

引用格式:毛延凯,仇振安,罗金平,等.共孔径红外/激光复合导引头系统仿真研究[J].电光与控制,2018,25(1):19-22. MAO Y K, QIU Z A, LUO J P, et al. Simulation of common-aperture IR/laser compound seeker system[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1):19-22.

## 共孔径红外/激光复合导引头系统仿真研究

毛延凯<sup>1</sup>, 仇振安<sup>2</sup>, 罗金平<sup>1</sup>, 王少飞<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;  
2. 陆航驻洛阳地区军事代表机构, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 针对空空导弹的末端制导,提出了一种红外成像与激光测距共孔径的复合导引头光学系统设计方案,可对空中典型目标进行精确探测和跟踪。该系统采用被动红外成像和主动激光测距两种模式进行复合制导,被动红外成像可对目标进行搜索和捕获,主动激光测距可获得精确的弹目距离信息。该复合导引头中被动红外成像与主动激光测距共用一套光学系统,既满足目标搜索和捕获阶段的大探测视场需求,又可以利用精确的弹目距离信息提高导弹比例导引的制导精度。

**关键词:** 被动红外成像; 主动激光测距; 空空导弹; 末制导; 共孔径; 复合导引头

**中图分类号:** TJ765.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.005

## Simulation of Common-Aperture IR/Laser Compound Seeker System

MAO Yan-kai<sup>1</sup>, QIU Zhen-an<sup>2</sup>, LUO Jin-ping<sup>1</sup>, WANG Shao-fei<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;  
2. Military Representative Office of Army Aviation in Luoyang, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the terminal guidance phase of air-to-air missiles, a scheme of common aperture IR-imaging/laser-ranging compound seeker optical system is proposed, which can implement precise detection and tracking of typical aerial targets. The seeker design scheme includes two modes: passive IR imaging mode and active laser ranging mode. The former is used for target searching and acquisition, and the later is used for obtaining precise missile-target range information. In the compound seeker, the two modes share the common optics system. The compound seeker can not only meet the requirements of the large field-of-view for target searching and acquisition, but also improve the guidance accuracy of the proportional guidance by using the precise range information.

**Key words:** passive IR imaging; active laser ranging; air-to-air missile; terminal guidance; common aperture; compound seeker

### 0 引言

现代战争中,空战的主要武器为空空导弹。红外成像导引头利用目标飞机与背景间红外辐射特性的不同而获取图像,由图像信息处理组件对摄取图像进行实时处理,借以对目标飞机进行远距精确探测和跟踪,从而引导空空导弹对目标飞机进行精确攻击。红外成像制导还具有较强的抗干扰能力、较大的成像范围和

较高的制导精度,并已在多种列装型号的导弹上得到了应用<sup>[1]</sup>。然而,红外成像制导也有无距离信息的局限性,无法给导弹提供准确的弹目接近速度信息<sup>[2]</sup>(弹目距离),影响导弹比例导引的制导精度,使其在实战中受到许多限制。

相对基于目标与背景温度差异进行探测的红外成像技术而言,激光测距技术是基于目标的反射率特性对目标进行探测,而反射率不易受环境(如环境温度、气溶胶沉降率等)变化的影响,从而可以获得目标的距离信息<sup>[3]</sup>。主动激光测距能够得到目标的距离信息和接近速度信息,可以在导弹制导律中起到修正作用,减小了纯角度信息修正带来的导弹前置角延迟,有效缓解了末

收稿日期:2017-03-13 修回日期:2017-10-22

基金项目:总装“十二五”装备预先研究项目(51301060204)

作者简介:毛延凯(1986—),男,河南洛阳人,硕士,工程师,研究方向为导引头总体设计。

制导阶段对导弹的过载压力。考虑到目前的红外成像导引头无法给导弹提供准确的弹目接近速度信息(弹目距离),影响导弹比例导引的制导精度,增加了激光测距功能,可以提供准确的弹目接近速度信息。采用目标角度(角速度)和目标距离信息进行融合计算,还可以有效降低虚警概率,提高导引头的抗干扰性能。

因而,将红外成像和激光测距进行复合的制导技术可以优势互补,利用红外成像可以获得较大的成像范围和较远的作用距离,而利用激光测距可以准确获得弹目距离信息以提高制导精度,具有抗干扰性能好、命中精度高的优点,是精确制导领域发展的一个重要方向。

## 1 复合导引头光学系统总体方案

目前,复合导引头在光路结构上主要有分离孔径式和共孔径式<sup>[4]</sup>两种形式。为了实现导引头的小型化,需要在确保探测性能的基础上使系统结构尽量简化。若采用分离孔径方案,受红外和激光各自口径限制,影响扫描范围。因此,本文采用共孔径方案,横滚俯仰式稳定平台结构,红外激光共用一部分光路,这种结构的导引头具有视场大、体积小、质量轻、成本低等优点<sup>[5]</sup>,而且具有大离轴角发射能力。采用中波制冷红外焦平面探测器和光纤耦合式激光测距机。激光器位于平台后方,将激光束经过光纤传输至光纤输出端进行发射。图 1 所示为复合导引头共孔径光学系统。

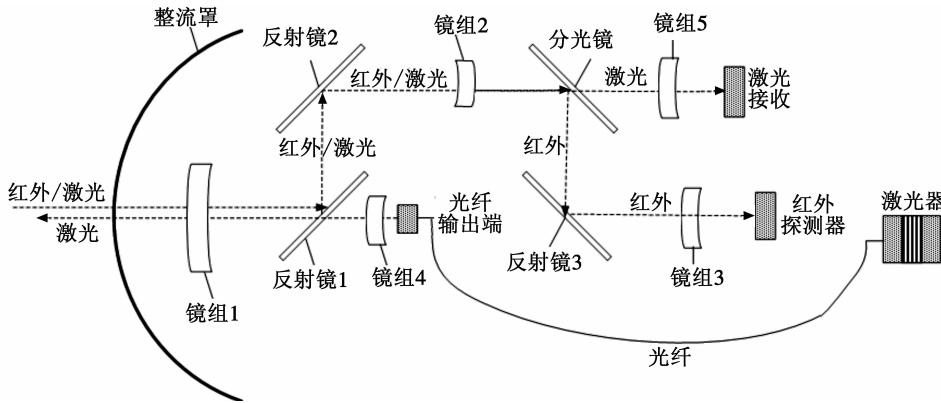


图 1 共孔径光学系统示意图

Fig. 1 Scheme of the common aperture optical system

整个光学组件由红外光学部件、激光发射光学部件和激光接收光学部件组成。红外光学部件由整流罩、镜组 1、反射镜 1、反射镜 2、镜组 2、分光镜、反射镜 3 和镜组 3 组成。反射镜 1 中心开孔,激光器产生的激光经光纤传输后,由镜组 4、镜组 1 和整流罩进行扩束,向外发射。激光接收光学部件由整流罩、镜组 1、反射镜 1、反射镜 2、镜组 2、分光镜和镜组 5 组成。整个导引头组件采用横滚加俯仰扫描构型:光纤输出端和镜组 4、镜组 1 和反射镜 1 固定,可以俯仰转动;激光接收

探测器与分光镜和镜组 5 固定,镜组 1、反射镜 1、镜组 4、光纤输出端、反射镜 2、镜组 2、分光镜、镜组 5、激光接收探测器、反射镜 3 可整体绕横滚轴 360°滚转,红外探测器不旋转,以此来保持横滚稳像,通过这种俯仰加横滚转动最终实现大范围的视场扫描。

系统的工作原理如下:红外成像组件经过光学系统汇聚红外波段的能量辐射,通过光电信号转换、放大、滤波,生成红外图像信息;红外图像信息传送到目标信息处理组件,目标信息处理组件对红外数字视频进行背景抑制、目标检出,并将目标与视场中心的偏差量传送到伺服控制系统,伺服系统驱动位标器转动使目标一直位于视场中心;当伺服控制组件判定导引头已经稳定跟踪目标后向激光测距组件发送测距命令,激光测距组件实时将弹目距离信息发送给伺服控制组件;伺服控制组件将融合后的目标信息上报给弹载计算机。

## 2 光学系统设计与仿真

### 2.1 红外光学系统

由于飞机尾焰辐射的主要成分为 4.4  $\mu\text{m}$  处的二氧化碳的分子辐射,而目前红外空空导弹主要是跟踪尾焰辐射为主,因此采用碲镉汞中波制冷红外焦平面探测器, 320  $\times$  265 面阵,像元尺寸 30  $\mu\text{m}$ 。根据红外作用距离公式<sup>[6]</sup>,对于远距离点目标,红外探测系统作用距离公式为

$$R = \sqrt{\frac{\pi D_0^2 D^* J \tau_a \tau_0 \eta}{4 (f'/D_0) (\varepsilon A_d \Delta f)^{1/2} R_{s,N}}} \quad (1)$$

式中:  $D_0$  为光学系统有效通光口径;  $D^*$  为探测器比探测率;  $J$  为目标辐射强度;  $\tau_a$  为大气透过率;  $\tau_0$  为光学系统透过率;  $\eta$  为能量利用效率;  $f'$  为光学系统焦距;  $\varepsilon$  为探测器填充系数;  $A_d$  为探测器面元的面积;  $\Delta f$  为电子系统带宽;  $R_{s,N}$  为系统信噪比。可以计算出红外光学系统入瞳直径需求,设计红外光学系统

参数如下:  $D_0 = 50 \text{ mm}$ ,  $f' = 100 \text{ mm}$ 。在此基础上,设计结果如图 2 所示。

红外光学组件由于反射镜 1 挖孔遮拦,传递函数比无遮拦状态低,该光学系统的传递函数曲线如图 3 所示,由图 3 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,满足成像要求。

透过率方面,通过红外光学系统(含整流罩) 3.7 ~ 4.8  $\mu\text{m}$  波段的平均透过率算式为<sup>[7]</sup>

$$\tau_{\text{IR}} = \tau_0 r^m r_s \tau_1 \prod_{i=1}^n e^{-\alpha_i \sum d_i} \quad (2)$$

式中： $\tau_{\text{IR}}$  为红外光学系统透过率； $\tau_0$  为整流罩透过率； $r$  为反射镜的反射率； $m$  为反射镜数目； $r_s$  为分光镜的反射率； $\tau_1$  为透镜双面平均透过率； $k$  为透镜数量； $n$  为透镜材料种类数量； $\alpha_i$  为光学材料  $i$  的平均吸收系数； $\sum d_i$  为光学材料  $i$  透镜总厚度。代入透过率算式计算得  $\tau = 0.63$ ，满足工作波段内透过率要求。

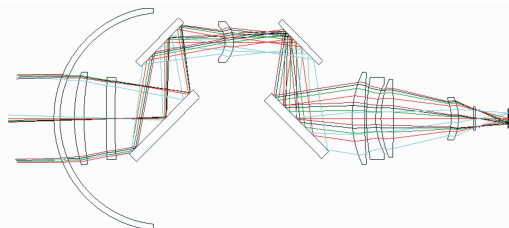


图 2 红外光学系统  
Fig. 2 IR optical system

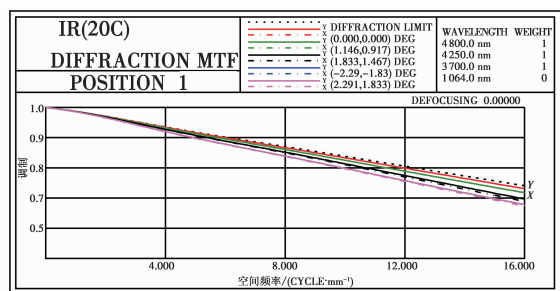


图 3 红外光学系统 MTF 曲线  
Fig. 3 MTF curves of IR optical system

### 2.2 激光发射光学系统

根据系统性能要求，在设计发射系统时，可将位于反射镜 1 后端的光纤输出端按点光源进行设计。激光器波长  $1.064 \mu\text{m}$ ，单脉冲能量  $\geq 7 \text{ mJ}$ ，脉宽  $10 \text{ ns}$ ，光纤芯径  $a = 100 \mu\text{m}$ ，数值孔径  $N_A = 0.15$ ，激光发射发散角  $\theta = 1.5 \text{ mrad}$ ，因此激光发射系统的焦距  $f = a/\theta = 66.5 \text{ mm}$ 。激光发射系统的口径  $D = 2f \tan(\text{asin}(N_A)) = 20 \text{ mm}$ 。图 1 中反射镜 1 中心挖孔，光纤输出端发射出的激光束可顺利透过，激光发射光学系统设计结果如图 4 所示。

透过率方面，通过激光发射光学系统（含整流罩）的透过率算式为

$$\tau_{\text{LS}} = \tau_0 \tau_1^{k_1} \tau_2^{k_2} \prod_{i=1}^n e^{-\alpha_i \sum d_i} \quad (3)$$

式中： $\tau_{\text{LS}}$  为激光发射光学系统透过率； $\tau_1$  为激光/红外共用透镜双面透过率； $\tau_2$  为单独激光透镜双面平均透过率； $k_1$  为激光/红外共用透镜数量； $k_2$  为单独激光透镜数量； $\tau_0$  为整流罩透过率； $n$  为透镜材料种类数量； $\alpha_i$  为光学材料  $i$  的平均吸收系数； $\sum d_i$  为光学材料  $i$  透镜总厚度。代入透过率算式计算得  $\tau = 0.78$ ，满足

透过率要求。

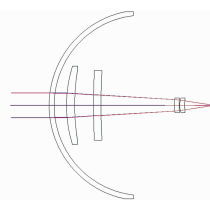


图 4 激光发射光学系统  
Fig. 4 Laser emitting system

### 2.3 激光接收光学系统

激光发散角为  $1.5 \text{ mrad}$ ，作用距离为  $10 \text{ km}$ ，对某目标飞机完全位于激光光斑内，并且部分激光光斑位于目标之外，不会被反射。根据空中小目标的最大测距方程<sup>[8]</sup>，有

$$R^4 = (P_t D^2 T_t T_r \rho A_c T_a^2) / (\pi P_r \theta_t^2) \quad (4)$$

式中： $R$  为目标距离； $P_t$  为激光辐射器的发射峰值功率； $D$  为接收光学系统有效直径； $T_t$  为发射光学系统的透过率； $T_r$  为接收光学系统的透过率； $\rho$  为目标反射率； $A_c$  为目标的雷达散射截面； $T_a$  为大气的单程透过率； $P_r$  为激光接收组件的接收灵敏度； $\theta_t$  为激光发散角。

综合考虑根据作用距离等要求，此处所设计的激光接收系统的有效通光口径为  $56.5 \text{ mm}$ ，与红外共口径，激光接收 RMS 弥散斑不大于  $0.1 \text{ mm}$ ，设计结果见图 5。

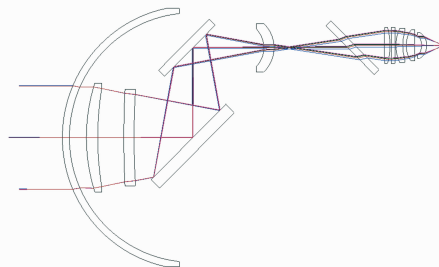


图 5 激光接收光学系统  
Fig. 5 Laser receiving system

激光接收光学组件（含整流罩）的透过率算式为

$$\tau_{\text{LR}} = \tau_0 \tau_s r^m \tau_1^{k_1} \tau_2^{k_2} \tau_{\text{filter}} \prod_{i=1}^n e^{-\alpha_i \sum d_i} \quad (5)$$

式中： $\tau_s$  为分光镜透过率； $\tau_{\text{filter}}$  为窄带滤光片透过率。代入透过率算式计算得  $\tau = 0.62$ ，满足透过率要求。

## 3 讨论

### 3.1 红外激光共孔径无热化设计技术

由于常用的中波红外光学材料硅和锗不透激光，可用的光学材料较少，增加设计难度。光学系统需要在常温、低温、高温以及气动加热产生热梯度等条件下都保持良好的成像质量，无热化设计需要同时满足这几个温度条件，设计难度更大。

解决措施为红外和激光共用部分，需要在这两个波段都有较高的透过率，可选用硫化锌、硒化锌、硫系

玻璃、氟化物、蓝宝石等材料。根据常用中波红外光学材料的热特性和色散特性选择合适的材料<sup>[9]</sup>,分配不同光焦度,对镜组 1、镜组 2 进行局部无热化设计,有利于激光和红外两个波段同时消热差。激光部分只需要消热差,无需消色差,因此只要考虑材料的热差系数,可选用 K9,ZF6 玻璃等材料。

### 3.2 小型化光纤耦合激光器设计技术

传统的激光测距机存在体积大、质量大和发热多等问题,限制了激光发射/接收系统在导引头这样的小空间系统中的应用。本文中由于激光器较大,无法直接安装在扫描反射镜后端。解决措施为寻求小型化光纤耦合半导体激光器,可以将激光器分散放置在导引头中:将激光器置于后端,能量束通过光纤耦合方式引至反射镜 1 后端再发射,从而解决了传统激光器因体积大不能放入导引头的问题。

## 4 结束语

提出了一种红外成像与激光测距共孔径的复合导引头系统,以被动红外成像对目标进行搜索、捕获和跟踪,以主动激光测距获得弹目距离信息,既满足目标搜索和捕获阶段的大探测视场需求,弹目距离信息又可以提高导弹比例导引的制导精度。此外,对红外激光共孔径无热化设计技术和小型化光纤耦合激光器设计

技术也进行了讨论,该系统距离实际工程应用尚有许多工作,但从原理上讲,采用现有的技术和器件是完全可以实现的,对于我国中距红外空空导弹的研制也有一定的参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 郑志伟,白晓东,胡功衍,等.空空导弹红外导引系统设计[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [2] 何均.毫米波/红外共孔径复合导引头技术分析[J].电讯技术,2012,52(7):1222-1226.
- [3] 王雪祥,严高师,张弛,等.提高短距离脉冲式激光测距精度的研究[J].光学技术,2009,35(5):792-795.
- [4] 赵超,杨号.红外制导的发展趋势及其关键技术[J].电光与控制,2008,15(5):48-53.
- [5] 孙赤全,赵侃,孟军合,等.滚仰式导引头红外光学系统设计[J].红外与激光工程,2017,46(2):145-150.
- [6] 钟任华.飞航导弹红外导引头[M].北京:宇航出版社,1995.
- [7] 李林.现代光学设计方法[M].北京:北京理工大学出版社,2009.
- [8] 王飞,赵远,张宇,等.激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究[J].光学学报,2010,30(10):2771-2775.
- [9] 申碧云,高明.红外光学系统被动式无热化设计方法[J].电光与控制,2012,19(6):70-73.
- [10] 陈明建,刘春生,王秀.相位建模法与平滑相位差分法在瞬时频率估计中的应用[J].舰船电子对抗,2008,31(6):73-77.
- [11] 黄晓红,邓振森.改进的相位展开算法及其在瞬时频率估计中的应用[J].电子学报,2009,37(10):2266-2272.
- [12] WANG P, LI H B, HIMED B. Instantaneous frequency estimation of polynomial phase signals using local polynomial Wigner-Ville distribution[C]//International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2010:184-187.
- [13] ZHONG J G, HUANG Y. Time-frequency representation based on an adaptive short-time Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(10): 5118-5128.
- [14] 曾德国,熊辉,龙柯宇,等.基于相位差分的脉内调制信号类型识别[J].电子测量与仪器学报,2009,23(10):85-90.
- [15] 姚帅,方世良,王晓燕.联合 STFT-迭代变权拟合的 LFM 信号参数估计方法[J].信号处理,2012,28(10):1408-1415.
- [16] 白航,赵拥军,胡德秀,等.基于改进时频分析方法的雷达信号瞬时频率估计[J].信号处理,2012,28(2):257-263.

(上接第 18 页)

- phase function for multiple LFM signals analysis [J]. Electronics Letters, 2015, 51(5):411-413.
- [2] YE C C, LIANG H, LIU H F, et al. An effective method for joint estimation of chirp rates, initial frequencies and DOAs of multiple LFM signals with sub-Nyquist spatial-temporal sampling [C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 2015:1-5.
  - [3] BOUCHIKHI A, BOUDRAA A O, CEXUS J C, et al. Analysis of multicomponent LFM signals by Teager Huang-Hough transform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2):1222-1233.
  - [4] WANG P, LI H, DJUROVIC I, et al. Integrated cubic phase function for linear FM signal analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(3):963-977.
  - [5] 黄知涛,周一宇,姜文利.基于相对无模糊相位重构的自动脉内调制特性分析[J].通信学报,2003,24(4):153-160.
  - [6] 宋云朝,万群,毛祺,等.一种稳健的基于解卷叠的相位差分瞬时测频方法[J].电子信息对抗技术,2008,23(4):12-15.
  - [7] 周志军,祝婷.电子侦察测频系统的建模与仿真[J].电子科技,2015,28(2):30-34.