

折/衍混合多光谱红外成像光谱仪离轴系统设计*

杨新军,王肇圻,母国光

(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)

摘要:采用二元光学透镜作为分光元件的多光谱成像光谱仪,由于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,从而引起光谱图像的像元配准误差。为改进基于二元光学透镜的多光谱成像光谱仪的性能,首次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。设计了由三片二次非球面生成的无中心遮拦的前置望远镜,该望远镜不仅有利于提高多光谱成像光谱仪的集光能力,且有利于系统的小型轻量化。同时设计了含二元光学透镜的三片型变焦距组件,用来消除多光谱成像光谱仪的像元配准误差。整个多光谱成像光谱仪系统仅有6个单片,非常简单。另外,该系统在空间频率为20 c/mm时MTF超过0.3,充分满足红外焦平面探测器对多光谱成像系统分辨率的要求,像面尺寸为7.2 mm。适用于探测单元尺寸为25 μm 、规格为128 \times 128元的红外焦平面探测器。

关键词:多光谱成像; 二元光学元件; 变焦光学系统

中图分类号: TN21; O43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)04-0379-05

Design of hybrid refractive/diffractive off-axial optical system for multispectral infrared imaging spectrometer*

YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang

(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, China)

Abstract: The magnification changing with the incident wavelength, which would bring the different spectral image matching error, is inevitable in the multispectral infrared imaging spectrometer using binary optical element (BOE) as spectro-element because its focal length changes with incident wavelength. To improve the optical performance of the multispectral infrared imaging spectrometer, the hybrid refraction/diffraction zoom optical system combining the off-axial three-mirror system is firstly put forward. The front element of multispectral infrared imaging spectrometer is an unobscured and afocal three-mirror telescope, which not only makes for enlarging the clear aperture of multispectral infrared imaging spectrom-

收稿日期: 2004-10-25; 修订日期: 2004-12-05

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60277021); 南开大学、天津大学联合研究院资助课题

作者简介: 杨新军(1969-), 男, 河北廊坊人, 博士生, 从事光学设计、二元光学和红外光学系统研究。

ter, but also reduces the size and weight. The rear elements of multispectral infrared imaging spectrometer is a hybrid refractive/diffractive three-elements zoom optical system, which eliminates the different spectral image matching error in the multispectral infrared imaging spectrometer using BOE as spectro-element. The designed system is very simple in structure. Moreover, the modulation transfer function (MTF) of the designed system is greater than 0.3 for 20 c/mm spatial frequency, which meets the resolution requirement of the stare array detector of the multispectral infrared imaging spectrometer. In addition, the image size of the designed system is 7.2 mm, which meets 25 μm detector cell and 128 \times 128 infrared detector arrays.

Key words: Multispectral imaging spectrometer; Binary optical element; Zoom optical system

0 引言

近年来多光谱成像技术发展很快, 军用、民用和商用领域对该技术的需求越来越多。多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。多光谱成像技术的主要特征是光谱带宽窄, 利用该技术可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^[1,2]。

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多光谱成像技术, 并在实际系统中得到应用^[3,4]。1995年4月美国光子中心罗姆实验室的 Lyons^[5]在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, 利用这种高光谱分辨率的多光谱图像数据, 可以根据地球表面众多物体的光谱特征精确地识别目标。另外此光谱仪光学系统简单、体积小、质量轻、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, 探测精度, 甚至混淆被探测目标。并且此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, 并提高了系统的集光能力。设计了一个应用实例, 结果表明, 这样的光学系统不仅结构简单, 具有 100% 的冷光阑效应, 而且具有优

良多光谱成像能力和光学性能。

1 设计思想

在二元光学多光谱成像仪中, 二元光学透镜既是分光元件又是成像元件^[6-8], 二元光学透镜的焦距随波长变化改变了系统的 F 数, 因此改变了系统的放大率, 即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多光谱成像系统可补偿这一缺陷^[9,10], 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, 其物像间距离为 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' 。

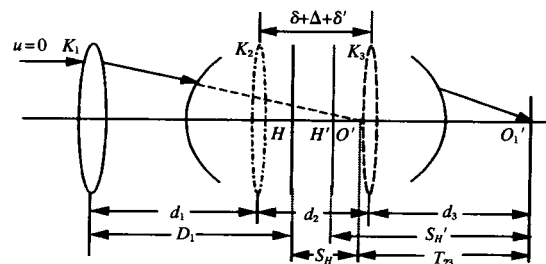


图 1 含有二元光学元件三片型变焦组元的结构示意图

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 K_2 与 K_3 的组合部分物像间距离为:

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

式中 M_2 、 M_3 分别为 K_2 和 K_3 的横向放大率;再有:

$$\delta = \frac{\phi_3 d_2}{\phi_3}, \delta' = -\frac{\phi_2 d_2}{\phi_{23}}, \Delta = d_2 + \delta' - \delta = \frac{\phi_2 \phi_3 d_2^2}{\phi_{23}} \quad (2)$$

式中 ϕ_2 是 K_2 的光焦度; ϕ_3 是 K_3 的光焦度; ϕ_{23} 是 K_2 与 K_3 的组合光焦度; d_2 是 $K_2 \sim K_3$ 的距离。另外, T_{23} 是由初始结构决定的常数。将 Δ 的表达式代入公式 (1), 得:

$$T_{23} = \left(2 - M_{23} - \frac{1}{M_{23}} \right) F_{23} - \frac{\phi_2 \phi_3 d_2^2}{\phi_{23}} \quad (3)$$

$$\phi_{23} = \phi_2 + \phi_3 - d_2 \phi_2 \phi_3 \quad (4)$$

在变焦过程中, M_{23} 随之变化, 解得:

$$d_2 = \frac{\left[-b \pm (b^2 - 4ac)^{\frac{1}{2}} \right]}{2a} \quad (5)$$

式中 $a = \phi_2 \phi_3$, $b = -T_{23} \phi_2 \phi_3$, $c = T_{23} (\phi_2 + \phi_3) - \left(2 - M_{23} - \frac{1}{M_{23}} \right)$ 。

这样每确定一次 M_{23} , 就有相应的一个 d_2 , 由于 K_1 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, 从而保持系统放大率恒定。

对于红外系统, 要求其具有强集光能力和高分辨率, 如果将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。

所以采用如图 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。

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。

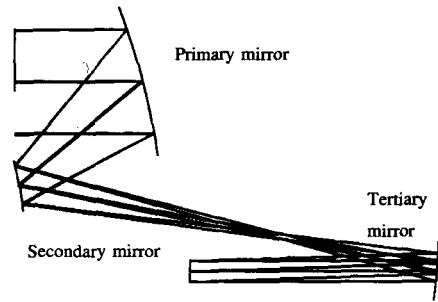


图 2 离轴三反射镜系统结构图

Fig.2 Layout of off-axial three-mirror system

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, 利用三反射镜系统八个变量 (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, 可以得到系统结构参数的有关公式为^[11]:

$$r_1 = \frac{2}{m_2 m_3} f', r_2 = \frac{2a_1}{m_3(m_2 - 1)} f', r_3 = \frac{2a_1 a_2}{(1 - m_3)} f' \quad (6)$$

$$d_1 = \frac{1 - a_1}{m_3 m_2} f', d_2 = \frac{a_1(a_2 - 1)}{m_3} f' \quad (7)$$

式中 a_1 、 a_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, 避免中心遮拦。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多光谱成像系统的性能要求, 具体的设计参数为: 总长 1060 mm, 口径 468 mm, 视场角 0.3° , F 数 2.9, 系统光路如图 3 所示, 图中的 1 为二元光学透镜、2 为变焦正透镜、3 为补偿负透镜、4 为像面, 各元件结构参数如表 1 所示。

从图 4 可以看出, 在 $1 \mu\text{m}$ 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探测通道, 并且像面保持不动, 像

高基本稳定。另外,如图 5 所示,系统在 8~12 μm 的波段内具有的轴向色差宽度为 33 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多光谱的通道宽度。

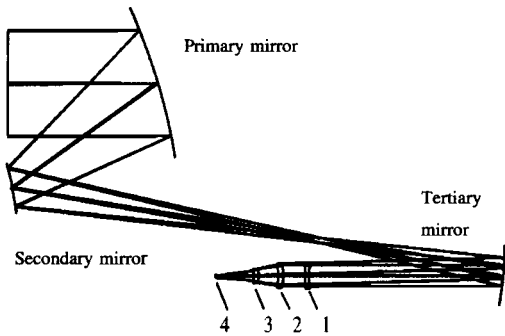


图 3 含二元光学元件的成像光谱仪系统结构图
Fig.3 Layout of infrared imaging spectrometer system with binary optical element

表 1 系统材料与结构参数

Tab.1 Constructional parameters and system materials

	Surf: type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
OBJ	Standard	Infinity	Infinity	
1	Standard	Infinity	750.00000	
2	Coord break		0.000000	
3	Standard	-1796.943	-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	Binary2	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		

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 80% 能量集中范围仅为 25 μm 。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

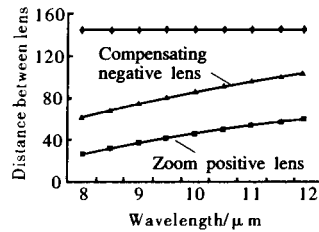


图 4 随探测波长的变化系统中变焦正透镜和补偿负透镜的位移
Fig.4 Sketch of moving distance of zoom positive lens and compensating negative lens as a function of wavelength

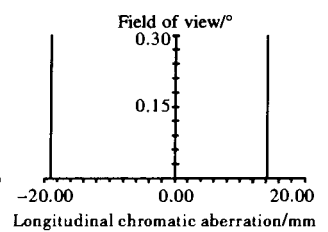


图 5 8~12 μm 的波段范围内色差宽度
Fig.5 Longitudinal chromatic aberration width of the system (8~12 μm)

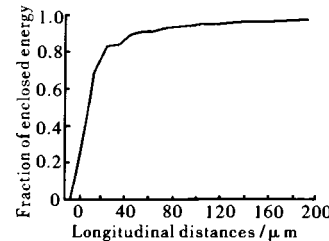


图 6 系统在 10 μm 波长处的衍射包围圆能量曲线
Fig.6 Curve of the system diffraction encircled energy (10 μm)

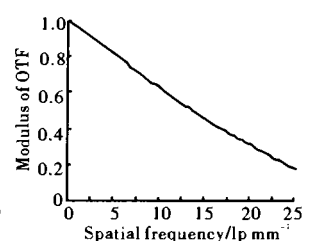


图 7 系统在 10 μm 波长处的光学传递函数曲线
Fig.7 Curve of the system MTF (10 μm)

表 2 第二代、第三代红外探测器部分性能指标
Tab.2 Part performance indexes of representative 2nd or 3rd-generation infrared detectors

Infrared detector	Jad II MWIR	SCDIRM	Jade II LWIR	Sophie
Waveband/ μm	3~5	3~5	8~14	8~14
Material	HgCdTe	InSb	HgCdTe	HgCdTe
Detector cell/ μm	25×25	30×30	25×25	25×28

指标,从表中可以看出,探测器单元尺寸最小为 25 μm ×25 μm ,最大为 30 μm ×30 μm ,因此多光谱成像系统的分辨率应不小于 30 μm ,即空间频率应不小于 16.7 c/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 为设计实例最大

视场的调制传递函数(MTF)曲线,从图中可以看出,设计实例空间频率为20 c/mm时调制传递函数大于0.3,充分满足表2中红外焦平面探测器对多光谱成像系统的分辨率最大要求,即空间频率为20 c/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8给出了系统在8~12 μm波段范围内的波前差同波长的关系曲线,可以看出系统在此波段范围内所有通道的波前差都小于各个通道中心波长的λ/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1/4时,此波面可看作无缺陷。说明这套系统像差校正很好,具有实用性。因此设计实例的MTF曲线以及波长与波前差关系曲线都说明设计系统已经达到比较理想的成像质量。

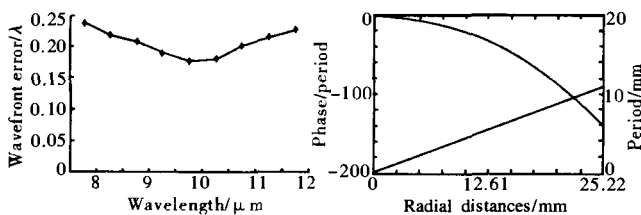


图8 波长与波前差的关系
(8~12 μm)

Fig.8 Relation of wavefront
error and wavelength
(8~12 μm)

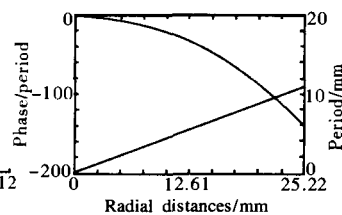


图9 BOL的位相及周期和
径向距离的关系

Fig.9 Relationship of phase,
period and radial dis-
tances of the BOL

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。

3 结论

本文从军事目标的红外热探测的基本要求出发,利用二元光学元件色差大的特性,有效地实现了红外多光谱成像的应用,本文对三反射镜系统和具有二元光学透镜的多光谱红外成像系统的设计理论进行了系统分析,并在此理论的指导下设计了一套红外离轴多光谱成像系统,该系统集折射、反射和衍射于一体,其空间频率为20 c/mm时MTF超过0.3,充分满足红外焦平面探测器对多光谱成像系统分辨率的要求,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,为设计和制造轻便实用的多光谱成像设备做了重要的工作,在军事上具有重大的实用意义。

参考文献:

- [1] WANG Huai-yi, GAO Jun. Analysis and development on aerospace infrared optical remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering (王怀义, 高军. 空间红外光学遥感器发展现状及前景分析. 红外与激光工程), 1999, 28(2): 1-6.
- [2] WANG Zhen. Development and application of multi-spectral imaging technology for satellite[J]. Space International (王臻. 卫星多光谱成像技术的发展与应用. 国际太空), 2000, 2: 26-27.
- [3] Wallace M P, Enmark H T. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[A]. SPIE[C]. 1987, 834: 166-174.
- [4] Rockey D E. High resolution imaging spectrometer (HIRIS) a major advance in imaging spectrometry[A]. SPIE[C]. 1990, 1298: 93-104.
- [5] Lyons D. Image spectrometry with a diffractive[A]. SPIE[C]. 1995, 2480: 123-131.
- [6] JIN Guo-fan, YAN Ying-bai, WU Min-xian, et al. Binary Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press (金国藩, 严瑛白, 吴敏贤, 等. 二元光学. 北京: 国防工业出版社), 1998, 181-210.
- [7] Hinrichs M, Massie M. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics[A]. SPIE[C]. 1997, 3118: 194-205.
- [8] SUN Qiang, Wang Zhao-qi, Liu Hong-bo, et al. Optical system of harmonic diffractive/refractive for infrared dual-color detector[J]. Infrared and Laser Engineering (孙强, 王肇圻, 刘宏波, 等. 应用于双色探测器的谐波衍射/折射光学系统. 红外与激光工程), 2003, 32(3): 317-321.
- [9] TAO Chun-kan. Zoom System Design[M]. Beijing: National Defence Industry Press (陶纯堪. 变焦距光学系统设计. 北京: 国防工业出版社), 1988.
- [10] WU Xiao-jing, SUN Chi-quan, MENG Jun-he. Relationship between athermalizing infrared optical system and zoom lens[J]. Infrared and Laser Engineering (吴晓靖, 孙赤全, 孟军和, 等. 红外光学系统无热差设计与变焦距镜头的关系. 红外与激光工程), 2002, 31(3): 249-252.
- [11] CHANG Jun, WENG Zhi-cheng, JIANG Hui-lin, et al. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. Optics and Precision Engineering (常军, 翁志成, 姜会林, 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.