

制冷式红外双波段共光路折衍混合摄远物镜设计

张 宇 王文生

(长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022)

摘要 针对远程红外目标探测的需求,为提高光学系统在复杂环境下的探测能力,设计了制冷式红外双波段共光路折衍混合摄远物镜。摄远物镜的工作波段为红外中波(3~5 μm)及红外长波(8~12 μm),采用透射式共光路结构,由物镜和中继镜组成。摄远物镜焦距为-200 mm, F 数为 2.8,全视场角为 3.2°。探测器选用 2/3 inch(1 inch=25.4 mm)的 HgCdTe 红外中波焦平面阵列,分辨率为 320 pixel \times 256 pixel,像元尺寸为 30 μm 。该摄远物镜像质优良,在截止频率为 17 lp/mm 时,红外中波各视场的调制传递函数(MTF)值超过 0.5,红外长波的 MTF 值超过 0.3;各视场点列图均方根半径均远小于艾里斑半径;实现了 100%冷光阑效率。该红外摄远物镜可用于坦克红外观瞄等系统。

关键词 光学设计;摄远物镜;红外双波段;共光路;折衍混合;目标探测

中图分类号 TN21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0522006

Design of Cooled Infrared Dual-Band Common Path Refractive-Diffractive Telephoto Objective

Zhang Yu Wang Wensheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Aiming at the needs of remote infrared target detection, for improving the detection ability of optical system in a complex environment, the cooled common path infrared dual-band refractive-diffractive telephoto objective is designed. The working wave-band of the telephoto objective covers the infrared medium-wave (3~5 μm) and infrared long-wave (8~12 μm). A transmission common path structure is used in this telephoto objective. The telephoto objective consists of objective and relay lens. The focal length of the telephoto objective is -200 mm, the F number is 2.8, and the full field of view is 3.2°. The detector adopted is HgCdTe mid-wave infrared focal plane array of 2/3 inch (1 inch=25.4 mm). Its resolution is 320 pixel \times 256 pixel and pixel size is 30 μm . The image quality of this telephoto objective is prefect. At cut-off frequency of 17 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) of the infrared medium-wave is greater than 0.5 for each field of view, and the MTF of the infrared long-wave is greater than 0.3 for each field of view. The root mean square radius of spot diagram for the each field of view is much smaller than Airy disk radius. The cold shield efficiency is 100%. This infrared telephoto objective can be used in the observation-aiming system of the tank.

Key words optical design; telephoto objective; infrared dual-band; common path; refractive-diffractive hybrid; target detection

OCIS codes 220.3620; 110.3080; 220.2740

1 引 言

随着现代军事技术的发展,对目标进行全天候的探测和识别的要求越来越高,因此红外探测技术

成为研究热点。现有的红外光学系统绝大多数是针对某个波段而设计的,探测信息量不足。利用红外双波段光谱同时探测目标的红外辐射是提高现有军

收稿日期: 2012-12-20; **收到修改稿日期**: 2013-01-27

基金项目: 总装备部预研局十二五项目资助课题。

作者简介: 张 宇(1987—),女,博士研究生,主要从事现代光学设计方面的研究。E-mail: kitty131@foxmail.com

导师简介: 王文生(1943—),男,教授,主要从事现代光学设计和现代光学测试技术等方面的研究。

E-mail: wwsciom@163.com(通信联系人)

事装备侦查能力的重要手段,红外双波段成像技术的优点是能在存在杂乱回波的复杂环境和混乱背景下实现高精度及高分辨率的目标探测和识别。因此,红外双波段成像技术的研究对军事领域和民用技术发展均有重大意义^[1,2]。

国外早在 20 世纪 70 年代就对红外双波段成像系统进行了研究,并且已经用于军事实战中^[3]。近年来,虽然红外双波段探测器在国内还非常罕见,但是研究人员已经对红外双波段光学系统进行了设计和研究。文献[4]报道了工作波段为 3.7~4.8 μm 和 7.7~9.5 μm 的红外双波段折衍混合光学系统研究,但该系统的红外长波波带范围较窄,部分信息易丢失,且焦距较短(约 70 mm),探测距离有限。文献[5]报道了工作波段为 3.4~4.2 μm 和 8~11 μm 的红外双波段折衍混合光学系统,但是该系统中使用了双透镜双层衍射光学元件,工艺复杂,调校困难,不易实现。文献[6]给出了卡塞格林式红外双波段光学系统,这种光学结构使得光束的中心部分被遮拦,导致系统分辨率下降,接收的能量减少,且不易装调。上述文献中的红外双波段系统都是基于非制冷红外探测器进行设计的,无法用于制冷式红外探测器。相比非制冷式红外探测器,制冷式探测器的信噪比要高出 1~2 个数量级^[3,7]。

本文针对坦克红外观瞄镜的总体设计要求,设计了一种制冷式共光路红外双波段折衍混合摄远物镜,其工作波段为 3~5 μm 和 8~12 μm 。该摄远物镜由物镜和中继系统组成,在保证具有较高 F 数的同时有效地减小了系统的横向尺寸,并实现了 100%冷光阑效率,使光能损失降到最低。采用非球面和二元衍射技术,使像质优良。

2 制冷式红外双波段摄远物镜主要参数

制冷式红外双波段摄远物镜要求对红外中波和长波具有相同的后截距,即有共同的成像焦平面。法国 Sofradir 公司研制的制冷式红外双波段焦平面阵列可以在同一焦平面上实现红外双波段的探测。但是目前国内没有红外双波段焦平面探测器,所以选择制冷式 HgCdTe 红外中波焦平面探测器,其分辨率为 320 pixel \times 256 pixel,像元大小为 30 μm ,工作温度为 90 K,冷光阑位于像面前 19.775 mm 处,保护玻璃位于像面前 24.375 mm 处。摄远物镜的工作波段为红外中波 3~5 μm 和红外长波为 8~12 μm ,焦距 $f' = -200$ mm。根据总体设计要求,相对孔径 $D/f' = 1:2.8$ 。在该相对孔径下,摄远物镜的红外中波截止频

率为 73 lp/mm,红外长波截止频率为 29 lp/mm,远远大于探测器的截止频率 17 lp/mm,并能够保证足够的像面照度及合理的横向尺寸。

3 光学系统设计

3.1 衍射元件消色差原理

由于红外双波段摄远物镜的波长带宽较宽,双波段可选择的红外材料有限,采用常规方法校正红外摄远系统的色差是非常困难的。随着数控机床和金刚石车削加工技术的进步,可以采用金刚石车削的方法来加工衍射元件校正色差,同时减小系统的体积^[8~10]。

采用折衍混合透镜实现消色差,就是利用衍射元件特殊的色散性质,用单个折衍射混合透镜实现消色差。所要求的折衍射混合单透镜的光焦度为 K ,基底折射透镜的光焦度为 K_R ,材料的阿贝数为 ν_R ,衍射光学元件承担的光焦度为 K_D ,阿贝数为 ν_D ,为了实现消色差,需满足公式:

$$\begin{aligned} K_R + K_D &= K \\ \frac{K_R}{\nu_R} + \frac{K_D}{\nu_D} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

对(1)式求解,得折射透镜和衍射光学元件的光焦度分别如下:

$$K_R = \frac{\nu_R}{\nu_R - \nu_D} K, \quad (2)$$

$$K_D = \frac{\nu_D}{\nu_D - \nu_R} K. \quad (3)$$

由于衍射光学元件具有负色散特性,可以采用衍射光学元件与普通玻璃组合实现复消色差。因为采用单个折射元件和衍射光学元件组合用于复消色差时,二级光谱将大于任何一个双胶合透镜的二级光谱,而且这个二级光谱的符号与双胶合透镜的符号相反,所以多采用两个折射元件与衍射光学元件组合用于校正长焦光学系统的二级光谱,其满足如下关系:

$$\begin{aligned} K_{R1} + K_{R2} + K_D &= K \\ \frac{K_{R1}}{\nu_{R1}} + \frac{K_{R2}}{\nu_{R2}} + \frac{K_D}{\nu_D} &= 0 \\ \frac{K_{R1}}{\nu_{R1}} P_1 + \frac{K_{R2}}{\nu_{R2}} P_2 + \frac{K_D}{\nu_D} P_D &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 P_1, P_2 分别为第一、二了折射元件的相对色散, P_D 为衍射光学元件的相对色散。对(4)式求解,得各个元件的光焦度分别为

$$K_{R1} = \frac{K\nu_{R1}(P_2 - P_D)}{X}, \quad (5)$$

$$K_{R2} = \frac{K_{v_{R2}}(P_D - P_1)}{X}, \quad (6)$$

$$K_D = \frac{K_{v_D}(P_1 - P_2)}{X}. \quad (7)$$

其中

$$X = v_{R1}(P_2 - P_D) + v_{R2}(P_D - P_1) + v_D(P_1 - P_2), \quad (8)$$

相比于传统消色差方法,采用衍射元件消色差可以省掉一片负透镜,从而减小折射透镜承担的光焦度,使其半径增大,有利于其他像差的校正并节省材料成本,并能减轻系统重量。此外由于衍射光学元件具有阿贝数小于零的特性,可以只用普通玻璃进行复消色差,实现二级光谱的校正。特别是对玻璃适用种类较少的红外及紫外波段的系统,可以避免使用难以加工的或稀少昂贵的大色散材料进行校正色差及二级光谱^[11,12]。

在 Zemax 软件中,通过改变光学元件表面的相位来改变光线的传播方向,实现衍射元件的设计。对于轴对称衍射表面,衍射光学元件的相位可表示为

$$\Phi = M \sum_{i=1}^N A_i \rho^{2i}, \quad (9)$$

式中 N 表示多项式系数的个数, A_i 是 ρ^{2i} 的系数, ρ 为孔径坐标系的规划半径, M 为衍射级次。

3.2 二次成像系统原理

由于光瞳衔接原则的限制,在采用制冷式红外探测器进行红外光学系统设计时,探测器本身具有的冷光阑决定了光学系统的出瞳位置和大小。为了满足光瞳衔接原则,使系统具有 100% 冷光阑效率,设计时要使光学系统的孔径光阑和探测器的冷光阑重合,否则会造成光束切割降低系统的灵敏度,或使额外的杂散热辐射射入到探测器上,降低系统的信噪比。如果直接将摄远物镜的孔径光阑置于探测器冷光阑上,会造成系统的横向尺寸过大,使系统体积过大并浪费红外光学材料。

二次成像系统是由摄远物镜组和中继镜组组成的,其系统示意图如图 1 所示。

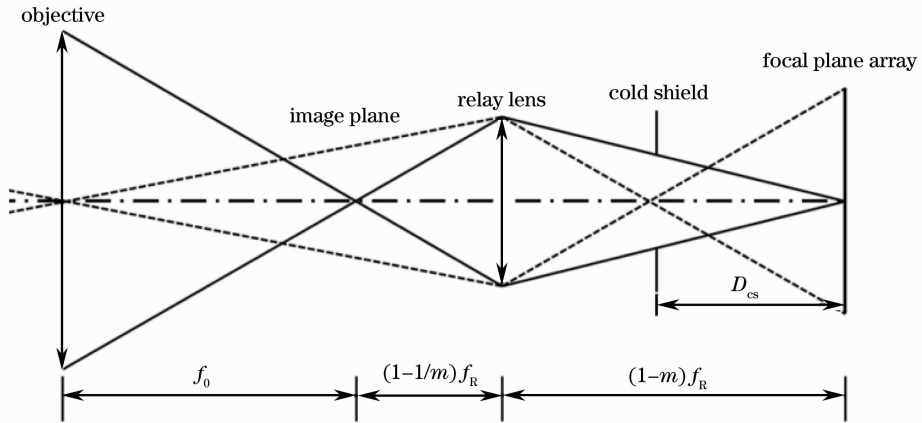


图 1 二次成像光学系统示意图

Fig. 1 Schematic drawing of a re-imaging optical system

摄远物镜组和中继镜之间的近轴关系为

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{f^2(L - D_{cs})}{LD_{cs} + f^2 - 2fD_{cs}} \\ f_R &= \frac{fD_{cs}(L - D_{cs})}{(D_{cs} - f)^2}, \quad (10) \\ m &= \frac{LD_{cs} + f^2 - 2fD_{cs}}{f(L - D_{cs})} \end{aligned}$$

式中 f 为系统焦距, L 为光学系统总长, m 为中继系统的垂轴放大倍率。对中继镜有如下设计要求:使系统具有 100% 冷光阑效率;校正红外探测器光敏面保护玻璃的像差,平衡摄远物镜的残余像差^[13,14]。由于上述条件的限制,使得中继镜的结构十分复杂。文中

采用 4 片结构来实现中继镜的设计。

3.3 制冷式共光路二次成像红外双波段折射衍射摄远系统设计

3.3.1 初始结构选择

由于所设计制冷式共光路二次成像红外双波段折射衍射摄远系统采用制冷式红外探测器,在距离制冷红外探测器光敏面 24.375 mm 处有 1 mm 厚的保护玻璃,而冷光阑位于保护玻璃后 3.6 mm 处,光敏面位于冷光阑后 19.775 mm 处。为了使冷光阑效率达到 100% 并且使所设计的系统体积紧凑,在设计时采用二次成像技术使双波段摄远系统的光阑与探测器的冷光阑重合,即摄远系统的光阑位于

像面前 19.775 mm 处,并且把探测器的保护玻璃也加入系统中一起进行像差校正。系统采用双波段共光路的设计结构,红外长波和红外中波两个波段的焦距均为-200 mm,并且双波段共焦面,它们的后截距均为 19.775 mm,满足探测器的要求。

摄远系统的物镜组采用“负、正、负、负”的结构形式,构成焦距为 264 mm 的摄远物镜,并且在第 4 个透镜后 117.365 mm 处实现第一次成像。在一次像面后 14.507 mm 处放置中继镜组。为减小系统的尺寸,中继镜的焦距较短,为 46 mm,与物镜组成焦距为-200 mm 的摄远系统。并且将组合系统的孔径光阑置于探测器的冷光阑上,以实现 100% 的冷光阑效率,提高光能利用率并且减小系统的横向尺寸。在相对口径不变的情况下,系统的横向尺寸减小了 30%。中继镜组的出瞳即冷光阑为 8.1 mm,中继镜组的入瞳与物镜组的出瞳相重合,满足了光瞳衔接原则;像方线视场为 11 mm,以满足红外 CCD 的探测元的面积;横向放大倍率为-0.77 倍,以使摄远物镜与中继镜视场嵌接。中继镜组采用“负、正、负、正”的结构形式,便于自身像差相互补偿,降低了像差校正的难度。同时留有残余像差,便于优化设计时对物镜组的残余像差进行补偿。

3.3.2 像差的校正

摄远物镜分为物镜组和中继镜,因此在优化设计时对物镜组和中继镜的像差进行综合校正,即用中继镜的像差去补偿物镜组的残余像差。为了更好地校正系统的球差,减小系统的体积,摄远系统的物镜组的第 3 个面采用非球面技术。以椭球面为基面,圆锥系数 $c=1.093$,非球面系数为 $\alpha_2=-8.147 \times 10^{-5}$, $\alpha_4=-1.652 \times 10^{-7}$, $\alpha_6=-6.399 \times 10^{-11}$ 。

在用 Zemax 软件设计时采用多重结构的方法,将红外中波段和红外长波段同步优化。优化时为保证双波段工作共焦面,设定双波段具有共同的后截距,并在共焦面位置处评价其像质,即调制传递函数(MTF)。由于红外长波段携带的信息量约为红外中波段的 15 倍,所以在优化设计时主要消除长波段的色差同时减小中波段的色差。

由于波带宽且焦距长,红外双波段摄远物镜的色差校正和二级光谱减小是设计的难点。减小二级光谱的方法主要有选用低色散光学材料或者使用衍射光学元件。但是红外中波光学系统可用的光学材料本身就非常少,不易找到合适的低色散红外光学材料来消除系统的二级光谱。为了校正色差和减小二级光谱,物镜组和中继镜组均选用 Ge、ZnS 和

AMTIR1(锗、砷和硒的混合材料)三种不同的材料,此外且使用正负透镜相匹配的方法,使得系统的色差得到校正。并在物镜组的第 5 面(第 3 片透镜前表面)上设置了非球面衍射面,透镜基底材料选用宽光谱硫化锌,并采用 1 阶衍射。圆锥系数 $c=7.153$,非球面系数为 $\alpha_2=-7.256 \times 10^{-6}$, $\alpha_4=-2.785 \times 10^{-7}$, $\alpha_6=7.969 \times 10^{-11}$, $\alpha_8=-9.469 \times 10^{-16}$, $\alpha_{10}=-4.225 \times 10^{-17}$, $\alpha_{12}=4.951 \times 10^{-21}$,衍射系数为 $A_2=-263.654$, $A_4=-407.850$, $A_6=-2445.796$, $A_8=-1.398 \times 10^4$ 。

4 设计结果与分析

按照光学系统的设计指标,结合像差理论,利用光学设计软件 Zemax 对初始结构进行了优化设计,最终的总体设计结构如图 2 所示。红外长波段的近轴后截距为 19.997 mm,红外中波段的近轴后截距为 20.005 mm,相差仅为 0.008 mm,满足共焦面要求,经优化在 19.775 mm 位置达到双波段共焦面的最佳像质位置。如图 3 所示,在空间频率为 17 lp/mm 处,红外中波 3~5 μm 及红外长波 8~12 μm 的调制传递函数接近衍射极限,分别大于 0.5 和 0.3,像质优良,满足像差设计要求。由图 4 的色差曲线可知摄远物镜在长波段成功地消色差,仅留下少量的二级光谱色差,大小约为 0.05 mm,在红外中波段留下少量色差,在 0.7 带约为 0.07 mm。

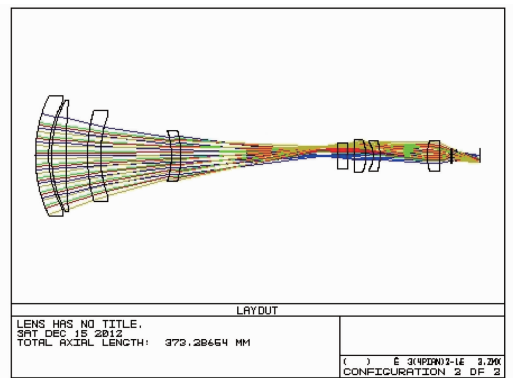


图 2 红外双波段共光路折衍混合摄远物镜结构图

Fig. 2 Structure diagram of infrared dual-band common path refractive-diffractive telephoto objective

图 5 为该系统中衍射面的相位及周期同径向距离的关系。衍射面的线频率最大为 0.676758 Periods/mm,对应最小周期线宽为 1.47763 mm。若每周期刻蚀 16 个台阶,对应的最小特征尺寸为 92.352 μm ,可以满足金刚石加工衍射面的工艺要求。

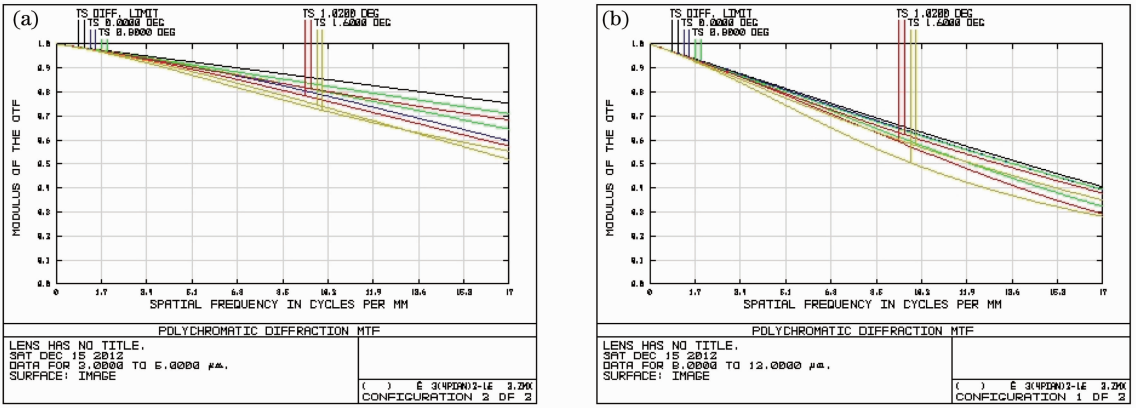


图3 红外双波段共光路折衍混合摄远物镜调制传递函数曲线。(a) 3~5 μm 波段 MTF；(b) 8~12 μm 波段 MTF
 Fig.3 MTF of infrared dual-band common path refractive-diffractive telephoto objective. (a) MTF of 3~5 μm wave-band; (b) MTF of 8~12 μm wave-band

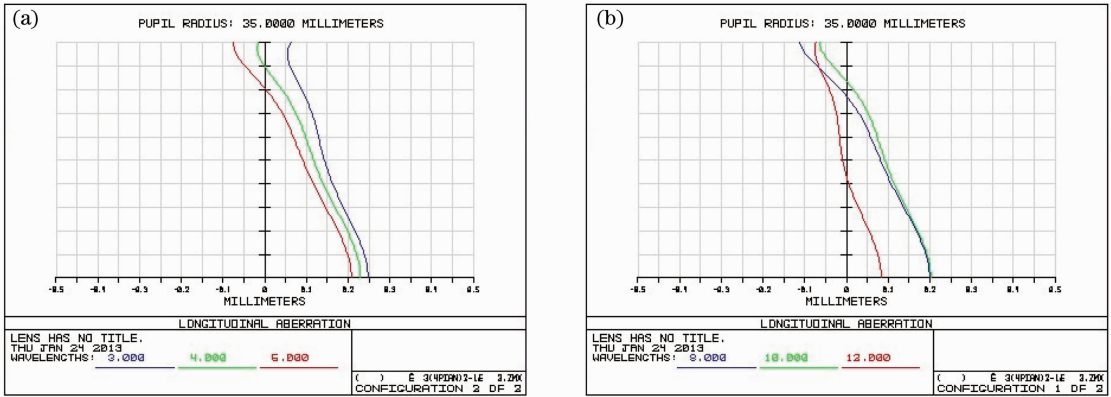


图4 红外双波段共光路折衍混合摄远物镜色差曲线。(a) 3~5 μm 波段色差曲线；(b) 8~12 μm 波段色差曲线
 Fig.4 Chromatic of infrared dual-band common path refractive-diffractive telephoto objective. (a) Chromatic of 3~5 μm wave-band; (b) chromatic of 8~12 μm wave-band

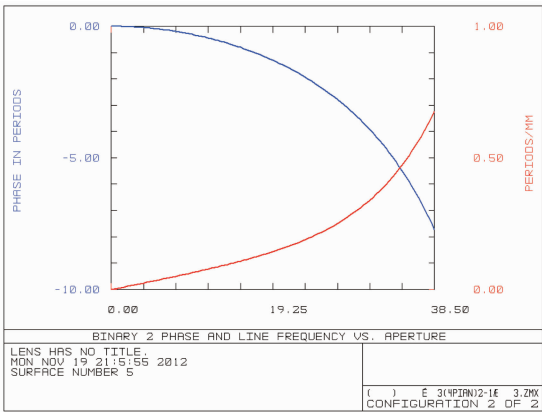


图5 衍射面的相位及周期同径向距离的关系

Fig.5 Relationship of phase and periods with radial distances of the diffractive surface

通过对以上的设计结果进行分析可以得出,所设计的制冷式红外双波段共光路折衍混合摄远物镜能够对远距离目标实现红外双波段探测,并具有较好的成像质量。由图3可知,在截至频率为17 lp/mm时,

红外长波波段的 MTF 值(0.3)比红外中波波段的 MTF 值(0.5)小,这是由于红外长波波段的理论艾里斑直径是红外中波的2.5倍,导致红外长波波段的截至频率比红外中波小2.5倍,故在截至频率为17 lp/mm时,红外长波段的 MTF 值略小,其理论 MTF 值仅有0.4[见图3(b)中曲线]。但在兼顾红外中波段 MTF 时同时,进一步提高红外长波波段的 MTF 值仍然是有待改进之处。在不增加透镜的条件下,增加非球面数或许是最佳方案之一。

5 结 论

针对坦克红外观瞄镜的观瞄需求,设计了制冷式共光路红外双波段折衍混合摄远物镜,使摄远物镜的孔径光阑和探测器的冷光阑重合,实现了100%的冷光阑效率,提高了系统探测灵敏度。采用二次成像技术,在相对口径不变的情况下,系统横向尺寸减小了30%。通过加入一个非球面和一个二

元面校正了摄远物镜的高级像差和色差,使系统的结构紧凑。该系统孔径大,焦距长,分辨率高,红外中、长波段的各个视场的MTF分别大于0.5和0.3,像质优良。该红外摄远物镜也可用于其他红外观瞄系统。

参 考 文 献

- Zhang Xingde, Li Ronggang, Liu Lin *et al.*. Research and development of dual-band infrared camera system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(8): 801~804
张兴德, 李荣刚, 刘琳等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(8): 801~804
- Chang Jun, Liu Liping, Wang Yongtian *et al.*. Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(3): 170~172
常军, 刘莉萍, 王涌天等. 大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(3): 170~172
- Wang Haitao, Geng Anbing. Unified infrared image optical system of dual spectral [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 489~492
王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(3): 489~492
- Liu Huanyu, Zhang Liang, Liu Yu *et al.*. Optical design of a dual-band infrared system based on harmonic diffraction [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, **18**(5): 50~53
刘环宇, 张良, 刘玉等. 红外双波段谐波衍射光学系统设计[J]. *光电与控制*, 2011, **18**(5): 50~53
- Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao *et al.*. The design of infrared dual-band double layer harmonic diffractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1266~1270
范长江, 王肇圻, 吴环宝等. 红外双波段双层谐波衍射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1266~1270
- Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli *et al.*. The design of cassegrain optic system for double infrared wavebands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(40): 463~465
樊学武, 马臻, 陈荣利等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计[J]. *光子学报*, 2003, **32**(40): 463~465
- He Hongxing, Zhao Jinsong, Pan Shunchen. Common-aperture optical system for MWIR/SWIR polarization imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 932~936
何红星, 赵劲松, 潘顺臣. 工口径中波/短波偏振红外成像光学系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 932~936
- Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2383~2386
薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2383~2386
- Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1364~1367
焦明印, 冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外光学系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1364~1367
- Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of infrared (IR) hybrid refractive-diffractive lenses for target detecting/tracking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088
刘峰, 徐熙平, 孙向阳等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2084~2088
- Xue Changxi, Cui Qingfeng, Pan Chunyan *et al.*. Design of multi-layer diffractive optical element with bandwidth integral average diffraction efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3016~3020
薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳等. 基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 3016~3020
- Qu Enshi, Yang Zheng, Wang Gang *et al.*. Combining binary optics with achromats to revise secondary spectrum [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2274~2278
屈恩世, 杨正, 汪岗等. 利用二元光学和消色差复合透镜组合校正二级光谱色差[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2274~2278
- Luo Jinping, Wang Helong, Liu Xin *et al.*. Passive optical athermalization design in re-imaging optical system [J]. *Electronics Optical & Control*, 2012, **19**(4): 85~88
罗金平, 王合龙, 刘欣等. 二次成像光学被动无热化设计[J]. *光电与控制*, 2012, **19**(4): 85~88
- Ding Xuezhuang, Wang Xin, Lan Weihua *et al.*. Design of re-imaging MIR optical system employing refractive and diffractive optical elements [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(8): 450~453
丁学专, 王欣, 兰卫华等. 二次成像中波红外折衍射光学系统设计[J]. *红外技术*, 2009, **31**(8): 450~453

栏目编辑: 张 腾