

基于离轴两反利特罗结构的棱镜高光谱成像系统的光学设计

杨晋^{1,2}, 崔继承¹, 巴音贺希格¹, 齐向东¹, 唐玉国^{1*}, 姚雪峰¹

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. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为满足高光谱成像系统高空间分辨率和高光谱分辨率的要求, 并应对实际应用中对仪器小型化、轻量化、高光学效率的新需求, 研究一种基于利特罗结构的棱镜色散高光谱成像系统, 采用离轴两反的利特罗结构形式减小光学系统的体积, 同时为平面棱镜提供准直光路, 并以宏编程的优化方式, 避免系统中光路干涉。结果表明, 通过非球面反射镜和双校正透镜的设计, 该光学成像系统的谱线弯曲均小于 $2.1 \mu\text{m}$, 色畸变小于 $1.3 \mu\text{m}$, 控制在 18% 像元内, 在 $400 \sim 1080 \text{ nm}$ 可见—近红外(VNIR)工作波段的光学调制传递函数(MTF)均达到 0.9 以上, 光谱分辨率为 $1.6 \sim 5.0 \text{ nm}$, 光谱透过率在 51.5% 以上, 系统在整个工作光谱范围都具有较高的透过率和像质。

关键词 利特罗结构; 离轴两反系统; 高光谱成像仪; 谱线弯曲; 色畸变

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)05-1537-06

引言

高光谱成像仪是一种将空间望远系统和光谱分析系统相结合的光学遥感仪器, 从 20 世纪 80 年代问世至今, 经过 30 多年的发展, 已经广泛应用于在军事侦察、农、林、水、土、矿等资源调查以及医疗诊断、产品质量检验等领域。目前已研制的高光谱成像仪有美国 NASA 的 AVIRIS^[1]、NEMO 卫星上的 COIS^[2]、EO-1 卫星上的 Hyperion^[3]、意大利航天局的 PRISMA^[4]、英国小卫星上的 CHRIS^[5]、欧空局的 APEX^[6]、以及德国小卫星上的 EnMAP^[7] 等。它们的最显著特点是都具 $400 \sim 1000$ 或 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 的太阳反射区的工作光谱范围, 并且一般可达 $10^{-2} \lambda$ 的纳米量级光谱分辨率。其中, COIS 和 Hyperion 是以凸面光栅作为色散元件, 采用同心光学系统的结构; PRISMA, CHRIS, APEX 和 EnMAP 以棱镜作为分光元件, CHRIS 和 EnMAP 在同心系统中采用曲面棱镜校正像差, PRISMA 和 APEX 在平行光路中采用平面棱镜分光, 并加入像差校正透镜^[8]。

随着现代光谱成像技术发展以及应用的不断扩大, 为了适应在各种小搭载平台上的勘探、侦查任务, 对高光谱成像

仪光谱分辨率、空间分辨率、小型化、轻量化、便携式的要求也越来越高。采用同心光学系统的高光谱成像仪可以较好地解决上述问题, 但作为其核心色散元件的曲面光栅或曲面棱镜, 存在着难加工、难装调、制作成本高等问题^[9-10]。而且曲面光栅还具有宽波段内平均衍射效率较低, 级次重叠, 杂光较多等缺点^[9]。若以曲面棱镜作为同心光学系统的高光谱成像仪的色散元件, 由于是在非平行光路中使用, 为了校正棱镜色散引起不同波长的成像弯曲, 需要对系统进行复杂化^[10-12]。

鉴于此, 本文研究一种基于利特罗结构的棱镜色散高光谱成像系统, 系统采用离轴两反利特罗结构形式减小光学系统的体积, 同时为平面棱镜提供准直光路, 通过二次曲面两反系统和双透镜校正系统像差, 并以不同光学玻璃材料组合成平面棱镜作为色散元件, 消除图像弯曲与波长的关系, 使系统既具有结构简单、便于加工装调的特点, 又具有较大的自由光谱范围, 并且对整个光谱具有较高的透过率。

1 基础理论分析

利特罗结构又称自准成像结构(反射式)在光谱仪器中有

收稿日期: 2014-09-16, 修订日期: 2015-01-18

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2014YQ120351), 国家重点基础研究发展计划(2014CB049501), 国家自然科学基金项目(61108032), 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1), 国家重大科学仪器设备开发专项项目(11YQ120023)和吉林省科技发展计划项目(20140203011GX)资助

作者简介: 杨晋, 1988 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究实习员 e-mail: yangjinl@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

较广泛的应用,如图 1 所示,光束由入射狭缝 S_1 进入系统,经准直反射镜 M_1 (可以由一块或多块反射镜组成)后进入色散元件 P ,分光后经平面反射镜 M_2 反射后由原光路返回,会聚于出射狭缝 S_2 。利特罗结构通过自准直成像有效减小系统的体积,其近似于对称结构的等效光路可以很好抑制轴外像差,并且两次通过色散元件增加系统色散能力。

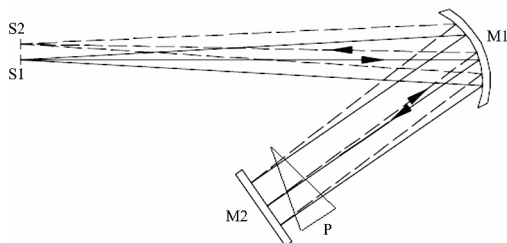


图 1 利特罗结构光谱仪示意图

Fig 1 Imaging sketch of Littrow configuration spectrometer

针对高光谱成像系统对成像质量有较高的要求,采用倒置离轴两反望远系统来实现光束的初准直和再会聚。共轴反射系统如图 2(a)所示,具有中心遮拦和杂散光较多等缺点,离轴两反系统的设计是基于高斯光学理论,求取共轴两反系统结构作为初始解,然后将共轴系统进行离轴化设计和优化,实现系统中心无遮拦,如图 2(b)所示。

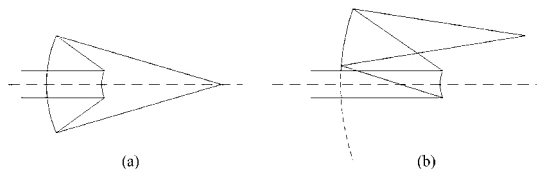


图 2 两反系统示意图

Fig 2 Imaging sketch of two-mirror system

共轴两反射镜系统本身只能校正四种像差,但利特罗结构相当于对称系统,慧差、畸变得以校正,只需消除球差、像散和场曲,其对应三级像差系数表达式为

$$\begin{aligned} S_I &= \frac{\alpha(1+\beta)}{4}[(1-\beta)^2 - (1+\beta)^2 e_2^2] - \frac{\beta^3}{4}(1-e_1^2) \\ S_{III} &= \frac{(1-\alpha)^2(1+\beta)}{4\alpha\beta^2}[(1-\beta)^2 - (1+\beta)^2 e_2^2] + \frac{1-\alpha+\beta}{\alpha\beta} \\ S_{IV} &= \beta - \frac{1+\beta}{\alpha} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, α 和 β 为次镜的遮拦比和放大率, e_1^2 和 e_2^2 为主镜和次镜的非球面系数。若要消除上述三种像差,则像差系数必须满足

$$S_I = S_{III} = S_{IV} = 0 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1+\beta}{\beta} \\ e_1^2 &= 1 - \frac{4(1+\beta)(1-\beta^2)}{\beta^2} \\ e_2^2 &= \frac{(1-\beta)(1-\beta-4\beta^2)}{(1+\beta)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)作出 α , e_1^2 , $e_2^2 \sim \beta$ 的关系曲线如图 3 所示,为了

避免光路干涉和便于在反转的望远准直系统中插入不同元件,采用两反射镜焦点位于同一侧、前长焦的望远系统,即 $1 < \alpha < \infty$, $1 < \beta < \infty$, 图 3 红框为初始解的区域。在确定系统的焦距 f' 后,通过选定 α 和 β 参数,可以计算出主镜、次镜的半径与间隔

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{2f'}{\beta} \\ r_2 &= \frac{2\alpha f'}{1+\beta} \\ d &= \frac{f'(1-\alpha)}{\beta} \end{aligned} \quad (4)$$

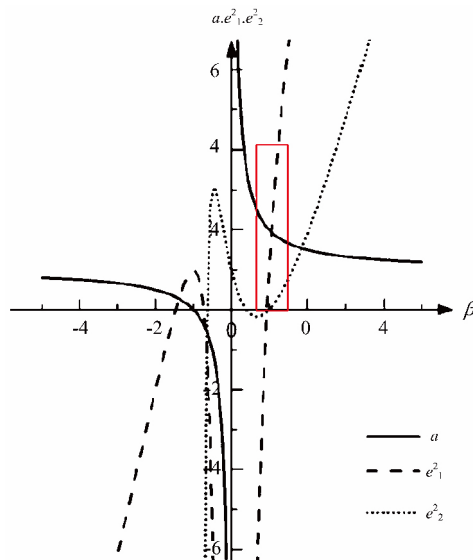


图 3 $S_I = S_{III} = S_{IV} = 0$ 的曲线图

Fig 3 The curve of $S_I = S_{III} = S_{IV} = 0$

2 高光谱成像仪的设计

在离轴两反系统的平行光路中插入棱镜和平面反射镜就构成高光谱成像仪的初始结构,高光谱成像仪的设计流程如图 4。确定初始结构参数后,通过光学设计软件对共轴两反的利特罗结构进行优化,主要在控制系统的球差、像散和场曲的前提下,对高级像差进行抑制。在发散或会聚光束中插入平面棱镜,必然会引入多种像差^[13],本文将优化后的共轴系统离轴化后产生准直光束入射到色散棱镜,其在平行光下初级像差系数为

$$S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0 \quad (5)$$

$$S_V = -J(u_z'^2 - u_z^2) \quad (6)$$

其中, J 为系统拉格朗日不变量, u_z' 和 u_z 为轴外主光线出射孔径角和入射孔径角。式(6)为单折射平面的初级畸变系数,通过不同材料棱镜组合的方法,可以使总畸变系数 $\sum S_V$ 趋于零。此外,单片棱镜材料在短波和长波处的折射率存在较大差异,而组合棱镜有效地消除了图像弯曲与波长的关系。

系统离轴和插入棱镜色散后,引入的非对称性产生额外像差,再次优化对残余像差校正的同时着重控制系统的谱线

弯曲(spectral smiles)、色畸变(keystone),并且通过宏编程防止优化过程中产生的系统光路干涉。折叠反射系统可能会出现镜面碰撞、光线被镜片阻挡等干涉现象,如图 5 所示,通过几何光线追迹,对镜片的临界点和边缘光线进行控制,防止第二片校正透镜 C2 与次反射镜 M2 的碰撞、下边缘光线与次镜的干涉、第一片棱镜 P1 与下边缘光线干涉等,当光路自准直返回时也要进行相似的约束控制。

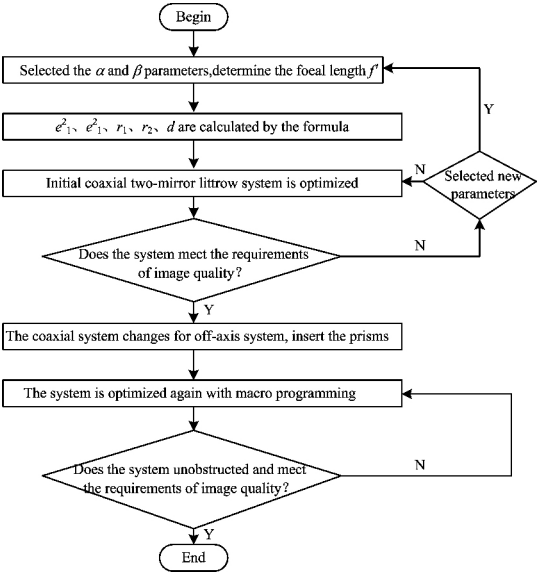


图 4 系统设计流程

Fig 4 Flow chart of the system

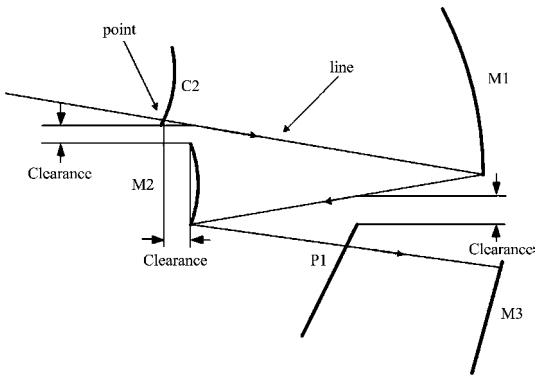


图 5 光路干涉示意图

Fig 5 Imaging sketch of optical path interference

光学系统的最终设计结果如表 1 所示,图 6 为系统的光学结构图。系统参数指标如:入射狭缝长度为 12 mm;物方数值孔径为 0.15;光谱范围为 VNIR 波段 400~1 080 nm;探测器像元尺寸为 12 μm ×12 μm 的 CCD 面阵探测器;光谱分辨率:工作光谱边缘的长波光谱分辨率<5.0 nm,短波光谱分辨率<1.6 nm,谱面宽度为 3.04 mm,共有 126 个光谱通道;调制传递函数:全狭缝高范围内>0.9;光学尺寸:298 mm×179 mm×149 mm。

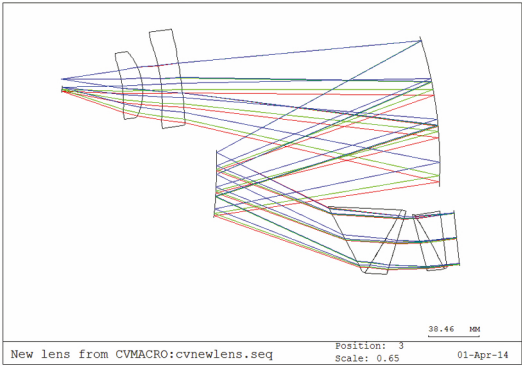


图 6 离轴两反利特罗棱镜高光谱成像系统的光学结构图

Fig 6 Optical layout of off-axis two-mirror Littrow prisms hyperspectral imager

表 1 离轴两反利特罗棱镜高光谱成像系统的参数

Table 1 Construction parameters of off-axis two-mirror Littrow prisms hyperspectral imager

表面编号	元件	半径/mm	材料
1(29)	透镜	-103.95	SiO ₂
2(28)		-45.25	
3(27)	透镜	-133.17	SiO ₂
4(26)		-403.69	
5(25)	双曲面	-325.20	
6(24)	椭球面	-415.37	
7(23)	棱镜	Inf	SiO ₂
8(22)		-676.76	
9(21)	棱镜	-676.76	F2
10(20)		Inf	
11(19)	棱镜	Inf	F2
12(18)		-580.77	
13(17)	棱镜	-580.77	NLAK9
14(16)		Inf	
15	平面反射镜	Inf	
像面		Inf	

光学系统的整体结构采用自准直型的利特罗结构,使结构简单、紧凑,减小了系统的光学尺寸,并抑制了系统轴外像差。与对称式结构相同,利特罗结构的轴上像差相叠加,主镜和次镜分别采用椭球面和双曲面的设计,校正轴上球差,并进一步平衡轴外像差。由于色散和离轴引入的非对称性产生了额外的像差,以及要控制系统的谱线弯曲和色畸变,在光学系统中插入了一对校正透镜,并且在不影响装调难度的情况下把两个棱镜组合的胶合面优化为大半径的球面,达到平像场的目的。系统调制传递函数如图 7 所示,各单色光对不同狭缝高度处(不同视场)的成像都保持较高的像质,调制传递函数到达 0.9 以上,能够有效减小前端成像镜头的设计压力。波像差曲线如图 8 所示,全工作光谱波段的像差都得到较好的校正,光学结构的复杂化使系统得到更优的像质,满足平像场的要求。

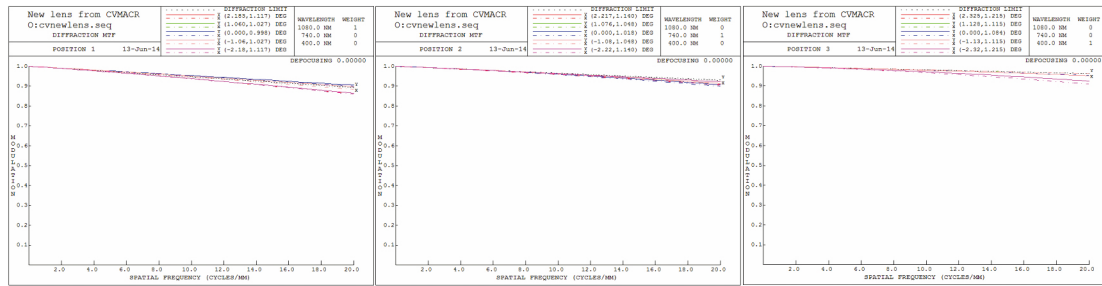


图 7 各波长在 0, 3 和 6 mm 狭缝高的传递函数

Fig 7 The MTF of different wavelengths on slit height 0, 3, 6 mm

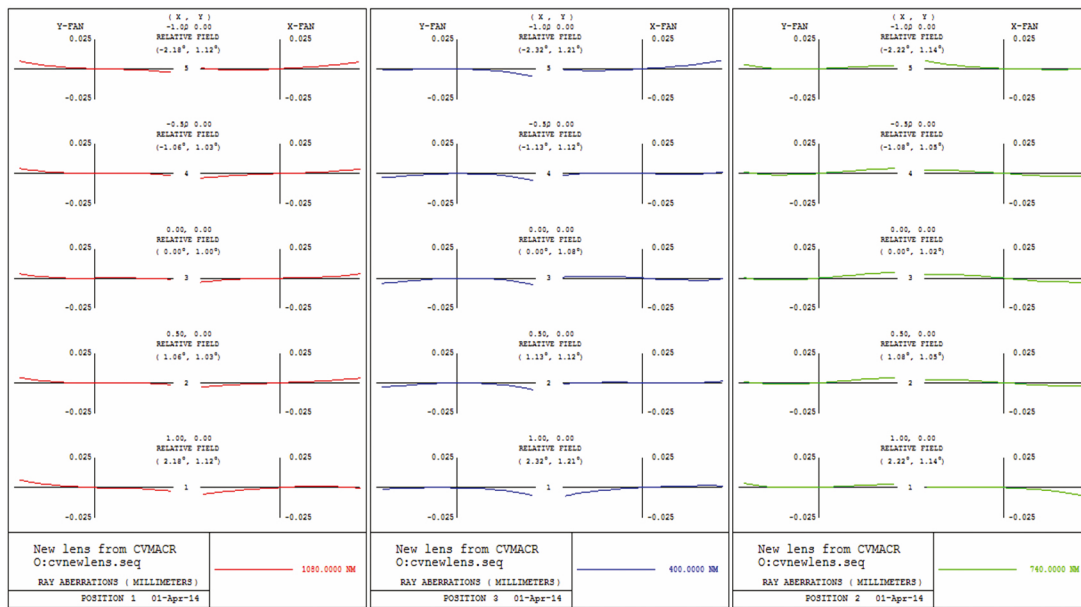


图 8 各波长在 0, 3 和 6 mm 狭缝高的像差曲线

Fig 8 Ray aberration of different wavelengths on slit height 0, 3, 6 mm

3 系统性能分析

在高光谱成像系统中,同一波长在不同视场(不同狭缝高)的横向放大率的差异引起谱线弯曲,不同波长的横向放大率的差异引起色畸变,它们严重影响高光谱成像系统的光谱分辨率和成像质量。不同材料棱镜组合的引入消除了系统成像弯曲与波长之间关系,有助于解决谱线弯曲的问题,同时加以校正透镜和对组合棱镜胶合面的控制,如图 9 和 10 所示,系统光谱弯曲小于 $2.16 \mu\text{m}$,色畸变小于 $1.30 \mu\text{m}$,都控制在 18% 像元内。

当以曲面掩膜光栅作为色散元件时,在宽工作波段范围内光栅衍射效率一般在 $20\% \sim 60\%$ 之间,并且存在难以加工和二级光谱重叠等问题,而棱镜色散具有较大的自由光谱范围和高光谱透过率的特点,如图 11 所示,图 11a 为经过两次色散后系统棱镜的光谱透过率,全工作波段光谱透过率在

$67.9\% \sim 93.5\%$ 之间,图 11b 为整个系统的光谱透过率,全工作波段光谱透过率均在 51.5% 以上,有效地降低电子系统的设计难度,提高了系统信噪比。

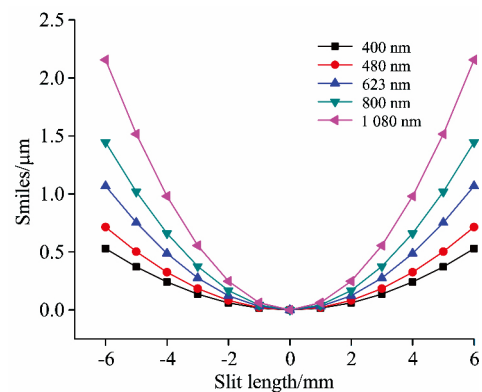


图 9 不同波长的谱线弯曲

Fig 9 Smiles of different wavelengths

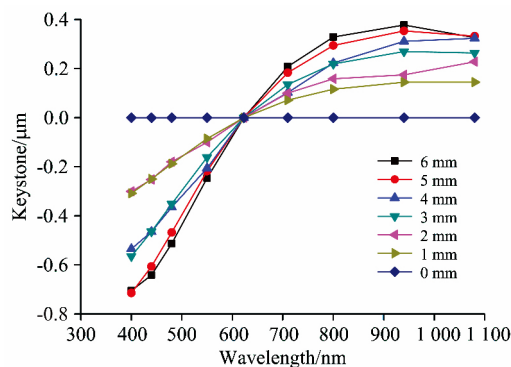


图 10 不同缝高的色畸变

Fig. 10 Keystones of different fields

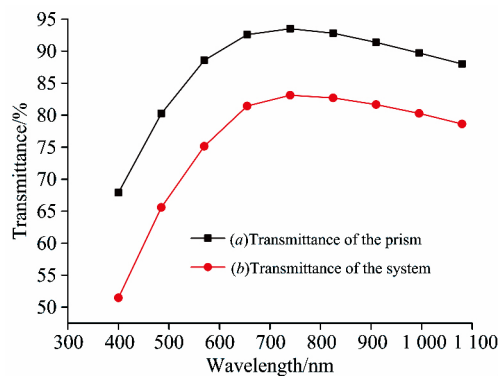


图 11 不同波长的光谱透过率

Fig. 11 Transmittance of different wavelengths

4 结 论

研究一种基于离轴两反利特罗结构的棱镜色散高光谱成像系统,通过二次曲面反射镜和双校正透镜校正系统像差,并以组合棱镜作为色散元件,消除光谱图像弯曲与波长的关系,使系统具有大的自由光谱范围和高光谱透过率。结果表

明,在工作波长 400~1 080 nm 范围内,高光谱成像系统光谱分辨率为 1.6~5.0 nm,谱段数达到 126 个。系统各单色光在全狭缝成像均保持较高的像质,相对谱线弯曲和色畸变均控制在 18% 像元内,调制传递函数达到 0.9 以上,其具有高光学效率、高光谱分辨率、高成像质量的特点,并且在便于加工装调的同时实现系统的小型化、轻量化,能够适应目前大部分搭载平台对高光谱成像仪的要求。

References

- [1] Green O R, Chruen G T, Nielson J P, et al. SPIE, 1993, 1937: 180.
- [2] Wilson T L, Davis C O. SPIE, 1999, 3753: 2.
- [3] Folkman M A, Pearlman J, Liao L B, et al. SPIE, 2001, 4151: 40.
- [4] Jeffrey J. SPIE, 2000, 4041: 121.
- [5] Cutter M A, Lobb D R, Williams T L, et al. SPIE, 1999, 3753: 180.
- [6] Klaus I Itten, Francesco Dell'Endice, Andreas Hueni, et al. Sensors, 2008, 6235.
- [7] Sang B, Schubert J, Kaiser S, et al. SPIE, 2008, 7086.
- [8] WANG Xin, DING Xue-zhuan, YANG Bo, et al(王 欣, 丁学专, 杨 波, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2010, 39(7): 1334.
- [9] ZHANG Jun-qiang, YAN Chang-xiang, ZHENG Yu-quan, et al(张军强, 严昌翔, 郑玉权, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2011, 31(12): 3429.
- [10] CHENG Xin, HONG Yong-feng, ZHANG Bao, et al(程 欣, 洪永丰, 张 葆, 等). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2010, 18(8): 1173.
- [11] Blechinger F, Harnisch B, Kunkel B. SPIE, 1997, 2480: 166.
- [12] YANG Jin, TANG Yu-guo, Bayanheshig, et al(杨 晋, 唐玉国, 巴音贺希格, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2012, 32(11): 113003-1.
- [13] ZHENG Yu-quan(郑玉权). Optics and Precision Engineering(光学 精密工程), 2005, 13(6): 650.

Study on the Design of Prism Hyperspectral Imaging System Based on Off-Axis Two-Mirror Littrow Configuration

YANG Jin^{1, 2}, CUI Ji-cheng¹, Bayanheshig¹, QI Xiang-dong¹, TANG Yu-guo^{1*}, YAO Xue-feng¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to meet the requirements of high spectral resolution and high image quality on the hyperspectral imaging system, and to meet the new demands of miniaturization, light weight, and high optical efficiency in practical applications, a prism known as hyperspectral imaging system based on Littrow configuration is designed. The use of off-axis two-mirror Littrow configuration is to reduce the size of the optical system and provide a collimated beam for the plane prisms. To avoid the optical path interference, the macro programming optimization is applied. The application of two correct lens and aspheric mirrors can correct the spectral smile and the keystone of the hyperspectral imaging system. It is indicated that the distortion is less than $2.1 \mu\text{m}$ and the spectral bend is less than $1.3 \mu\text{m}$, both are controlled within 18% pixel. The analytical results indicate that the MTF in the visible-near infrared(VNIR) spectral region from 400 to 1 080 nm is above 0.9 while spectrum resolution is about $1.6 \sim 5.0 \text{ nm}$, the spectral transmittance more than 51.5%. The results show that the system has high transmittance and image quality within the whole spectral range.

Keywords Littrow structure; Off-axis two-mirror system; Hyperspectral imager; Spectral smile; Keystone

(Received Sep. 16, 2014; accepted Jan. 18, 2015)

* Corresponding author