,其畸变值<0.02%,中心波长和边缘波长的成像 MTF 曲线如图 7 所示。

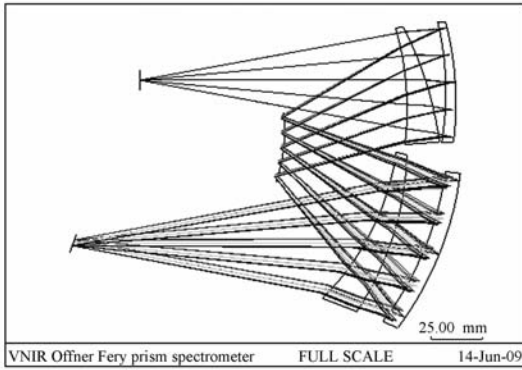


图 5 VNIR 通道光谱成像系统光学结构图

Fig. 5 Optical layout of spectrometer for VNIR channel

表 2 VNIR 通道光谱成像系统结构参数

Tab. 2 Construction parameters of spectrometer for VNIR channel

面序号	半径/mm	材料	偏心量
1(9)	-143.40	融石英	-14.00
2(8)	-170.65	ZF6	-14.00
3(7)	-149.89	ZF6	-11.00
4(6)	-158.21	ZF6	-11.00
5	-158.21	反射膜	-11.00
10(光阑)	-75.31	反射镜	-25.31
11(19)	-127.26	融石英	-16.58
12(18)	-147.28	ZF6	-16.58
13(17)	-156.78	ZF6	-24.68
14(16)	-162.38	ZF6	-24.68
15	-162.38	反射膜	-24.68
像面	Inf		-80.01

(倾斜-20.1°)

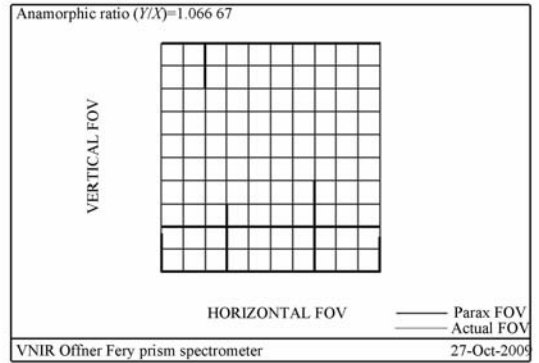
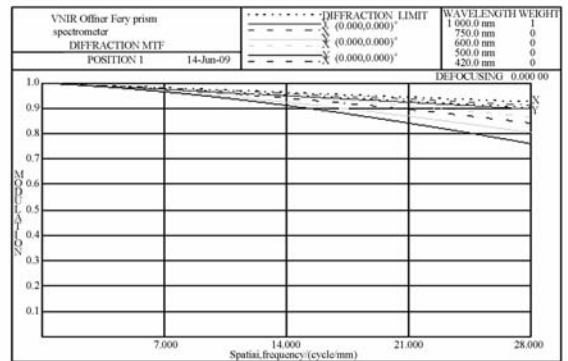


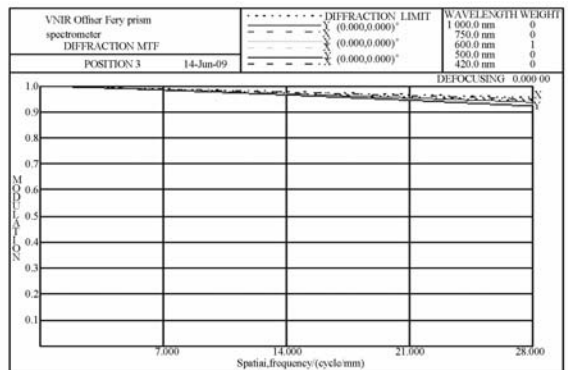
图 6 网格畸变

Fig. 6 Distortion grid



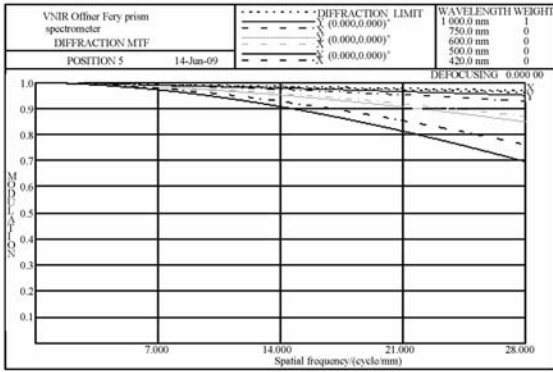
(a) 波长为 1 000 nm 的 MTF 曲线

(a) MTF curve of 1 000 nm



(b) 波长为 600 nm 的 MTF 曲线

(b) MTF curve of 600 nm



(c) 波长为 420 nm 的 MTF 曲线

(c) MTF curve of 420 nm

图 7 中心波长和边缘波长的 MTF 函数曲线

Fig. 7 MTF curves of central and marginal wavelengths

4 结果分析

对于推扫型超光谱成像仪而言,空间和光谱一致性是一项非常重要的性能指标,为了获得准确的超光谱数据,上述指标的畸变必须控制在 20% 像元甚至是 10% 像元内。这些畸变主要包括:谱带弯曲(也叫色畸变,keystone)和谱线弯曲(smile)。谱线弯曲是指狭缝的不同波长弯曲图像与直线的偏离程度,一般以偏差与狭缝像高的比值来表示,如图 8 所示;谱带弯曲是由光谱成像系统对狭缝不同波长的像放大率不同引起的,一般以不同波长的畸变值相对于整个波长范围的平均畸变值来衡量,而这个平均值本身叫做空间畸变。

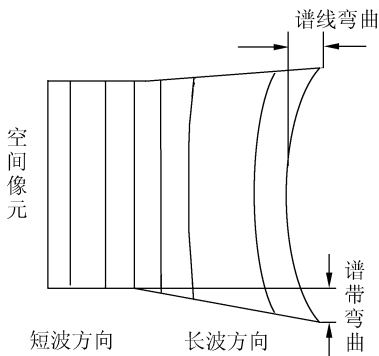
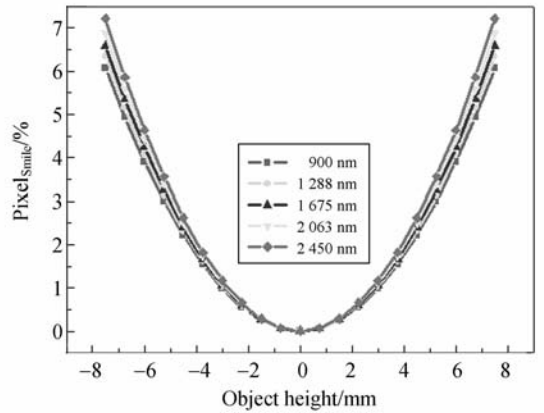


图 8 谱线弯曲和谱带弯曲示意图

Fig. 8 Diagram of smile and keystone

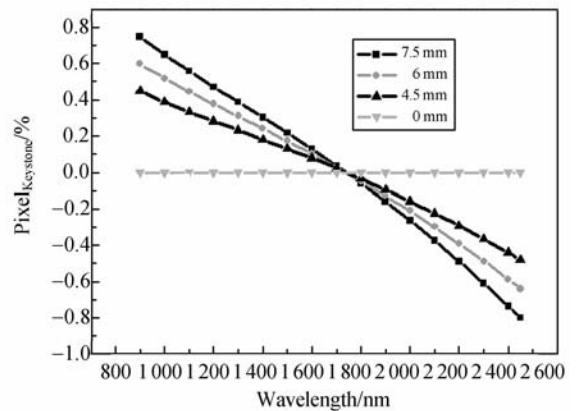
SWIR 通道谱线弯曲和谱带弯曲的数值模拟图如图 9 所示,由图 9(a)可以看出谱线弯曲具

有旋转对称性,谱线弯曲量对称于视场中心,并且谱线弯曲量随波长的增大而增大,但所有波长谱线弯曲量均小于 7% 个像元。图 9(b)是不同物高的谱带弯曲图,由图可以看出,随着视场的增大谱带弯曲量也在增大,但在谱带弯曲量最大的 1.0 视场也只有不到 0.8% 个像元。VNIIR 通道的谱线弯曲和谱带弯曲数值模拟图如图 10 所示,不同波长和不同视场的变化趋势与 SWIR 通道类似,但在数值上均比 SWIR 通道要稍大些,不过这些数值都在可以接受的范围内。对棱镜成像光谱仪来说,色散的非线性是一个不可忽略的问题,因为光谱采样间隔随波长变化,为了不给后续光谱数据的处理和应用带来不便,这个变化量必须小于 0.1。对 SWIR 通道,仅用一种材料的棱镜就可



(a) 不同波长的谱线弯曲图

(a) Total smiles for different wavelengths

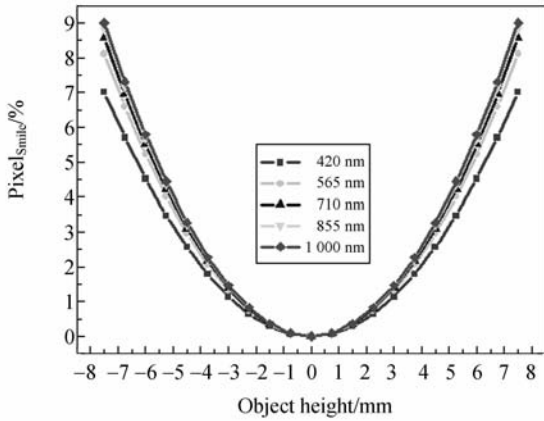


(b) 不同物高的谱带弯曲图

(b) Keystones for different object heights

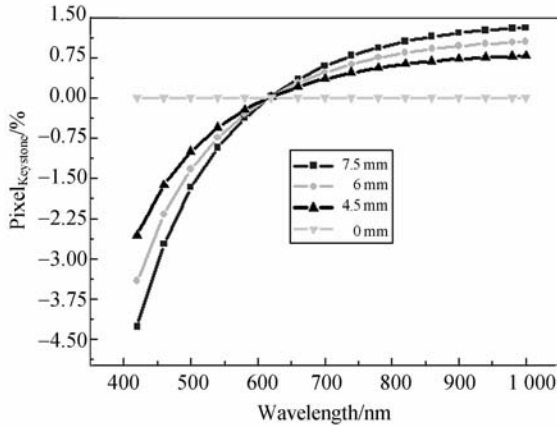
图 9 SWIR 通道的谱线弯曲和谱带弯曲图

Fig. 9 Diagrams of smiles and keystones for SWIR channel



(a) 不同波长的谱线弯曲图

(a) Total smiles for different wavelengths



(b) 不同物高的谱带弯曲图

(b) Keystones for different object heights

图 10 VNIR 通道的谱线弯曲和谱带弯曲图

Fig. 10 Diagrams of smiles and keystones for VNIR channel

以得到很好的线性色散,该通道内每个像元的平均光谱带宽为 14.53 nm,900 nm 和 2 450 nm 波长对应的像元的光谱带宽分别为 13.48 nm 和 9.60 nm;而在非线性色散较大的 VNIR 通道,则

使用两种或两种以上材料的棱镜才可以将这种非线性控制在可接受的范围内,该通道内每个像元的平均光谱带宽为 7.80 nm,420 nm 和 1 000 nm 波长对应像元的光谱带宽分别为 5.13 和 10.12 nm。两个通道的不同波长光谱响应函数的光谱带宽变化量与平均值的比值均小于 0.1,具有良好的线性色散。

另外,与传统 Offner 棱镜光谱成像系统相比,在获得相同色散值的情况下,该结构具有更小的体积。参考文献[3]中 Offner 棱镜光谱成像系统在色散值为 3.6 mm 时,体积为 200 mm×150 mm×100 mm,本文设计的两种应用于 SWIR 通道和 VNIR 通道的光谱成像系统,将其色散值修改至 3.6 mm 时,体积分别为 220 mm×101 mm×60 mm 和 207 mm×153 mm×66 mm,均比传统结构的体积小。

5 结 论

本文针对传统的 Offner 光谱成像系统提出了一种结构改进方法,即将 Féry 棱镜引入 Offner 结构,组成一种新型的光谱成像结构。一对 Féry 棱镜放置在 Offner 结构两臂,使光线两次通过棱镜进行分光。与传统结构相比,在获得相同色散值的情况下,该结构有更小的质量和体积。设计了用于 VNIR 和 SWIR 通道的光谱成像系统,并对设计结果进行了分析。结果分析表明,两个光谱通道内的这种带有 Féry 棱镜的 Offner 光谱成像系统的谱线弯曲和谱带弯曲分别 <0.09 和 0.045 个像元,与传统结构相比,这些畸变量减小了一半以上。针对 VNIR 通道非线性色散大的缺点,还在结构中引入一对消色差 Féry 棱镜,有效地将色散非线性度控制在 0.1 内。实验表明,该结构适合用作航空航天成像光谱仪的光谱成像系统。

参考文献:

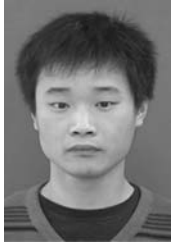
- [1] PRIETO B X, MOMTERO O B, COUCE B, *et al.*. Analytical design of an offner imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9156-9168.
- [2] MOUROULIS P, DANIEL W W, PAUL D M, *et*

al.. Convex grating types for concentric imaging spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(31): 7200-7208.

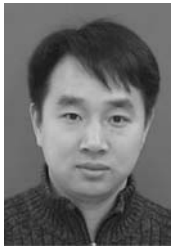
- [3] 郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 650-657.
- ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)

- [4] MOUROULIS P, DANIEL W W, SHEA J J, *et al.*. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy [J]. *Optical Engineering*, 2007,46(6):063001.
- [5] 冯玉涛, 向阳. 谱线弯曲对成像光谱仪辐射信号采集的影响[J]. *光学精密工程*, 2009, 1(17):20-25
FENG Y T, XIANG Y. Effect of spectral curvature on signal acquisition of imaging spectrometer with prism dispersion in VNIR[J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2009,1(17):20-25. (in Chinese)
- [6] FÉRY C. A prism with curved faces, for spectrograph or spectroscope [J]. *Translate from the Journal de Physique*, 1910,9(4):762-771.
- [7] CUTTER M A, LOBB D R, WILLIAMS T L, *et al.*. Integration & testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [J]. *SPIE*, 1999,3753:180-191.
- [8] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics [J]. *SPIE*, 1997,3118:165-178.
- [9] FISHER J, BAUMBACK M, BOWLES J, *et al.*. Comparison of low-cost hyperspectral sensors [J]. *SPIE*, 1998,3438:23-30.
- [10] MORRISSEY P F. Third-order aberrations of a prism with spherically curved surfaces [J]. *Applied Optics*, 1994,33(13):2539-2543.

作者简介:



程欣(1984—),男,湖北武穴人,博士研究生,2007年于长春理工大学获学士学位,主要从事航空光电成像技术及光学设计方面的研究。E-mail: chengxin0301214@163.com



洪永丰(1980—),男,湖北潜江人,工程师,工学硕士,2002年于武汉大学获学士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事光学设计方面的研究 E-mail: hyfciomp@163.com



张葆(1966—),男,吉林磐石人,研究员,工学博士,博士生导师,1989年、1994年于长春光学精密机械学院分别获学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事航空光电成像技术的研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com



薛庆生(1979—),男,山东梁山人,博士研究生,2005年于鲁东大学获学士学位,主要从事空间紫外遥感仪器及光学系统设计方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com