

激光主动/红外共口径复合成像光学系统设计

尹 娜¹, 张运强^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 提出了一种适用于弹载环境的主动激光成像/红外成像同轴共口径复合光学系统设计方案, 设计完成了能够实现大视场扫描且具有优良成像质量的共口径复合光学系统。该系统采用了半角扫描机构在俯仰和偏航方向实现 $\pm 15^\circ$ 扫描视场, 并在 $-50^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 温度范围内全视场成像质量接近衍射极限。

关键词: 主动激光/红外成像; 共口径复合; 半角扫描

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)01-0077-04

Design of an Active Laser/Infrared Common Aperture Compound Imaging Optical System

YIN Na¹, ZHANG Yunqiang^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: A scheme of active laser/IR common aperture compound imaging optical system which can be applied for wide-field-of-view missile-borne system was proposed. The system got a $\pm 15^\circ$ scanning field in pitch and yaw with a half-angle scanning mechanism and good imaging quality close to diffraction limit within the temperature range of $-50^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$.

Key words: active laser/IR imaging, common aperture compound, half-angle scanning

0 引言

随着光电对抗技术的进步, 面源、伴飞等红外干扰弹相继出现, 对采用单一导引体制的红外制导导弹形成了严重威胁。为了确保红外导弹在战场上的生存能力和攻击的有效性, 采用激光主动成像与红外成像复合技术, 利用主动激光脉冲穿透大面积干扰烟雾照射目标, 获得潜在目标的强度像和距离像, 实现目标与诱饵的识别, 从而提高红外导弹近距抗多点源人工诱饵干扰成功概率。主动激光成像与红外成像复合已成为多模制导导弹的一个发展趋势^[1]。

基于上述需求, 本文提出了一种适用于大视场弹载光学系统的同轴共口径复合光学系统设计方案。同轴共口径复合方式相对于分口径复合方式一方面能够大幅度降低导弹的体积和重量, 简化硬件结构, 另一方面也会提高光学系统设计和装调难度; 相对于共口径不同轴复合方式它能够实时确保主动激光与红外系统作用目标的一致性, 有效避免丢失目标的可能。

本文在合理方案论证的基础上设计完成了能够满足弹载环境使用的、可得到足够扫描视场的、具有优良成像质量的共口径复合光学系统。

1 同轴共口径复合方案

主动激光成像和红外成像同轴共口径复合包括了激光发射系统、激光接收成像系统、红外成像系统三者之间的彼此同轴共口径。

首先主动激光发射和接收系统同轴共口径意味着发射光路将占用部分接收口径, 则有可能造成接收光能的损失。在这种情况下卡塞格林结构具有天然的优势^[2]。如图1所示, 在次镜后端安置激光发射光路, 这样既可实现激光发射与接收同轴, 又不会造成接收能量被遮挡。但是卡塞格林系统本身瞬时视场较小, 而为保证足够的作用距离其接收口径又偏大, 很难通过扫描的方式获得较大的视场, 因此无法满足大视场弹载光学系统要求。

收稿日期: 2015-08-10; 修订日期: 2015-12-25.

作者简介: 尹娜 (1981-), 女, 汉, 硕士, 光学工程师, 主要从事红外光学系统设计工作。

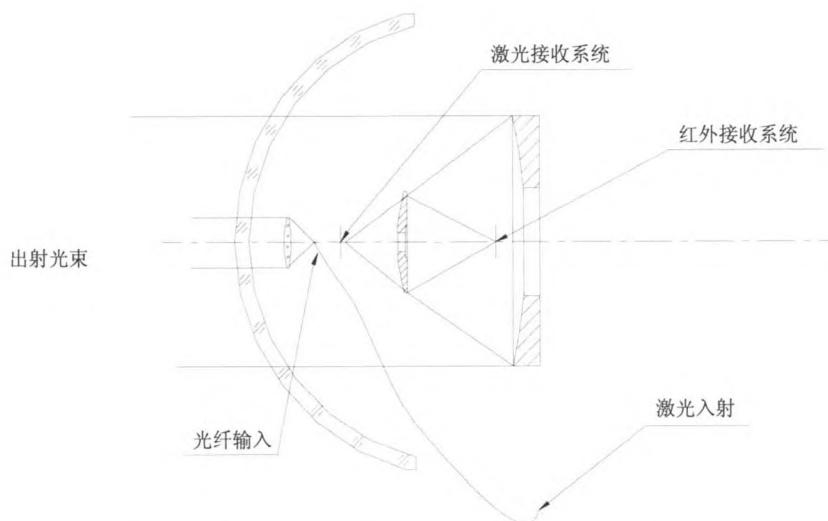


图1 卡塞格林结构示意

Fig.1 Schematic of a cassegrain system

为满足大视场要求,在透射式二次成像光学系统中利用平面反射镜构建半角机构,通过反射镜的摆动在俯仰和偏航方向获得足够大的扫描视场,见图2。其中发射光路置于半角运动机构之外,激光经反射镜折转,通过固定反射镜的中心通孔,到达半角机构转动枢轴中心,再通过摆镜反射并随摆镜转动沿接收系统光轴出射,从而实现激光发射系统与接收系统同光轴共口径复合。这种复合方式满足了大视场要求,但不可避免的给激光和红外接收系统带来了能量损失,损失能量的多少取决于固定反射镜上所开的通孔的直径。好在导弹用主动发射激光一般口径和束散角都很小,在激光器距离固定反射镜足够近的情况下,能量损失可以得到有效控制。

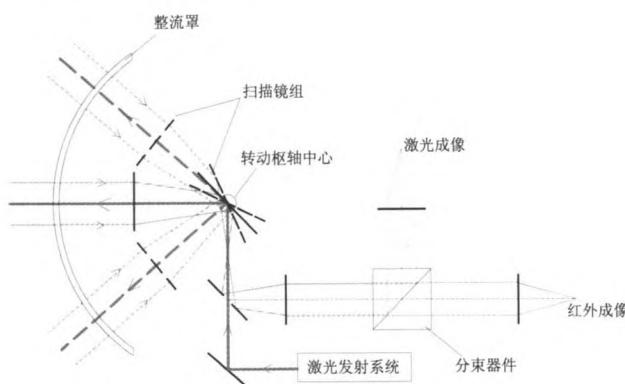


图2 透射式扫描结构示意

Fig.2 Schematic of a scanning transmitting system

2 光学系统设计

系统设计分为激光与红外接收成像系统和激光发射系统两部分完成。

2.1 接收成像系统设计

2.1.1 激光和红外接收成像系统设计要求

- 1) 波段: 激光 $1.064 \mu\text{m}$, 红外 $3\sim 5 \mu\text{m}$;
- 2) 视场: 激光 $1^\circ \times 1^\circ$, 红外 $3.6^\circ \times 3^\circ$;
- 3) 探测器: 激光探测器像元中心距 $200 \mu\text{m}$, 像元数 32×32 ; 红外探测器像元中心距 $30 \mu\text{m}$, 像元数 320×256 ;
- 4) 扫描场: 偏航和俯仰方向 $\pm 15^\circ$;
- 5) 工作温度范围: $-50^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 。

根据以上要求可计算得红外和激光接收成像光学系统的焦距分别为 150 mm 和 366 mm 。

2.1.2 扫描镜组的消色差和热差设计

扫描镜组作为该系统的望远物镜其成像质量几乎决定了整个系统的分辨能力,因此在最小重量、体积和可用材料的限制下完成其色差和热差的合理平衡将成为系统像差校正的关键。 $1.064 \mu\text{m}$ 与 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 双波段可用透镜材料非常有限。常用材料中能够同时满足两个波段透过率要求的材料有硒化锌、多光谱硫化锌、氟化钙和氟化钡。图3为几种常用红外材料的T-C图,其中 $T = \Delta\varphi/\varphi$ 为规划热差系数, $C = \Delta\varphi_\lambda/\varphi$ 为色差系数^[3]。

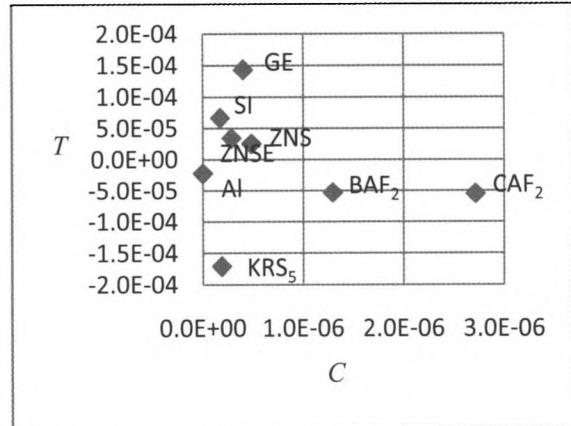


图3 常用红外材料T-C图

Fig.3 T-C of some common IR materials

密接薄透镜消色差方程:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \\ 0 = \varphi_1 C_1 + \varphi_2 C_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_1 = \frac{C_2}{C_2 - C_1} \varphi \\ \varphi_2 = \frac{-C_1}{C_2 - C_1} \varphi \end{cases} \quad (1)$$

密接薄透镜消热差方程(无穷远物):

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \\ -\alpha\varphi = \varphi_1 T_1 + \varphi_2 T_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi_1 = \frac{T_2 + \alpha}{T_2 - T_1} \varphi \\ \varphi_2 = -\frac{T_1 + \alpha}{T_2 - T_1} \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为镜筒材料的热膨胀系数。

联立方程组(1)、(2)得到对于物在无穷远的密接正负薄透镜组, 同时消色差和热差的条件为:

$$\frac{T_1 + \alpha}{C_1} = \frac{T_2 + \alpha}{C_2} \quad (3)$$

即二透镜材料在 T - C 图上连线经过 T 轴上由镜筒材料膨胀系数决定的 $-\alpha$ 点。

由图 3 可知, 在硒化锌、硫化锌、氟化钙和氟化钡这几种材料中不存在满足方程(3)的透镜组合, 但同时也可看到若对硒化锌或硫化锌正透镜使用衍射面型, 使其具有负的色散系数, 亦有可能与氟化钙或氟化钡正透镜搭配得到满足双消条件的正正透镜组合。且两个正透镜还可以互相分担光焦度, 减小透镜的曲率从而降低单色像差。此外也可以通过增加透镜数量得到满足双消条件的组合。但是考虑到扫描镜组与摆镜一同转动成为电机负载, 为降低转动力矩扫描物镜组应质体小轻。因此本设计中扫描物镜组采用了由带有衍射面的硒化锌透镜和氟化钙透镜。使用衍射元件必须考量其在 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 双波段的衍射效率。根据探测器的光谱响应能力, 红外系统主波长取 $4.25 \mu\text{m}$ 。按照谐衍射理论^[4], 当衍射透镜在 $4.25 \mu\text{m}$ 的 1 级衍射取得极大衍射效率时, 其在 $1.064 \mu\text{m}$ 的 4 级衍射将取得极大衍射效率。理论计算双波段理论衍射效率均可达 92% 以上, 能够满足使用要求。

2.1.3 分光光路等其他部件设计

由物镜组接收的红外和激光能量经反射镜折转后通过中继镜组到达分光器件, 再通过各自的成像镜组成像在相应的探测器上。分光器件要在高效分束的同时完成激光光路 90° 折转, 在目前的工艺条件下 45° 倾斜平板成为最优选择。我们知道平行平板在非平行光路中具有除场曲之外的所有像差, 尤其是像散难以由常规透镜进行补偿, 因此需要在系统中构建平行或近似平行光路以最大程度降低平板像差影响, 中继镜组的主要功能即为为其后的分光平板构建近似平行光路, 同时由于中继镜组距离一次像面很近, 它还有很好的平场曲控畸变的功能。本系统中继镜组采用了两片硫化锌透镜, 分光平板采用了镀有高效分光膜层的锗平板, 而激光成像镜组和红外成像镜组则分别采用了 K9 玻璃和硅锗等红外晶体。最后设计完成的激光和红外接收成像系统如图 4 所示。

2.2 激光发射系统设计

由激光器发出的高斯激光需经过准直扩束降低束散角, 以保证在经过一定工作距离后激光照射能量能够覆盖典型目标且不至于过分发散造成多数能量损失。本系统要求将由激光器发出的高斯激光由散角束 4 mrad 准直到束散角 $\leq 1 \text{ mrad}$ 。

我们知道高斯光束可由望远系统进行准直, 且其束散角压缩比等于望远系统扩束比的倒数^[5]。前方扫描物镜组焦距已由接收成像系统确定为 321 mm , 则设计一个焦距约为 80 mm 的负透镜与之构成一个 4 倍伽利略望远系统, 即可满足系统的准直要求。实际设计中我们采用了一个焦距为 82 mm 的 BK7 负透镜, 最后设计完成的激光发射系统见图 4。

2.3 设计结果

光学系统光路图如图 4 所示, 红外成像系统、激光成像系统与激光发射系统在扫描过程中时刻保持同光轴共口径。固定反射镜上所开通孔直径 7 mm , 反射镜直径 56 mm , 经计算由开孔造成能量损失百分比为 3%, 经评估能够满足作用距离要求。

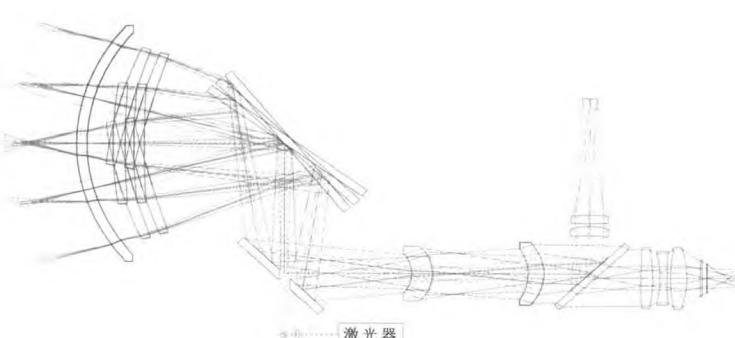


图 4 设计完成的光学系统光路图

Fig.4 Designed optical system

光学系统的成像质量见以下各图, 其中图5为红外成像系统点列图, 图6位为激光接收成像系统的点列图, 图7为激光发射系统的传函图。由图可见, 红外成像系统和激光接收系统在全温度范围、全视场像斑均小于一个像素大小, 激光发射系统的传函亦接近衍射极限。

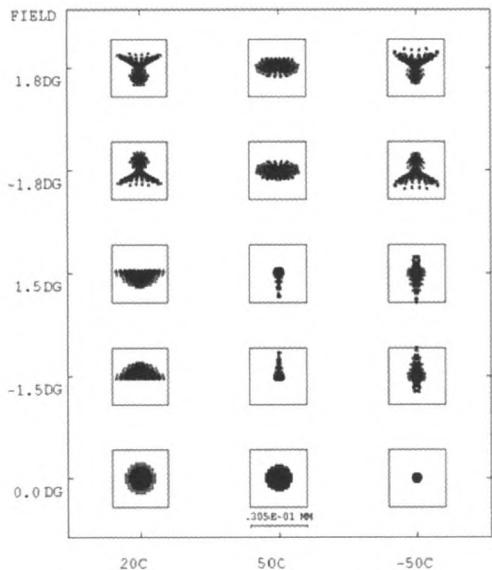


图5 红外成像系统点列图

Fig.5 Spot diagram of the IR system

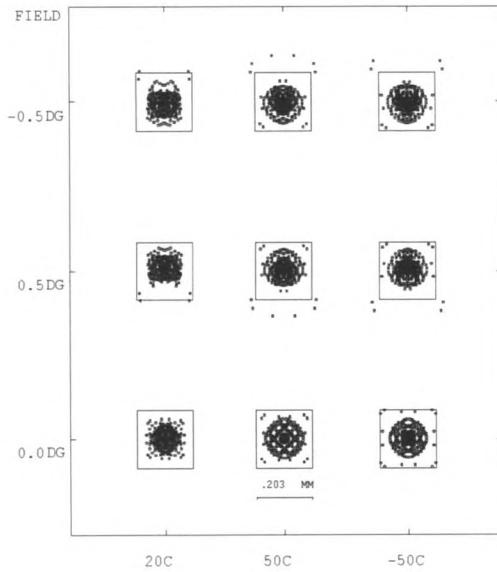


图6 激光接收系统点列图

Fig.6 Spot diagram of the laser receiving system

3 结论

本文结合红外导弹抗面源干扰需求, 提出了一种主动激光成像与红外成像同轴共口径复合光学系统设计方案, 通过在透射式二次成像光学系统中构建半角扫描机构实现俯仰和偏航方向 $\pm 15^\circ$ 扫描, 在 $-50^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 温度范围内设计得到了具有优良成像质量的激

光发射系统、激光接收成像系统和红外成像系统, 为被动激光与红外同轴复合导引头的研制提供了一种新思路。

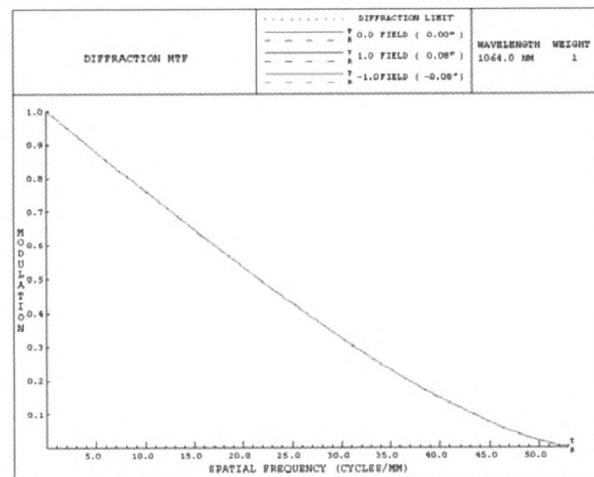


图7 激光发射系统的传递函数

Fig.7 MTF of the laser emitting system

参考文献:

- [1] 逄小光, 姚郁, 周凤岐. 共口径红外/激光双模成像导引头研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 597-581.
DI Xiaoguang, YAO Yu, ZHOU Fengqi. Common aperture IR/Ladar dual-mode imaging seeker system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 597-581.
- [2] 左保军, 况耀武. 红外/激光双模导引头的光学系统[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 495-499.
ZUO Baojun, KUANG Yaowu. Optical design of the IR/ladar dual-mode seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 495-499.
- [3] 胡玉禧, 周绍祥, 杨建峰, 等. 红外系统的光机热一体化设计[J]. 红外技术, 2000, 22(2): 32-35.
HU Yuxi, ZHOU Shaoxiang, YANG Jianfeng, et al. The optical-mechanical integrated design of a thermal infrared optics[J]. *Infrared Technology*, 2000, 22(2): 32-35.
- [4] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
JIN Guofan, YAN Yingbai, WU Minxian, et al. *Binary Optics*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [5] 翁开华, 刘金清. 激光准直系统的设计[J]. 福建师范大学学报, 2001, 17(2): 35-38.
WENG Kaihua, LIU Jinqing. Laser collimated system designing[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science)*, 2001, 17(2): 35-38.