

红外/激光共孔径双模导引头光学系统设计

殷笑尘¹, 付彦辉²

- (1. 中国人民解放军 63996 部队, 北京 100094;
2. 中国科学院生物物理研究所, 北京 100101)

摘要: 为解决在扩展防空(EAD)和弹道导弹防御(BMD)下自主式制导, 目标检测、分类及识别等问题, 介绍了一种新型的设计原理, 在使用同一接收孔径的条件下, 将红外成像传感器和激光雷达成像传感器整合为一个小型的导引头, 并设计了其中的光学系统。通过红外传感器探测场景, 识别出再入飞行器, 给激光雷达指示选择的目标, 激光雷达用高功率的激光脉冲照亮所选的目标, 目标反射的激光由接收光学系统成像到焦平面上。接着, 以快照方式对图像采样, 从而得到三维信息(角度-角度-距离)。整个系统采用卡式光学系统结构, 通过二色分光镜作为分色面, 实现了激光接收与红外成像的共口径, 给光学设计带来方便, 给出了系统结构参数确定的方法, 并用 CODE V 光学设计软件设计了光学系统。所设计的光学系统具有较好的成像质量, 可满足系统的性能要求。

关键词: 双模制导; 导引头; 光学设计

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0428-04

Optical design of common aperture IR/ladar dual-mode imaging seeker

Yin Xiaochen¹, Fu Yanhui²

- (1. 63996 Troops of People's Liberation Army, Beijing 100094, China;
2. Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to realize the autonomous guidance, target detection and classification/identification for extended air defence(EAD) and ballistic missile defence(BMD), a concept was presented to integrate both imaging infrared and imaging flash LADAR sensor into a compact seeker setup using the same receiver aperture and the results of optical design in this system was demonstrated. The IR sensor detected the scene, discriminated the reentry vehicle and cued the LADAR to the selected object. The LADAR sensor illuminated the selection with a high power laser pulse and the reflected light will be imaged through the receiver optics onto the focal plane. The image was then sampled in snapshot mode and 3D-information (angle-angle-distance) was generated. It used the surface of dichroitic beam splitter as a dichroic surface, to achieve a laser receiver and infrared imaging of the total diameter, saving system space. Whereafter, the way of calculating the parameters of optical system was illuminated and the results of optical design with CODE V was given out. The optical system designed in this paper can fulfil the requirement of the system scheme owing to its good quality.

Key words: dual-mode homing; seeker; optical design

收稿日期: 2014-06-21; 修订日期: 2014-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(31400846)

作者简介: 殷笑尘(1986-), 女, 工程师, 主要从事光学测量应用方面的研究。Email: 1986726yin@163.com

0 引言

信息化条件下的战争,精确制导武器成为实施毁灭性打击的重要手段。精确制导武器的打击精度主要依赖导引头的制导技术,在现代战争中导弹上使用的导引头主要是非成像导引头、激光导引头、毫米波雷达导引头等^[1],这些导引头易受各种气候以及战场情况的影响,抗干扰能力差。随着精确制导武器的攻击过程中遇到的对抗层次越来越多,对抗手段越来越复杂,目标的隐身、掠地(海)进攻和高速突防攻击及多方位饱和攻击战术的使用^[2],单一的制导模式已经很难满足在复杂多变的现代战场环境中进行精确制导的需要,如雷达制导系统易受箔条和角反射器等假目标的干扰;红外制导系统易受目标性质、目标与背景热辐射反差程度和气候的影响,并且不能测距,全向攻击性能较差;激光制导系统易受云、雾、烟的影响,不能全天候使用。因此迫切需要一种新的制导技术来满足在复杂战场环境下进行精确制导的要求。一般认为,采用多模复合寻的制导是一种现实而有效的技术途径。

激光/红外双模复合制导^[2]被认为是最有发展前景的技术,它能实现光电互补,从而克服了各自的不足,又综合利用二者的优点。激光雷达能获取目标距离信息,弥补了红外无法测距的缺点;红外具有高的跟踪精度,特别是红外成像制导,不仅精度高,而且可以选择攻击飞行器的脆弱部位;激光雷达能提供目标的距离信息和多普勒特征信号,能从目标反射波中提取其频谱幅度、相位等多种信息;目标的红外热图像,可以提供目标的各特征部位。将这两种传感器提供的目标多种信息,经过信息融合处理器进行分析处理可准确地识别目标。另外,现代用于作战的飞行器大都采用隐身材料和隐身技术,然而,隐身材料对于雷达波和红外是不可兼容的。对激光雷达来说,好的有效隐身材料恰好是良好的红外辐射源,而遮蔽红外辐射的良好表面又恰好是雷达波的良好反射体。从抗干扰角度看,目标同时施放既干扰雷达波又干扰红外的物质,在技术上是困难的。因而将红外成像和激光雷达进行复合的寻的制导技术具有可全天候工作、抗电子干扰和命中精度高的优点^[3]。

1 双模导引头光学系统总体方案

该系统采用共孔径式光学系统。整个系统方案示意图如图1所示,主要包括三个部分:红外成像光学系统、激光发射光学系统和激光接收光学系统。

由系统的工作原理^[4]可知,红外成像光学系统的作用是对整个目标所在场景成像,排除各种诱饵目标的影响,识别出需要拦截的目标。而在此之前,要求红外导引头开机时目标场景即包括在红外成像系统的视场内,这是通过中继制导手段实现的,因此对红外凝视成像系统的视场角要求并不过高。

激光发射系统的作用主要是将激光器输出的激光进行准直和扩束,激光束仅需覆盖选定的目标而已,因此激光发射系统可以做得较小。

激光接收系统将目标反射回的激光能量会聚到激光接收器件上。由于采用的是共孔径接收的形式,采用二色性分光镜将红外与激光能量进行分离。这就为导引头内部节约了大量的空间。整个方案结构紧凑,适于弹载小型化的要求^[5]。

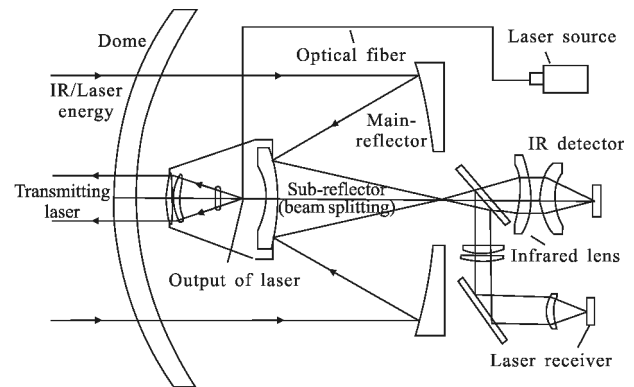


图1 共孔径光学系统整体方案示意图

Fig.1 Scheme of the common aperture optical system

2 光学系统的设计

2.1 红外光学系统设计

红外光学系统采用折反式系统,反射系统采用卡塞格林结构,次镜后加入二色性分光镜、红外透镜组,以校正系统的慧差、像散和场曲,以及平衡导弹头罩引入的色差。

考虑到大气衰减、目标与背景特性、分辨率与探测器元数以及该波段探测器在我国的研制技术水平、成本等因素,系统工作波段取中波红外。焦平面

探测器拟采用 320×256 HgCdTe MWIR 制冷型探测器,响应波段为 3.7~4.8 μm,像元尺寸为 30 μm。

通过凝视红外成像系统作用距离公式^[6]:

$$R_d = \left[\frac{\pi J D^* D_0 \tau_a \bar{\tau}_0}{4 (f'/D_0) \cdot (\omega \Delta f_e)^{1/2} (v_s/v_N)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中:J 为目标辐射强度;D* 为探测器探测率;τ_a 为大气透过率;τ₀ 为光学系统透过率;D₀ 为光学系统接收口径;f' 为光学系统焦距;ω 为瞬时视场立体角;Δf_e 为噪声等效带宽;v_s/v_N 为系统信噪比。

可以计算出光学系统入瞳直径需要大于 43.2 mm,参考相关系统结构数据,可得红外光学系统参数如下:

$$D_0 = 90 \text{ mm}, f' = 140 \text{ mm}, 2\omega = 4^\circ$$

在前面分析的基础上,先由基本光学参数计算出两镜反射系统的结构参数(由于反射系统承担大部分光焦度,因此计算时取其焦距与系统焦距相同),再在此基础上添加适当透镜,并运用光学设计软件中的全局优化功能,寻找合理的初始结构以作为下一步像差校正的起点。通过 CODE V 光学设计软件设计并优化得出光学系统结构图如图 2 所示。

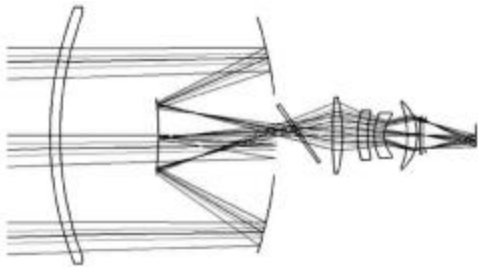


图 2 红外通道光学系统结构图

Fig.2 IR optical system

系统中第一块为球形头罩,材料为蓝宝石。之所以选用蓝宝石,是因为蓝宝石单晶具有很高的硬度、机械强度以及高温稳定性,能承受新一代导弹的高速产生的热冲击力,而且其透过波段从紫外、可见到红外,透过波段宽,能够适应复合制导方式的要求。

入瞳位于主镜位置,探测器冷光阑作为整个系统的孔径光阑,同时也是系统的出瞳,从而实现了 100%冷光阑效率^[7]。系统采用了四片红外透镜,透镜组红外材料选用的是 Ge 和 Si,为了更好的校正各种像差,考虑到目前非球面的加工现状,系统中使用了三个非球面。光学系统长度(次镜到像面)为 70 mm,四块透镜重量仅为 10 g。

该光学系统的传递函数曲线如图 3 所示。可见在系统截止频率处,各视场的 MTF 均达到 0.6 以上,接近衍射极限。系统在不同视场处成像的弥散斑直径如表 1 所示,最大弥散斑直径仅 8.09 μm,足以满足成像的要求^[8]。

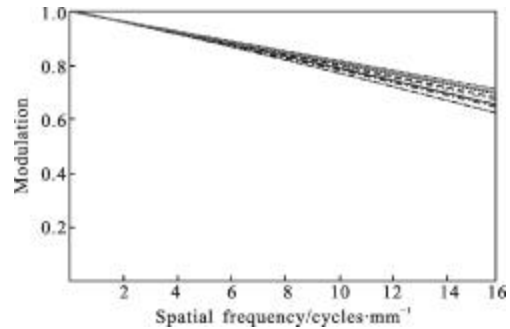


图 3 红外光学系统 MTF 曲线

Fig.3 MTF curves of IR optical system

表 1 不同视场处的弥散斑直径

Tab.1 Diameter of dispersion points under different field of view

FOV	0	0.3	0.5	0.707	1
RMS/μm	6.07	7.09	10.14	13.20	13.16

透过率方面,整个系统的遮拦比为 0.28,考虑到目前单块透镜镀膜后透过率均能达到 0.95 以上,而作为头罩的蓝宝石虽然不镀膜,在峰值波长处透过率也能达到 0.95 以上。因此系统透过率可粗略估算为:

$$\tau_0 = 0.95^5 \times (1 - 0.28^2) = 0.66$$

可见满足技术要求。

2.2 激光发射系统设计

根据系统性能要求及结构要求,确定发射系统光束束散角为 3 mrad。发射系统示意图如图 4 所示。

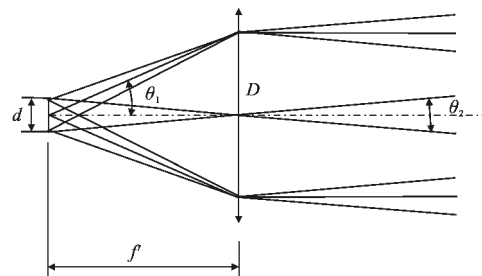


图 4 激光发射系统示意图

Fig.4 Illustration of the laser emitting system

$$f' = \frac{d}{\theta_2} \quad (2)$$

由此可以计算出激光发射系统参数为:

$$f' = 16.67 \text{ mm}, \theta_2 = 3 \text{ mrad}$$

为减小发射系统的长度, 设计时选择摄远物镜作为激光发射系统的结构型式。由一个正透镜组和一个远离的负透镜组构成, 这种物镜可使主面外移, 使筒长小于焦距, 从而能缩小光路长度, 一般能使系统长度缩短为焦距的 $2/3 \sim 3/4$ 。所设计的发射系统结构图如图 5 所示。

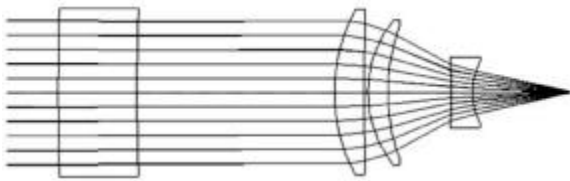


图 5 激光发射系统

Fig.5 Laser emitting system

2.3 激光接收光学系统设计

对于制导跟踪装置而言, 接收系统的视场角一般应取其大于激光发散角, 同时为了尽量减少背景噪声的影响而又不能取得太大。此处经综合考虑并参考目前已有的激光制导系统数据, 取视场角为 $2\omega = 5 \text{ mrad}$ 。则可得出激光接收系统参数如下:

$$D_0 = 90 \text{ mm}, f' = 135 \text{ mm}, 2\omega = 1^\circ$$

该系统为大相对口径、小视场光学系统, 主要应校正的是球差和正弦差, 由于接收的是单色激光, 故可不必校正色差。由于前一部分光学系统与红外系统共用, 故设计时应尽量只用次镜后的光学参量作为优化控制变量。所设计的激光光学系统如图 6 所示。

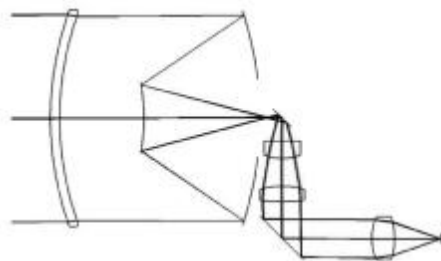


图 6 激光接收光学系统

Fig.6 Laser receive system

该系统两片透镜材料均为 ZnS, 系统的最大弥散斑直径为 $10.3 \mu\text{m}$, 满足成像要求。接收系统的透过率:

$$\eta = 0.95 \times 0.97^3 \times 0.9^2 = 0.73$$

可见满足技术要求。

3 结论

提出了一种新型的红外成像/主动激光雷达共孔径双模导引头的设计方案, 并设计出了满足技术要求的红外成像系统、激光发射和接收光学系统, 证明了在现有技术条件下该共孔径双模导引头设计方案是可行的。

在该设计中在系统中采用非球面镜, 从而减少了系统透镜的片数, 从根本上减轻了系统的质量。并且引入二色性分光镜实现激光/红外共孔径的结构, 使得系统空间大大减小, 保持系统结构的紧凑, 满足小型化的要求。采用探测器冷光阑作为整个系统的孔径光阑, 同时也是系统的出瞳, 实现了 100% 冷光阑效率。

参考文献:

- [1] Liu Longhe. Technology of Multi-model Composite Homing Guidance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [2] Di Xiaoguang, Yao Yu, Zhou Fengqi. Common aperture IR/Ladar dual-mode imaging seeker system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 577-578. (in Chinese)
- [3] Zhang Aihong, Cong Haijia, Fan Zhigang. Miniature design of high resolution optical system for infrared seeker[J]. Applied Optics, 2013, 34(4): 564-569. (in Chinese)
- [4] Fan Shipeng, Lin Defu, Lu Yulong, et al. Design and hardware-in-loop simulation of laser seeker's tracking loop [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3603-3607. (in Chinese)
- [5] Zuo Baojun, Li Runshun. The method of compounding multi-targets in infrared simulation[J]. Optical Technique, 2001, 27(1): 27-28. (in Chinese)
- [6] Chen Zhaobing, Cao Lihua, Wang Bing, et al. Outfield experiment research of mid-wave infrared detecting system by long distance mid-infrared laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1700-1705. (in Chinese)
- [7] Wang Yanxin, Liu Qi, Li Zhaoyi, et al. Research ordering department of air force equipment ministry [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 32(1): 32-47. (in Chinese)
- [8] Zio Baojun, Kuang Yaowu. Optical design of the IR/ladar dual-mode seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 495-499. (in Chinese)