

基于联合变换相关器的红外摄远光学系统设计

牟 达,董家宁,徐春云

(长春理工大学 现代光学测试实验,吉林 长春 130022)

摘要:为提高联合变换相关器的探测能力,针对 640×512 红外 CCD 探测器,设计了 1 种针对 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的红外摄远物镜,用于联合变换相关器的红外目标摄取。此系统体积小、结构紧凑,采用透射式结构,焦距为 200 mm ,相对孔径为 $1:3$ 。应用 ZEMAX 对设计结果进行了像质评价,在空间频率为 17 lp/mm 时,调制传递函数在 0.3 以上,基本达到衍射极限,各视场点列图均方根半径与艾里斑半径接近,具有良好的成像质量,满足光学系统的设计要求,提高了联合变换相关器对目标的探测与识别能力。

关键词:联合变换相关器;红外摄远物镜;光学设计

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2012)12-0111-03

自然界中所有高于绝对零度的物体都有红外辐射,这为探测和识别目标提供了客观基础,所以红外技术在军事上具有广泛的应用领域。光电混合联合变换相关器利用光学相关探测方法,以灵活性好、识别精度高等优点广泛应用于军事、航空航天、智能化等领域。而将红外光学系统应用在联合变换相关器的最前端,用于接收目标的红外辐射,发挥红外探测和相关探测的各自优势,可使目标的探测精度、跟踪搜索能力得到提高。本文根据目标 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 红外辐射特性设计了成像质量高的长波红外摄远物镜。从光学系统参数分配和初始结构选取入手,给出了具体的设计参数、设计步骤,得到了较好的结果,完成了设计任务。

1 联合变换相关器的原理

光电混合实时联合变换器原理如图 1 所示。图 1 中,系统的光源选择为氩离子激光器,光源发出的光经过衰减器、空间滤波器及准直透镜,最后形成准直扩束的平行光。半反透镜把 1 束平行光分成 2 路光束,1 路用于得到联合变换功率谱,另 1 路用于获得相关图。用于得到联合变换功率谱的 1 路光束,把参考图像和目标图像同时输入到电寻址液晶 EALCD 中,其中参考图像是提前储存在电脑中的,而目标图像则是经 CCD1 (即摄像头 1) 实时摄取的。平方律探测器 CCD2 (即摄像头 2) 对经由傅里叶变换透镜 FTL 后的联合图像进行探测,得到 $o(x,y)$ 和参考图像 $r(x,y)$ 的联合变换功率谱。用于获得相关图的另 1 路光束,输入到 PC 的功率谱经空间光调制器的控制系统输入到电寻址液晶 EALCD2 中,经傅立叶变换透镜 FTL2 后,由 CCD3 (即摄像头 3) 摄取目标图像与参考图像的联合变换相关点,根据相关点的位置即可确定目标及其方位^[1-3]。

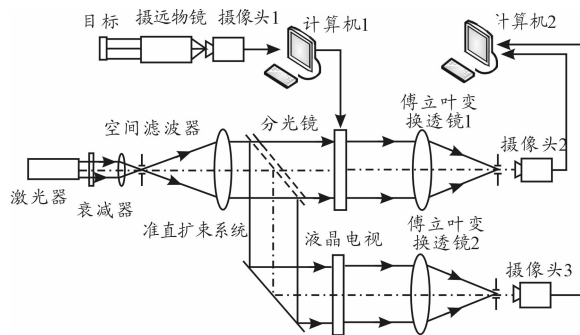


图 1 光电混合实时联合变换相关器原理

2 红外摄远光学系统设计

2.1 摄远物镜简介

通常来说,摄远物镜一般由 2 个透镜组构成,1 个为正透镜组,另 1 个为负透镜组,或者在双胶物镜后加 1 块厚弯月形透镜。前组主要是对目标生成实像,后组用于加大其焦距。如果把正透镜组放在前面,则能使其总长小于焦距,这样可大大减小光学系统的体积。摄远系统长度与物镜焦距相比要小,因为光学系统仅由 2 个透镜组组成,所以他能对 4 种像差进行校正,包括彗差和正球差,以及像散和场曲。摄远物镜的缺点是由于前组的相对孔径通常都比整个系统的相对孔径大 1 倍以上,所以整个系统的相对孔径较小^[4]。

2.2 光学参数的确定

为了使联合变换相关器能更好地对红外目标进行探测与识别,设计出了一种红外摄远物镜,其具有稳定的光学特性。系统采用 Selex 公司的 MW/LW CCD 红外探测器,有效像素为 640×512 ,像素尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。用于联合变

换相关器的摄远物镜的技术指标如下。工作波段:8 ~ 12 μm ;焦距:200 mm;相对孔径:1:3;视场角:7°。

2.3 红外光学材料选取

远红外波段的光波长在 8 ~ 12 μm ,常用光学材料有 ZnS、ZnSe、Ge 和 AMTIR。ZnS 是中波和远红外波段均可使用的材料,呈锈黄色,对可见光半透明。ZnSe 在很多方面与 ZnS 类似,折射率比 ZnS 略高,但结构不如 ZnS 牢固。与 ZnS 相比,ZnSe 最显著的优点是吸收系数极小,所以 ZnSe 通常应用于高能 CO₂ 激光系统中。Ge 是平时最常用的红外材料,在中波和长波都能用。在长波段,主要作为正透镜使用;而在中波段,通常做成负透镜使用。这 2 种用法主要是由于锗在 2 个波段的色散不同,中波时阿贝数是 100,长波时则是相差极大的 930。锗的折射率是 4.024 3,也就意味着透镜的半径较大是更合理的,从像差校正的角度考虑,高折射率对于整个设计是很有利的。AMTIR 族材料是 1 种新型的材料,分为 AMTIR I 和 AMTIR III 2 种。他们是由锗、砷和硒以近似 33:12:55 的比例生产出来的玻璃质材料^[5]。

2.3 初始结构的选取

从以上参数可以看出,此摄远光学系统相对孔径较大,工作距离较长。红外光学系统至少要选用 3 片以上透镜。可选择的材料非常有限,即锗、硫化锌和硒化锌。

对于初始结构应尽量简单。另外,至少需要 2 种或以上不同材料的玻璃进行设计,以满足红外系统色差和像差校正的要求。因此,初始结构系统选用 2 片透镜,自左向右透镜的材料分别为 ZnS、ZnSe、Ge。经过初步优化得到的点列图和传递函数如图 2 和图 3 所示。轴上点的点列图与艾里斑大小接近,但是轴外 2 个视场却不是理想。传递函数也没有全部达到在 17 lp/mm 的时候达到的 0.3 以上。故系统有待进一步优化。

2.4 系统优化设计

利用 ZEMAX 光学设计软件,多次优化后成像质量依然不好,此时光学系统各温度、各视场的调制传递函数在 17 lp/mm 处均小于 0.3,且光学结构总长度为 256.169 mm,未达到摄远物镜总长度小于焦距和成像质量的要求。分析系统像差情况,考虑调整材料的顺序。对成像质量而言,折射率的贡献最大,曲率半径次之,而中心厚度和间隔的影响最小。锗在 8 ~ 12 μm 波段折射率几乎是硫化锌和硒化锌的 2 倍,因此考虑首先调整锗在系统中的顺序。光学系统成像质量变化较大,经过反复调试,确定自左向右透镜的材料分别为 Ge、ZnSe、Ge。观察分析系统像差情况,此系统在第 2、3、6、7 面球差较大,需要添加辅助镜片来校正球差、畸变、彗差,达到像质要求。在设计过程中,为了提高成像质量、简化结构,没有添加镜片而是引入非球面进行系统设计。非球面在此处的作用是控制像差,其最主要的是控制球差。在手动修改各面的半径和厚度值时发现,第 3 个面非常敏感,特别是对传递函数的影响严重,因此在第 2 片透镜前表面采用了非球面,把他设为偶次非球面。优化后得到偶次非球面的 2、4、6 次相位系数分别为 1.693×10^{-3} 、 1.896×10^{-7} 、 1.369×10^{-11} ^[6]。

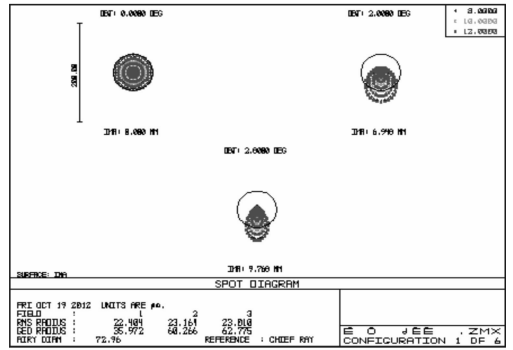


图 2 初步优化后的点列图

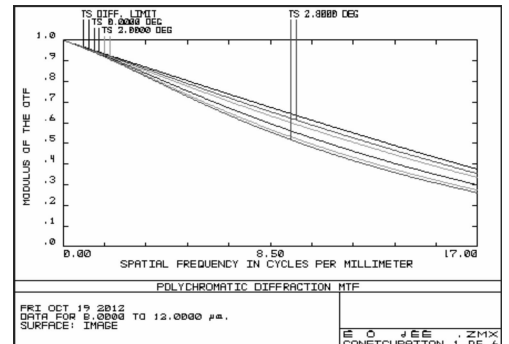


图 3 初步优化后的传递函数

3 设计结果分析

图 4 为摄远系统的最终结构图,光学系统焦距为 200 mm,工作总长为 170 mm,占空比小,结构紧凑。F 数为 3,视场角为 7°。第 2 片正透镜前表面采用了非球面,校正了第 1 片弯月球面负透镜和第 3 片球面负透镜产生的较大球差;第 1 片弯月球面负透镜、第 2 片非球面正透镜和第 3 片球面负透镜像差相互平衡,校正了球差、彗差和轴向色差。

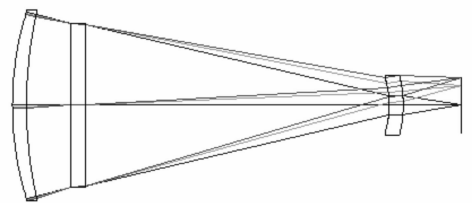


图 4 系统最终结构

各视场的点列图如图 5 所示,所有视场的弥散艾里斑半径均小于艾里斑范围,可满足系统的使用要求。调制传递函数(MTF)是评价光学系统质量的主要方法。图 6 调制传递函数曲线表明,在 17lp/mm 空间分辨率处所有视场的传递函数均大于 0.3,并且与衍射极限非常接近,说明像差控制得很好。

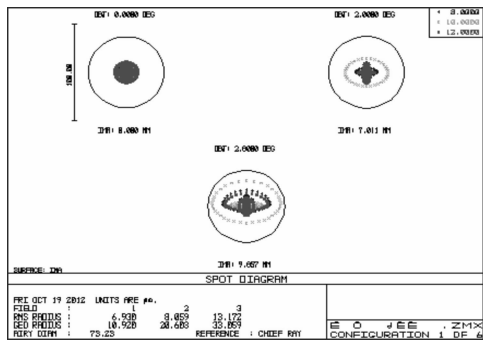


图5 最终系统点列图

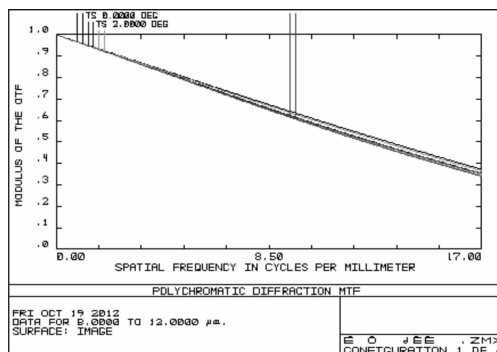


图6 最终系统传递函数

焦距、大口径、红外(长波 8~12 μm)摄远物镜。在设计中引入非球面,更好地缩短了系统长度并得到了更好的像质。用 ZEMAX 优化得到符合设计要求的摄远光学系统,成像质量优良。将所设计的光学系统放入联合变换相关器中进行模拟实验也得到了较好的结果,实现了联合变换相关器对目标的探测与识别。

参考文献:

- [1] 许其推. 光折变联合变换相关器的研究[D]. 西安:西北工业大学,2002.
- [2] 袁祥岩. 光学联合变换相关目标识别技术的研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.
- [3] 王玉荣,徐鹏,王青圃,等. 光电混合联合变换相关器中各元器件结构参数之间的关系[J]. 光学精密工程,2005(6): 77-79.
- [4] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2004.
- [5] 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [6] 张以谟. 应用光学(下册)[M]. 天津:机械工业出版社,1982.

4 结束语

(责任编辑 鲁进)

介绍了联合变换相关器的原理,设计了一种折射式、长

(上接第 84 页)

参考文献:

- [1] 任莹. 人造地球卫星轨道力学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1988.
- [2] 袁建平,和兴锁. 航天器轨道机动力学[M]. 北京:宇航出版社,2010.
- [3] 云庆夏. 进化算法[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [4] 白洪波,马书兴,朱丽萍,等. 空间作战中固定时间轨道拦截的仿真研究[J]. 航天控制,2006,24(4): 62-65/

- [5] 王石,祝开建,戴金海. 用进化算法求解轨道转移的时间——能量优化问题[J]. 宇航学报,2002,23(1): 73-75.
- [6] 方晓松. 卫星轨道建模与仿真技术研究[D]. 成都:成都电子科技大学,2010.
- [7] 张云鹤. 航天器可达区域分析及摄动影响下相对运动精确轨道控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [8] 秦帅. 遗传算法在航天器轨道机动中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

(责任编辑 周江川)