

大视场大相对孔径长波红外物镜*

沈为民 薛鸣球 余建军

(苏州大学 现代光学技术研究所, 苏州 215006)

摘要 介绍适用于非致冷焦平面阵列(FPA)探测器的大视场大相对孔径长波红外物镜设计与研制. 由三块非球面锗透镜组成, 采用"负-正-正"像方远心光路, 全视场角和相对孔径分别达 135° 和 $F/0.8$. 镜头的成像性能接近于衍射受限, 具有体积小、重量轻、像面辐照度均匀等优点. 给出非球面锗透镜的研制、测试结果和用此光学系统得到的室内目标热辐射成像图片.

关键词 长波红外; 非球面; 热成像; 非致冷焦平面阵列

中图分类号 TP73 **文献标识码** A

0 引言

采用非致冷焦平面阵列探测器^[1]的红外或热成像系统, 具有不需要机械扫描、便于携带、功耗造价低、可靠性好等优点, 愈来愈广泛地应用于军事和民用领域^[2,3]. 但是, 与基于内光电效应的致冷式红外探测器相比, 非致冷式探测器的感辐射灵敏度较低, 十分期望光学系统具有强的集光能力, 以弥补这一缺憾. 为了获得几十毫开尔文(mK)的噪声等效温差(NEDT)测量灵敏度, 要求光学系统的相对孔径在 $F/1$ 左右. 另外, 随着其集成规模的不断增加, 使得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.

文献[4]报导了基于两块非球面锗透镜的大相对孔径、中等视场长波红外镜头. 文献[5]报导了由四块锗透镜(其中含有两个二次曲面)组成的匹兹万结构, 设计达到全视场角 100° . 本文报导相对孔径和全视场角分别达 $F/0.8$ 和 135° 的长波红外望远物镜, 它由三块构成像方远心光路的非球面透镜组成, 具有体积小、重量轻、像面辐照度分布均匀等特点.

1 设计思想

用于长波红外的光学系统有反射式和透射式光学系统两大类. 虽然反射镜在红外波段具有高反射率, 且无色差, 但随着视场角的增大, 反射系统的中心遮拦增大, 将严重影响辐射能量利用率. 因此, 对于大视场系统, 一般不宜使用反射光学系统; 同样, 折射-反射系统也不合适.

适用于大视场的折射式光学系统主要有双高斯结构和反远结构, 双高斯镜头具有相对于孔径光阑对称的结构, 利于校正像差, 但其主光线的出射角与入射角基本相同, 随着视场角增大, 像面的辐照度快速下降, 即使用几何渐晕和像差渐晕方法, 也只能减缓像面辐照度的下降. 边缘像点和轴上像点的辐照度之比基本上等于视场角余弦的三次方. 例如, 半视场角为 60° 时, 边缘像点的辐照度约是轴上像点的八分之一. 因此, 双高斯结构不适合于本文所研制的红外大视场镜头.

对于反远结构, 可设计成像方远心系统, 即轴外主光线垂直于像面, 并且后截距长于有效焦距, 便于在像面之前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. 这种结构的缺点是, 后透镜组的光焦度较大, 增大了校正像差的难度, 但可通过复杂化后透镜得以解决. 这类系统已较多地用于可见光波段的大视场光学系统, 本文将它用于长波红外波段.

在长波红外波段, 通常锗是首选的透镜材料, 除具有较高的透过率外, 其折射率高, 略大于4, 且折射率随波长的变化很小. 有利于减小光学元件的表面弯曲程度和光线的偏向角, 因而与同样光焦度的可见光光学系统相比, 像差较小, 易于校正. 由于材料色差很小, 当元件口径不大时, 可不考虑色差的影响. 锗材料的这些特性, 均有助于简化光学系统结构, 克服由于材料吸收引起的辐射能量损失.

随着光学系统视场和口径的增大, 其高级像差将明显增大, 以致必须复杂化光学系统才能使设计满足要求, 而在长波红外波段必须考虑锗材料的吸收和成本, 因此, 应尽可能减少光学元件数量和减小厚度. 合理使用非球面, 能有效地校正和平衡初级、高级像差, 减少和减轻光学元件.

光学非球面的使用通常受制造成本的限制, 在可见光波段, 其造价是球面元件的上百倍, 甚至上千

*江苏省重点实验室基金(批准号KJS01004)资助项目
Tel: 0512-65113429 Email: swm@suda.edu.cn
收稿日期: 2003-09-10

倍,且加工时间长.然而,对光学非球面的加工公差要求正比于工作波长,工作波长越长,越易加工,就目前的制造技术而言,可用手工研磨法或点加工金刚石车床切削法,制造用于长波红外波段的非球面锩透镜,因此,对于长波红外波段镜头,利用多个非球面在技术上是切实可行的.

2 设计结果

通过优化设计得到的大口径大视场望远物镜光学系统如图 1^[6]所示.它由三块锩透镜组成,光焦度按负、正、正分配,第一块是弯月形负透镜,第二和第三块透镜组成反远物镜的正光焦度后组,控制后截距在镜头有效焦距的两到三倍之间.此弯月形负透镜除用来平衡另外两块透镜的像差外,具有棱镜偏向作用,使边缘视场光线在后续光学元件上的入射角较小,使得各透镜分担的偏向角均衡,利于像差的校正.将孔径光阑置于中间透镜的前表面上,恰好在第三块正透镜的前焦面上,形成像方远心光路,消除轴外像点主光线在像面处的人射角过大而引起的辐照度不均匀性.三块锩透镜的后表面均为非球面,由孔径光阑处的中间透镜的非球面量控制和校正球差,用另外两块透镜的非球面量校正彗差、像散和畸变等轴外像差.图 1 中像面前的平板为探测器的保护窗口.

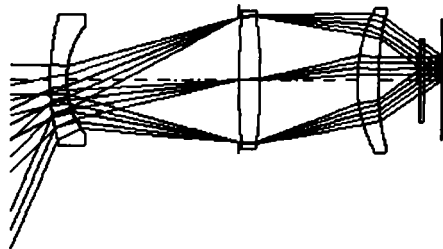


图 1 大视场大相对孔径物镜光学系统
Fig.1 Layout of the fast objective with wide FOV

根据使用要求,设计得到的光学系统参量如下:工作波长范围 10 至 16 μm ,全视场角 135° ,有效焦距 6.4 mm,像高 5.4 mm,入瞳直径 8 mm,即 $F/\#$ 数达到 0.8,从第一块锩透镜前表面到像面的光学长度 87 mm,从第三块透镜后表面到像面的工作距离达 18.2 mm,锩透镜的外径直径 34 mm,三块锩透镜的总重量 44 g,因此,它不仅体积重量小,而且十分便于焦平面探测器和滤光片的安装.

图 2 给出了此红外光学镜头在五个匀排视场角处的调制传递函数曲线,其纵、横坐标分别表示 MTF 值和像面处空间频率.从图中可见,镜头的成像质量接近于衍射受限.随着视场角增大,MTF 值略有减小,在 20 线对/mm 空间频率处,边缘视场的 MTF 值仍大于 0.6,因此,适用于像素尺寸小达

(25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$)的非致冷焦平面阵列探测器.

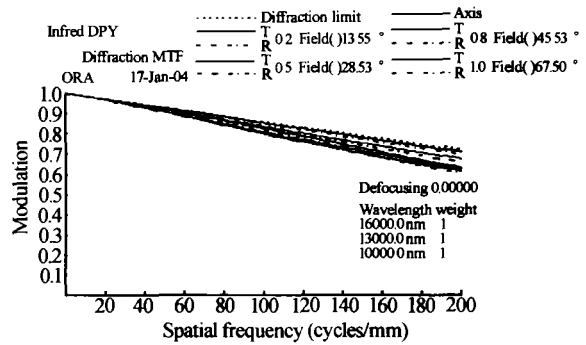


图 2 调制传递函数 (MTF) 曲线
Fig.2 Curve of modulation transfer function (MTF)

3 研制结果

研制此镜头的关键之一是成功制作非球面锩透镜.可用两种方法制造,即传统的手工磨抛法和数控金刚石机床切削法.由于工作波长大于 10 μm ,对非球面的面形加工精度控制在 1 μm 就已足够.图 3 是利用手工研磨法制得的三块非球面锩透镜的照片.用自制的、波长 0.6328 μm 氦氖激光器作照明光源的泰曼干涉仪进行面形测量,观测到整个干涉场内,干涉条纹的弯曲小于一个条纹间距,表明非球面面形峰-谷 (PV) 值小于二分之一测量波长,即约 0.32 μm ,不到工作波长的三十分之一,引起的波差约 1 μm ,即优于工作波长的十分之一,三个非球面合计引起的波差 PV 值不到五分之一一个波长.



图 3 三块非球面透镜照片
Fig.3 Photograph of the three aspheric lenses used in the objective

图 4 是研制得到的镜头照片,机械结构采用 Ly12 铝合金材料,可通过转动位于镜筒中间的花轮实现调焦,使光学系统的像面与焦平面阵列的光敏面吻合.计及遮光罩后镜头的长度为 85 mm,外径



图 4 镜头照片
Fig.4 Photograph of the objective

为 45 mm. 整个镜头的重量 200 g.

利用英国 Ealing 公司制造的可见-红外光学传递函数测试仪测量 MTF 值,得到在 10、20、30 线对/mm 空间频率处的调制传递函数分别为 0.70、0.58 和 0.50,与设计值相比,由于制造过程中的误差引起的 MTF 值相对下降不到 15%.

将研制的镜头安装在像素尺寸 49 μm 、像素数 320 \times 240、感光波段 8 ~ 14 μm 的非致冷微测辐射热计焦平面探测器上,对室内工作人员拍摄得到的热辐射像如图 5 所示. 白色区域表示温度高的地方,黑色表示温度较低. 可见能清晰地分辨人体皮肤表面和通过衣服后的温度和热辐射的差异.

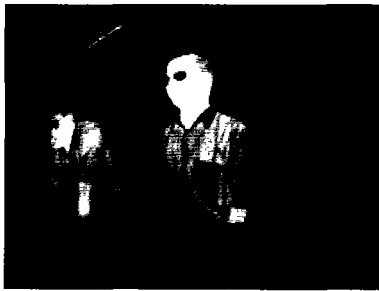


图 5 室内人员的热像

Fig. 6 Thermal image of men in house

4 结论

通过采用多个非球面锗透镜,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,具有结构紧凑、体积重量轻、使用元件数量少、性能接近于衍射极限等优点. 可望与低成本的一代非致冷探测器构成性能优异的热像仪,获得低于十分之一度、甚至更高的等效噪声温差 (NETD) 灵敏度. 此镜头经用户使用取得了令人满意的结果. 一个可能的潜在应用是将其置于低轨道 (如轨道高度 500 km) 卫星上,以凝视方式监测整个地球的热红外辐射.

感谢上海技术物理研究所龚惠兴院士、刘学明研究员、董峰博士等,对完成本工作给予的大力支持和探讨. 感谢西安二〇五所国防科工委光学计量一级站杨红高级工程师,在测试方面给予的巨大帮助. 感谢苏州大学现代光学技术研究所钱煜高级工程师、郭培基博士等,在光学加工方面给予的支持.

参考文献

- 1 Balcerak R S. Uncooled IR imaging: technology for the next generation. *Proc of SPIE*, 1999, **3698**: 110 ~ 118
- 2 Miller J L, Duvoisin III H, Wiltsey G. Applications and performance of an uncooled infrared helmetcam. *Proc of SPIE*, 1998, **3436**: 566 ~ 571
- 3 Breen T, Butler N, Kohin M, et al. More applications of uncooled microbolometer sensors. *Proc of SPIE*, 1998, **3436**: 530 ~ 540
- 4 Latimer D G, Fantozzi L R. Fast 8-12 μm objectives utilizing multiple aspheric surfaces. *Proc of SPIE*, 1999, **3698**: 882 ~ 890
- 5 Fisher D. Design of high-speed infrared lenses using conic surfaces. *Proc of SPIE*, 1998, **3482**: 718 ~ 724
- 6 沈为民,薛鸣球,余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计. *光学精密工程*, 2002, **10**(4): 329 ~ 332
Shen W M, Xue M Q, Yu J J. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(4): 329 ~ 332
- 7 程惠全,姚炜勇,杨国光. 基于二元光学色差校正的全景环形成象系统设计. *光子学报* 2001, **30**(9): 1111 ~ 1114
Cheng H Q, Yao W Y, Yang G G. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1111 ~ 1114
- 8 杨建峰,安葆青,薛鸣球. 大视场三反射面非球面共轴光学系统研究. *光子学报*, 1997, **26**(3): 277 ~ 281
Yang J F, An B Q, Xue M Q. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(3): 277 ~ 281

Long Wave Infrared Fast Objective with Wide Field of View

Shen Weimin, Xue Mingqiu, Yu Jianjun

Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006

Received date: 2003-09-10

Abstract A fast wide-angle objective suitable for uncooled focal plane array (FPA) detectors is discussed. Its optical system composes of three aspheric germanium lenses that form imagery telecentric structure and have negative, positive, and positive power in sequence. Its full field of view and relative aperture are up to 135 degrees and F/0.8, respectively. Its imaging performance approaches diffraction limit. And it has advantages of compactness, lightweight, and uniform illumination in the field. The manufacture and the test of the objective are described. Also, the measured modulation transfer function (MTF) and the thermal image taken with the objective are given in this paper.

Keyword Long wave infrared (LWIR); Aspheric surface; Thermal imaging; Uncooled focal plane array (FPA)



Shen Weimin works in Institute of Modern Optical Technology of Suzhou University. He has issued over twenty papers. He received his BSc (physics) and MS (optics) degree from Suzhou University, China, in 1984 and 1995 respectively. Now he is a PhD student of the Chinese Academy of Science in applied optics.