

基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计*

杨新军¹ 王肇圻¹ 孙强² 母国光¹

(1 南开大学、天津大学联合研究院,南开大学现代光学研究所,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

(2 中国科学院长春光机与物理研究所应用光学国家重点实验室,长春 130022)

摘要 对 Lyons 采用二元光学元件的红外成像光谱仪的设计理论进行了分析,为消除其二元光学元件作为透射式成像元件导致的焦距随波长的变化而变化的缺陷. 提出将离轴三反射镜系统与具有二元光学透镜的变焦距系统相结合的新技术方案,并从军事目标的红外热探测的基本要求出发,给出了具体的设计实例. 设计结果表明,系统具有设计精巧、结构简单、光能接收率高、消像差特性好、对材料的要求低以及满意的红外焦平面凝视阵列探测器的配准精度和探测精度.

关键词 成像光谱仪;二元光学;变焦光学系统

中图分类号 O436 O435.2 **文献标识码** A

0 引言

超光谱成像技术是一种将光学、光谱学、精密机械、电子技术及计算机技术融于一体的新型成像技术. 超光谱成像技术主要特征是光谱带宽窄,可以对目标进行详细深入了解,以便进行正确的分析、判断和决策. 欧美等国先后投入了大量人力和物力对成像光谱仪进行研究,已发展了多种色散型、计算层析型和干涉傅里叶变换类型的超光谱成像技术,并在实际系统中得到应用^[1,2]. 美国光量子中心罗姆实验室的 Lyons^[3] 在 1995 年 4 月国际光学工程学会上提出一种新颖结构,利用二元光学透镜独特的色散特性设计出用于可见或红外光谱范围的成像光谱仪,它能够在波长相邻、连续采样的窄带光谱波段上获得数十至数百个通道光谱图像,利用这种多光谱图像数据,可以根据地球表面众多物体的光谱特征精确地识别目标. 另外此成像光谱仪光学系统简单,体积小、重量轻、坚固耐用、价格低廉,便于实现小型化和轻量化. 但由于二元光学透镜既是分光元件又是成像元件,其焦距随波长的变化改变了系统的 F 数,因此改变了系统的放大率,这将引起光谱图像的像元配准误差,影响探测精度,甚至混淆被探测目标. 同时此成像光谱仪光能透过率低,集光能力差.

本文将离轴三反系统与光学变焦系统相结合,从而使系统的放大率保持恒定,提高了系统的集光能力,并设计了一个应用实例. 结果表明,该光学系统不仅结构简单,具有 100% 的冷光栏效应,而且具有优良的超光谱成像能力和光学性能.

1 设计思想

在二元光学成像光谱仪中,二元光学透镜既是

分光元件又是成像元件^[4],作为成像元件,二元光学透镜由于衍射作用,有效焦距与入射波长成反比关系^[5]. 当只含有单一二元光学透镜时,光学系统的横向放大率为

$$m_{BOE}(\lambda) = \frac{s_{iBOE}(\lambda)}{s_o} \quad (1)$$

式中: $s_{iBOE}(\lambda)$ 和 s_o 分别为二元光学透镜的像距和物距.

从式(1)看出,系统放大率是波长的函数,这将引起光谱图像的像元配准误差,得到并不精确的相对光谱信号强度. 采用具有变焦组元的二元光学光谱成像系统可补偿这一缺陷^[6-8],如图 1 所示. 该系统可看作由两组透镜构成的变焦系统,其中二元光学元件 K_1 作为固定组,第二透镜 K_2 与第三透镜 K_3 分别为变焦正透镜和补偿负透镜,其物象间距离为 T_{23} ,组合放大率为 M_{23} ,焦距为 F_{23} , δ 和 δ' 分别为第二透镜到物方主平面的距离和像方主平面到第三透镜的距离,第一透镜到物方主平面的距离为 D_1 ,物方主平面与像方主平面的间隔为 Δ . 变焦系统总的焦距为 F ,物距和像距分别为 S_H 和 S_H' .

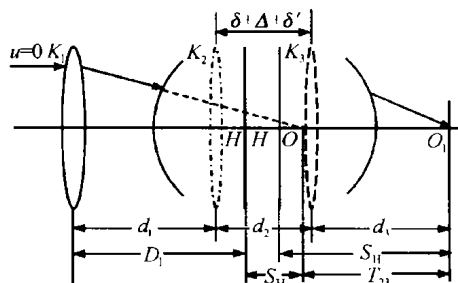


图 1 含有二元光学元件三片型变焦组元的结构示意图
Fig. 1 Sketch map of three-component zoom system with binary optical element

对于物在无穷远的红外变焦系统,由几何光学理论可知第二透镜与第三透镜的组合部分物像间距离为

$$T_{23} = (2 - M_2 - M_2^{-1})F_2 + (2 - M_3 - M_3^{-1})F_3 = (2 - M_{23} - M_{23}^{-1})F_{23} + \Delta \quad (2)$$

*国家自然科学基金(60277021)、南开大学、天津大学联合研究院资助

Tel: 022-23508332 Email: yangxinjun@eyou.com

收稿日期: 2004-02-24

式中： M_2 、 M_3 分别为第二透镜和第三透镜的横向放大率，再有

$$\delta = \Phi_3 d_2 / \Phi_{23}, \delta' = -\Phi_2 d_2 / \Phi_{23}, \Delta = d_2 + \delta' - \delta = -\Phi_2 \Phi_3 d_2^2 / \Phi_{23} \quad (3)$$

式中 Φ_2 是第二透镜的光焦度， Φ_3 是第三透镜的光焦度， Φ_{23} 是第二透镜与第三透镜的组合光焦度， d_2 是第二透镜到第三透镜的距离。另外， T_{23} 是由初始结构决定的常数。将 Δ 的表达式代入式(1)，得

$$T_{23} = (2 - M_{23} - M_{23}^{-1}) F_{23} - \Phi_2 \Phi_3 d_2^2 / \Phi_{23} \quad (4)$$

$$\Phi_{23} = \Phi_2 + \Phi_3 - d_2 \Phi_2 \Phi_3 \quad (5)$$

在变焦过程中， M_{23} 随之变化，解得

$$d_2 = [-b \pm (b^2 - 4ac)^{1/2}] / 2a \quad (6)$$

其中： $a = \Phi_2 \Phi_3$ ， $b = -T_{23} \Phi_2 \Phi_3$ ， $c = T_{23} (\Phi_2 + \Phi_3) - (2 - M_{23}^{-1} - M_{23}^{-1})$ 。

这样每确定一次 M_{23} ，就有相应的一个 d_2 ，由于第一透镜到变焦系统像面的距离固定不变， d_1 和 d_3 相互关联，通过适当调解 d_3 的值，可达到最佳成像效果，从而保持了系统放大率恒定。

对于红外系统，要求其具有强的集光能力和高的分辨率，如果用投射式物镜直接接收红外热辐射，则由于系统所选用的锗和硒化锌红外材料的折射率较高，界面的反射损失较大，总的透过率不高。于是我们采用如图2所示的一种三反射面离轴光学系统。系统的三个反射面都是二次非球面，主镜为椭圆面型，次镜和三镜为双曲面型。

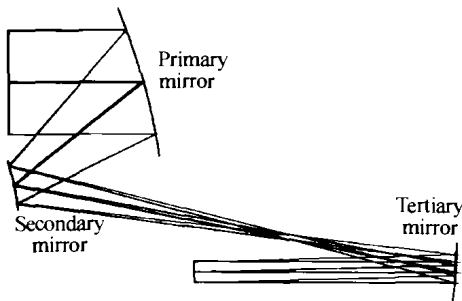


图2 离轴三反射镜系统结构图
Fig.2 Layout of off-axis three-mirror system

离轴三反射镜系统是在共轴三反射镜系统求得初始结构参数的基础上进行离轴、优化而得到的。故首先由共轴三反射镜系统求解系统的初始结构参数。全反射系统没有色差，主要有四种初级像差：球差、彗差、像散和场曲。利用三反射镜系统8个变量（三个反射面的半径 r_1 、 r_2 、 r_3 ，三个二次非球面系数 k_1 、 k_2 、 k_3 和两个间距 d_1 、 d_2 ）可对上述像差进行校正。利用高斯光学理论，可得到系统结构参数的有关公式为^[9]

$$r_1 = \frac{2}{m_2 m_3} f', r_2 = \frac{2\alpha_1}{m_3 (m_2 - 1)} f', r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1 - m_3)} f' \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{(1 - \alpha_1)}{m_3 m_2} f', d_2 = \frac{\alpha_1 (\alpha_2 - 1)}{m_3} f' \quad (8)$$

式中 α_1 、 α_2 分别为次镜对主镜的遮光比和三镜对次镜的遮光比； m_2 、 m_3 分别为次镜和三镜的放大率，当

$m_3 = \pm \infty$ 时系统的出射光束为平行光束。

求出初始结构参数后，将光阑置于第一面上，选取合适的离轴量，避免中心遮栏。在保证焦距为定值的条件下，对系统的结构参数进行优化。完成上述步骤后，可进一步提高二镜、三镜及像面离轴倾斜的成像质量。

2 设计实例及分析

本文采用在变焦系统的光接收透镜前面加上离轴三反系统，考虑目前普遍采用的第二代、第三代红外焦平面探测器对成像光谱仪系统的性能要求，具体的设计参数为总长 1060 mm，口径为 468 mm，半视场角为 0.3°， F 数为 1.93，系统光路图和各个元件结构参数如图3和表1所示。

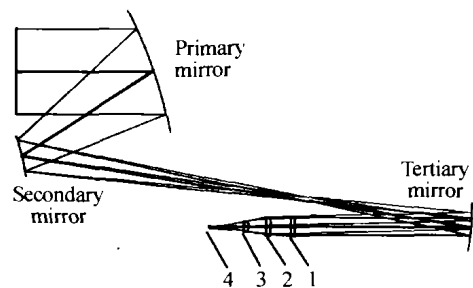


图3 含二元光学元件的成像光谱仪系统结构
Fig.3 Layout of infrared imaging spectrometer system with binary optical element

表1 系统结构参数和材料选择表

Surf: Typ	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
OBJ Standard	Infinity	Infinity	
1 Standard	Infinity	750.00000	
2 Coord Break		0.000000	
3 Standard	-1796.743	-730.0000	Mirror
4 Standard	-461.0747	1040.2697	Mirror
5 Standard	-756.8188	-480.0000	Mirror
6 Coord Break		0.000000	
7 Standard	153.4876	-9.000000	Ge
8 Binary 2	Infinity	-45.00000	
9 Standard	-122.9252	-10.00000	Ge
10 Standard	-100.2238	-39.99169	
11 Standard	-110.5371	-10.00000	ZnSe
STO Standard	-1522.639	-72.4719	
IMA Standard	Infinity		

从图4中看出，在 1 μm 光谱波段内，变焦系统单元的最小移动距离约为 12 mm，这就保证了系统能够获得足够多的光谱探测通道，并且像面保持不动，像高基本稳定。另外，如图5，此系统在 8 ~ 12 μm 的波段内具有的轴向色散宽度为 32.5 mm，根据所需要的红外焦平面探测器的分辨率和变焦系统中变焦透镜和补偿透镜的机械移动精度，完全可以在这个色差范围内确定适合的通道数和超光谱的通道宽度。

图6为设计实例最大视场的衍射包围圆能量曲线，实际上系统已达到衍射极限，各视场衍射包围圆能量曲线非常接近。从图中可以看出，设计实例

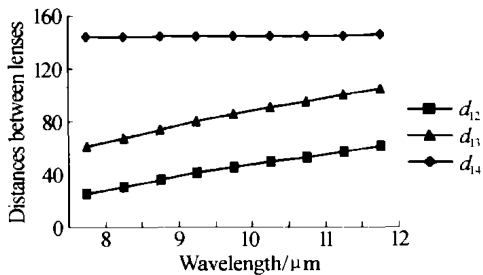


图4 随探测波长的变化系统中变焦正透镜和补偿负透镜的位移

Fig. 4 The sketch of moving distance of lens 2 and 3 changed with wavelength

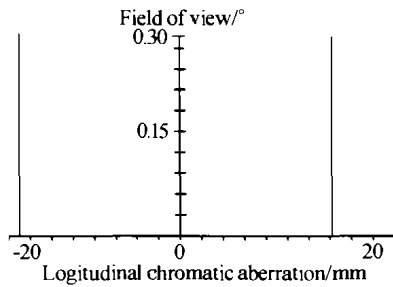


图5 8~12 μm 的波段范围内色差宽度
Fig. 5 Longitudinal chromatic aberration width of the system in 8 μm to 12 μm waveband

80% 能量集中在径向距离仅为 25 μm 的范围内. 表 2 为目前普遍采用的第二代、第三代红外焦平面探测器典型产品的部分性能指标,从表中可以看出探测器单元尺寸最小为 25 × 25 μm²,最大为 30 × 30 μm²,因此成像光谱仪光学系统的分辨率应不小于 30 μm,即空间频率应不小于 16.7 lp/mm,并且为了满足使用要求在此空间频率下调制传递函数一般应大于 0.3. 图 7 为设计实例的调制传递函数曲线,从图中可以看出,设计实例空间频率为 20 lp/mm 时最大视场的调制传递函数大于 0.51,充分满足表 2 中红外焦平面探测器对成像光谱仪光学系统分辨率的最大要求,即空间频率为 20 lp/mm,调制传递函数不小于 0.3;另外设计实例像面尺寸为 7.2 mm,完全适应于第二代、第三代红外焦平面探测器中 128 × 128 元规格的探测器.

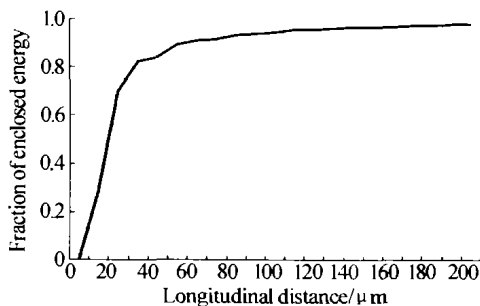


图6 系统在 10 μm 波长处的衍射包围圆能量曲线
Fig. 6 The curves of the system diffraction encircled energy in the wavelength of 10 μm

图 8 给出了系统在 8 μm 到 12 μm 的波段范围内的波前差同波长的关系曲线,从这个曲线中,能够

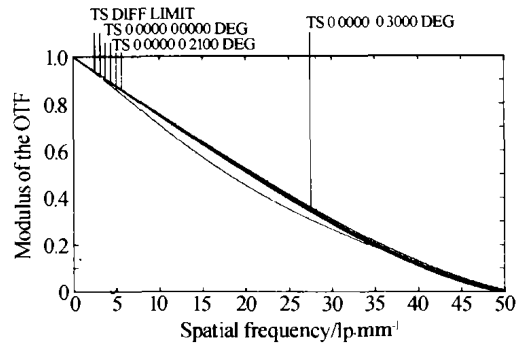


图7 系统在 10 μm 波长处的光学传递函数曲线
Fig. 7 The curves of the system MTF in the wavelength of 10 μm

表 2 第 2,3 代红外焦平面探测器典型产品的部分性能指标

红外焦平面探测器	Jade II M WIR	SCDIRM	Jade II L WIR	Sophie
工作波段/μm	3 ~ 5	3 ~ 5	8 ~ 14	8 ~ 14
探测器材料	HgCdTe	InSb	HgCdTe	HgCdTe
探测器单元尺寸/μm	25 × 25	30 × 30	25 × 25	25 × 28

看出系统在此波段范围内所有的通道的波前差都小于各个通道的中心波长的 1/4 倍,小于像质评价“瑞利判据”的标准,即当实际波面与理想波面的最大差别不超过 λ/4 时,此波面可看作无缺陷的.说明这套系统像差校正很好,具有实用性.因此从本文设计实例的 MTF 曲线和波长与波前差关系曲线等都说明系统已经达到比较理想的成像质量.

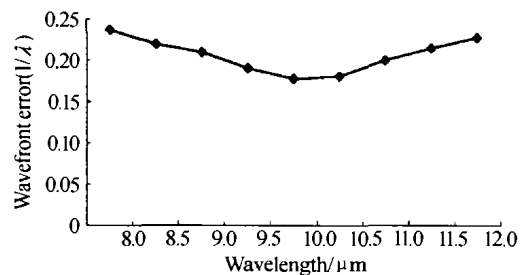


图8 波长与波前差的关系(8~12 μm 波段)
Fig. 8 The relation of wavefront error and wavelength in 8 μm to 12 μm waveband

再有由图 9 可知,对于此系统中的二元光学透镜,当台阶数为 8 时,最小特征尺寸为 11.4 μm,这样用“金刚石切削工艺”完全可以加工制作.

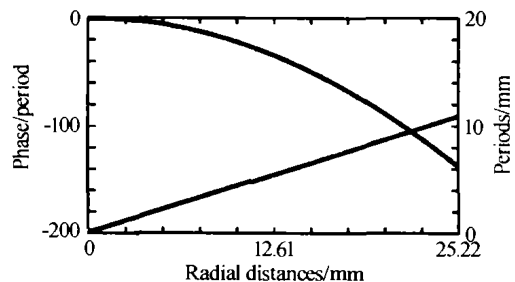


图9 BOL 的位相及周期和径向距离的关系
Fig. 9 The relationship of phase and periods with radial distances of the BOE

3 结论

本文在美国光量子中心罗姆实验室 Lyons 研究工作的基础上,为消除二元光学元件作为透射式成像元件导致的焦距随波长的变化而变化,造成的像元配准误差及系统集光能力随入射波长变化的缺陷,提出了将三反射镜系统与具有二元光学透镜的变焦距系统相结合新的技术方案.并在此理论的指导下设计了一套红外离轴成像光谱仪光学系统,该系统集折射、反射和衍射于一体,其空间频率为 20 lp/mm 时 MTF 超过 0.51,充分满足红外焦平面探测器对成像光谱仪光学系统分辨率的要求,像面尺寸为 7.2 mm,适用于第二代、第三代红外焦平面探测器中 128 × 128 元规格的探测器.且在整个热红外波段,波前差都小于各个通道的中心波长的 1/4 倍,小于像质评价“瑞利判据”的标准,具有很好的消像差特性.

参考文献

- Wallance M P, Enmark H T. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS), *Proc of SPIE*, 1987, **834**:166 ~ 174
- Rockey D E. High resolution imaging spectrometer (HIRIS) a major advance in imaging spectrometry. *Proc of SPIE*, 1990, **1298**:93 ~ 104
- Lyons D. Image spectrometry with a diffractive optic. *Proc of SPIE*, 1995, **2480**: 123 ~ 131
- 金国藩,严瑛白,等.二元光学.北京:国防工业出版社.1998.181 ~ 210
Jin Guofan, Yan Yingbai, et al. Binary optics, Beijing: National defence industry press, 1998. 181 ~ 210
- 刘玉玲,卢振武,任智斌,等.亚波长衍射微透镜的设计.光子学报,2004, **33**(1):81 ~ 84
Liu Y L, Lu Z W, Ren Z B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):8 ~ 84
- Hinnrichs M, Massie M. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics, *Proc of SPIE*, 1997, **3118**:194 ~ 205
- 赵秋玲,王肇圻,全薇,等.用于复色哈特曼人眼波像差测量的折/衍混合调焦系统.光子学报,2004, **33**(3):342 ~ 345
Zhao Q L, Wang Z Q, Quan W, et al, *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3):342 ~ 345
- 陶纯堪,等.变焦距光学系统设计.北京:国防工业出版社.1989
Tao Chunkan, et al. Zoom system design, Beijing: National defence industry press. 1989
- 胡炳梁,曹剑中,熊仁生,等.变焦距镜头组的自适应调焦的实现.光子学报,2003, **32**(8):1004 ~ 1006
Hu B L, Cao J Z, Xiong R S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):1004 ~ 1006
- 常军,翁志成,等.长焦距空间三反光学系统的设计.光学精密工程,2001, **9**(4):315 ~ 318
Chang J, Weng Z C, et al. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(4):315 ~ 318

Design of Off-axial Optical System for Binary Optic Infrared Imaging Spectrometer

Yang Xinjun¹, Wang Zhaoqi¹, Sun Qiang², Mu Guoguang¹

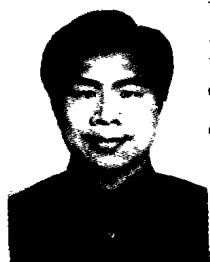
¹ United academy of Nankai University and Tianjin University, Institute of Modern Optics, Nankai University, The Key Laboratory of Opt-electronic Information Science and Technology, MOE, Tianjin 300071

² State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022

Received date:2004-02-24

Abstract On the basis of analyzing the design theory of infrared imaging spectrometer based on binary optical element (BOE), in order to eliminate the limitation, which the focal length vary with incidence wavelength in infrared optical system with binary optical component as transparent imaging element, the hybrid refraction/diffraction zoom optical system combining the off-axial three-mirror reflective system is introduced. Furthermore, arming at the principle of infrared hot detection of military objects, the concretely design example of infrared imaging spectrometer was given. The design results show that The system possesses simple structure, high acceptance of light energy, long back-working distance, and better aberration correction. In addition, the system has lower requirements for materials and higher detection precision to infrared focal plane of the stare array detector.

Keywords Infrared imaging spectrometer; Binary optics; Zoom optical system



Yang Xinjun was born in 1969, received his B. S. degree from Hebei University in 1993 and his M. S. degree from Nankai University in 2002. At present, he is a Ph. D candidate in the Institute of Modern Optics, Nankai University. His research interests include optical design and binary optics.