

文章编号:1001-9014(2006)03-0170-03

大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统

常军^{1,2}, 刘莉萍¹, 王涌天¹, 翁志成², 丛小杰², 姜会林³

(1. 北京理工大学信息学院光电系, 北京 100081;

2. 中科院长春光学精密机械研究所, 吉林 长春 130022; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:军事和安全应用都需要利用红外探测技术来进行目标跟踪和搜索. 由于红外或热成像系统探测的目标辐射能量低, 因此需要光学系统具有强的集光能力; 另外, 用凝视方式可以获取大场景红外图像以去除传统的机械扫描装置, 这要求红外光学系统具有足够大的视场. 该工作研究的红外光学系统视场大于 60×3.5 度, F 数 $F/1 \sim F/2.5$. 采用了离轴三反射镜光学系统, 系统结构简单, 成像质量达到衍射极限.

关键词:红外系统; 光学设计; 离轴三反射镜光学系统; 非球面

中图分类号:004 **文献标识码:**A

DUAL-BAND INFRARED OPTICAL SYSTEM WITH LARGE FIELD-OF-VIEW AND APERTURE

CHANG Jun^{1,2}, LIU Li-Ping¹, WANG Yong-Tian¹,
WENG Zhi-Cheng², CONG Xiao-Jie², JIANG Hui-Ling³

(1. Beijing Institute of Technology, Department of Optoelectronic Engineering, Beijing 100081, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Infrared optical systems are widely applied in military and public security fields. Since the radiation energy of infrared objects is lower, the corresponding optical system must have a large numerical aperture in order to increase the system exploring sensitivity, and it also needs to provide a large field of view in order to remove the traditional scanning mechanism. This study described the optical design of an infrared system with a field of view of 60×3.5 degrees and an F-number of $F/2.5 \sim F/1$. The design is based on a fast unobscured three-mirror anastigmatic (TMA) system. The final optical system is a three-mirror unobscured system. It has a simple structure and the quality of image arrives at the diffraction-limitation at infrared wavelengths.

Key words: infrared system; optical design; three-mirror anastigmatic (TMA) system; aspherical surface

引言

近年来热(红外)成像系统的应用范围蓬勃扩展,重要性日显突出. 现在的红外光学系统绝大多数为其中某个单波段系统, 由于红外系统使用区域的不同、气候温度的改变、目标的伪装, 单一波段的系统获取的信息自然就减弱, 特别是探测目标本身的操作或者行为的改变导致辐射波段移动等原因, 使成像系统探测不到目标或者探测准确度下降. 随着遥感和精密制导技术的发展, 根据目标和背景的辐射和反射特性, 对可见光或红外光谱中二个或多个

波段的辐射进行探测和比较已显得非常重要^[1]. 因此双波段红外成像技术的优点是能在存在杂乱回波的情况下探测目标.

红外系统的这种与日俱增的重要性以及性能不断提高的探测器问世, 使得对红外光学系统及其设计的需求空前增长. 为了获得低噪声等效温差 (NETD) 测量灵敏度, 要求光学系统的相对孔径在 $F/1 \sim F/2$ 左右; 另外, 随着其集成规模的不断增加, 能够用电子扫描完全代替传统热成像仪中的机械扫描, 以凝视方式获取大场景红外图像, 这要求红外光学系统具有足够大的视场.

收稿日期: 2005-12-26, 修回日期: 2006-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60378023)

作者简介: 常军(1973-), 男, 江西吉安人, 北京理工大学光电工程系教师, 博士后, 主要从事光学仪器系统设计、光学检测等方向研究.

Received date: 2005-12-26, revised date: 2006-02-16

目前,不少国内外学者进行了双色或多色探测器的研究^[2~4],但更多的研究集中在用衍射光学元件^[5]的方法来实现.本文主要研究结构紧凑的双波段大视场红外成像系统的设计,它有两个红外波段工作的能力,另外还可以选用一个附加的可见光波段.

1 光学结构选型

光学系统位于整个仪器的最前端,功能是接收、汇聚来自目标的红外辐射.光学系统决定着整个系统工作精度,并影响仪器的作用距离,关系到系统对目标搜索、截获和跟踪能力,从而影响到整个武器系统的作战效能.本文研究的光学系统需要满足对两个红外波段的成像质量要求.同时,光学系统还应该具有最简单的形式和最少数量的光学元件,以降低成本、减轻系统重量.因此,光学系统的分析设计是热成像系统参数优化设计的一个重要内容.

适用于中长波双色的红外光学系统可分为反射式、透射式和折反射光学系统3大类.对于大视场、大相对孔径和双波段的系统来说,折反射系统因为遮拦较大而不适用.常用于大视场的折射式光学系统包括双高斯结构和反摄远结构^[6],其中双高斯镜头具有相对于孔径光阑对称的结构,为了满足大相对孔径的要求,需要复杂化的双高斯结构型式;对于反摄远结构,后截距长于有效焦距,便于在像面之前可实现插入滤光片和分束器等光学元件,满足各种不同的使用场合,这种结构通过复杂化后透镜组来满足校正像差,目前较多地用于可见光波段的大视场光学系统.两种折射系统的共同缺点在于结构复杂,尤其是对于大口径的双波段光学红外系统,均匀性好的材料很难获取,材料种类少,价格昂贵,色差校正十分困难.虽然可以考虑采用衍射光学元件来满足色差校正的要求,但衍射效率一直是影响系统成像质量的瓶颈.而反射镜在红外波段具有高反射率,且无色差,材料选择简单,对温度等环境因素变化的适应性强,因此需要大力发展全反射的光学系统.

此类系统可以分为:两反射镜光学系统、四反射镜光学系统、共轴消像散(TMA)系统和偏轴消像散(TMA)系统.其中两反射镜光学系统的结构型式简单,但系统自变量少,视场角很小,无法满足大视场系统的要求;四反射镜光学系统的像质好,有实出瞳和视场光阑,但系统光机结构复杂,且第3、4镜尺寸较大,视场较小,也难符合本系统的要求;对于同轴

消像散(TMA)系统,在大相对孔径条件下,次镜的遮拦对整个系统的成像质量产生很大的影响,严重影响辐射能量利用率,也不符合要求;因此对于大孔径、大视场系统采用偏轴消像散(TMA)系统成为最好的选择,系统的自变量多达8个,可以达到较大视场,具有相对松的加工、装调公差.可消除除畸变外的所有3级像差,通过使用非球面高次项可以降低光学系统的高级像差,从而能够保证系统取得优质的像质.

2 光学设计结果

宽谱段光学系统的设计是光学仪器实现的一项关键技术,根据设计要求和所选用的探测器,光学系统要满足如下技术指标:

- 1) 波段:中波红外、长波红外;
- 2) 动态视场角: $\pm 30^\circ$;
- 3) 光学系统像差小,接近衍射极限.

另外,光学系统的设计需要使光学系统的透过率和通光面积较大,以保证系统工作距离,光学系统外形尺寸应符合总体要求.基于对所有可能的大视场三反结构进行初始结构分析,我们选择了负正正结构形式的反射远型.本文设计要求的参数要求见表1.

此设计要求使用波段为两个谱段的红外波段,在此使用了离轴三反射系统,探讨了这种大孔径大视场在红外光学系统中的应用.图1为系统三维结构,系统各非球面光焦度分布为负正正.图2为传递函数曲线,在20LP/mm时达到0.62(衍射极限为0.66).图3为系统各视场、全谱段衍射能量分布图,从各个图中可以得出,系统在整个谱段和视场内成像质量接近衍射极限,而且系统体积小,结构紧凑.

表1 光学系统参数

Table 1 The parameters of optical system

系统焦距(mm)	80 - 120	
视场($^\circ$)	60 \times 3.5 Deg	
F数	2 - 2.5	
光谱范围(μm)	0.486 ~ 0.7 ; 3 - 5 ; 8 - 12	
平均传递函数(20 LP/mm)	0.758 (MTF 衍射极限 0.86)	
非球面参数	主镜	$k = -2.3$; 4th order
	次镜	$k = -2.85$; 6th order
	三镜	$k = -1.51$; no high order
最大非球面偏离量	主镜	0.044mm
	次镜	0.03mm
	三镜	0.025mm
非球面尺寸(mm)	主镜	202
	次镜	80
	三镜	160



图1 系统三维结构图
Fig. 1 System 3D Layout

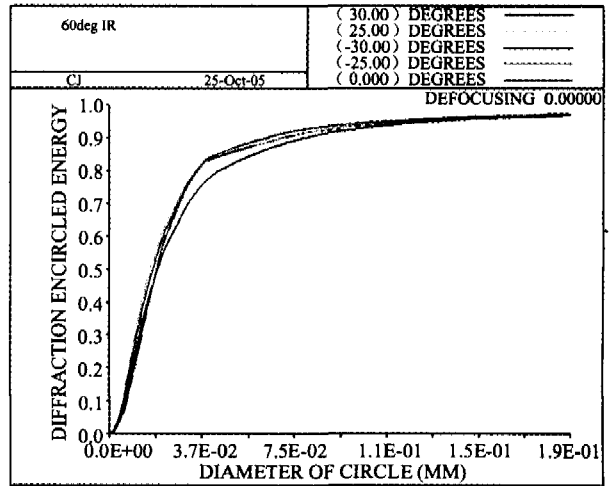


图3 各视场、全谱段衍射能量分布图
Fig. 3 The Encircled Energy curve of every field and all spectrum band

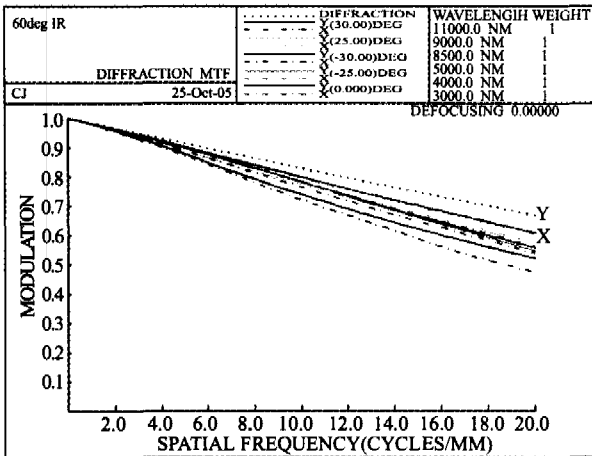


图2 各视场、全谱段传递函数曲线图
Fig. 2 The MTF curve of every field and all spectrum band

为了让系统在全视场范围内达到接近衍射极限的要求,主镜和第三镜采用了离轴的非球面反射镜.这些反射镜可以考虑用金刚石车削的方法加工,然后从母镜中截取.为了保证单点金刚石车削能用于非球面元件表面的成形,需要注意非球面偏离量的不应过大,并使得能量散射尽可能小.

3 结论

随着遥感和精密制导技术的发展,根据目标和背景的辐射和反射特性,对可见光或红外光谱中的2个或多个波段的辐射同时进行探测和比较已显得非常重要,对相应的光学系统及其设计的需求空前增长.

本文研究的光学系统一个显著特点是光学系统中所有光学元件均采用非球面镜,具有结构紧凑、使用元件数量少、体积重量小等优点.通过对光学系统的参数优化设计,性能接近于衍射极限,得到的光学系统在两个红外波段均具有良好的像质,获得了性能、指标适用于凝视式非致冷大面阵探测器的摄远物镜,可望与低成本的新一代非致冷探测器构成性能优异的热像仪.如果在系统中使用自由曲面,将有可能将进一步提高质量.

本文设计实例适合安放在空间对地遥感、航空摄影等领域上,或将其置于低轨道卫星上,以凝视方式监测整个地球的热红外辐射.

REFERENCES

- [1] Ried MJ. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems* [M]. Washington: SPIE Press, 2001.
- [2] Wood A P, Rogers O J. Hybrid optics indual waveband infrared systems [J]. *Proc. SPIE*, 1998, **3482**:602—613.
- [3] Zhang Qi. The Study of dual-band imaging system and fusion technology [J], *SPIE*. **3561**,189—195.
- [4] Hau Ming Huang, Nei Chueh Wang. Two waveband (3-Sum and 8-12um) thermal imaging system, [J], *SPIE*, 1992, **1814**,119—129.
- [5] Weng Zhi-Cheng, Lu Zhen-Wu. Lightweight remote sensing CCD camera with binary optical element [J]. *Proc. SPIE*, 1998, **3482**:616—626.
- [6] WANG Yong-Zhong. CAD of lw IR and mw IR fish-eye lens, [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王永仲, 长波及中波红外鱼眼镜头的计算机设计, *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):455—458.