

## 共孔径红外/激光双模成像导引头系统研究\*

遆小光<sup>1</sup>,姚郁<sup>1</sup>,周凤岐<sup>2</sup>

(1.哈尔滨工业大学 控制与仿真中心,黑龙江 哈尔滨 150001;

2.西北工业大学 航天学院,陕西 西安 710072)

**摘要:**针对巡航导弹以及各种对地攻击的灵巧炸弹的末制导段,提出了一种共孔径红外/脉冲激光(IR/Ladar)双模成像导引头系统设计方案,可用于对地面固定目标和各种可重定位(Relocatable)目标进行精确地识别和跟踪。该系统采用了被动红外和主动脉冲激光两种成像模式,以被动红外成像来辅助导引头对目标的搜索和捕获,以主动激光雷达成像来完成对目标的精确识别和跟踪,并且被动红外与主动激光成像系统共用一套光学系统,这样既满足目标搜索和捕获阶段的大探测视场的要求,又满足了目标识别跟踪阶段的高分辨率要求。

**关键词:**双模导引头; 被动红外成像; 主动脉冲激光成像

**中图分类号:**TJ765.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)05-0577-05

## Common aperture IR/Ladar dual-mode imaging seeker system\*

DI Xiao-guang<sup>1</sup>,YAO Yu<sup>1</sup>,ZHOU Feng-qi<sup>2</sup>,

(1.Control and Simulation Center,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China;

2.College of Astronaut,Northwestern Polytechnical University,Xi'an 710072,China)

**Abstract:**According to the characteristics of the terminal guidance phase of cruising missile, the scheme of common aperture IR/Ladar dual-mode imaging seeker system is proposed. The seeker system can precisely track and recognize the stationary and relocatable object on the ground. The seeker design scheme includes two imaging modes, the passive IR imaging mode and active pulse laser imaging mode. The passive infrared imaging mode is used for the coarse object search and acquisition and the active pulse laser imaging mode is used for precise object recognition and tracking. At the same time, the two imaging mode use the common optics. So the seeker system can not only meet the requirements of the large field of view for object search and acquisition, but also meet the requirements of high resolution for object recognition and tracking.

**Key words:** Dual-mode seeker; Passive IR imaging; Active pulse laser imaging

收稿日期:2005-01-10; 修订日期:2005-03-15

\* 基金项目:西北工业大学博士论文创新基金资助项目(5211102-G080014103);中国博士后科学基金资助项目(2005037184)

作者简介:遆小光(1972-),男,黑龙江友谊县人,博士,研究领域为计算机视觉、图像制导、激光雷达及飞行器控制。

## 0 引言

激光是一种受激辐射光波,具有良好的时间相干性和空间相干性,以及方向性强、亮度高、单色性好的特点,其频谱范围实现了从紫外到红外、到毫米波等各种波段,激光诸多的优越特点,使其非常适合于精确制导武器。由于红外激光所具有的隐蔽性和技术成熟的特点,已成为激光成像制导系统使用的主流。目前国内外的巡航导弹的末制导导引头多采用被动红外、微波雷达和毫米波雷达导引头,这些导引头虽然在一定程度上满足末制导段识别和跟踪目标的要求,但存在低的探测概率和不可接受的高的虚警概率问题<sup>[1]</sup>。相对于微波和毫米波导引头,由于红外激光波长短,因此具有高的角分辨率,另外由于其单色性和方向性好,光束束散角比较小,几乎无多路径现象,能量集中,无旁瓣引起的杂波影响,使其具有高的跟踪精度。相对于被动红外成像导引头,激光主动导引头是基于目标背景的反射率差异来对目标进行探测的,反射率差异相对于温度差异较不易受环境变化的影响(如环境温度、云层厚度、气溶胶沉降率的变化等)<sup>[2]</sup>,并且可获得目标与环境无关的物理信息,如目标的速度、距离和反射率等信息,提供目标的 3D 距离像、速度像和 2D 强度像,因此可提供给识别系统更多的目标信息,具有更高的目标识别精度。虽然激光主动成像制导导引头具有上述诸多优点,但由于受导引头体积和激光器功率的限制,使得激光主动成像导引头存在作用距离比较近(一般小于 1 km)、搜索范围比较小的问题。针对此问题,考虑到被动红外成像系统具有较大的成像范围和较远的作用距离,结合主动激光成像与被动红外成像两者的优点,给出了一种共孔径被动红外/主动激光双模成像导引头的设计方案,不仅可以有效地避免上述问题,而且不需提高对探测器和激光器的设计要求,采用现有的技术即可实现。

## 1 无扫描激光主动成像技术<sup>[3-7]</sup>

激光主动制导导引头技术大体经历了一个从气体激光器到固体激光器(主要指半导体激光器和半导体二极管泵浦激光器)、从非成像到成像及从扫描成像到无扫描成像的发展过程。扫描成像的主要问题是

成像速率低、成像分辨率低;并且由于引入了扫描机构,系统的体积和价格也随之增加;另外,大多数扫描机构都具有活动部件,降低了系统的可靠性<sup>[3]</sup>,电光和声光扫描机构虽然不具有活动部件,但目前存在扫描角度小、光透过率低的缺点<sup>[8]</sup>。同时,由于扫描机构的引入,不仅带来了系统成像误差,而且把导弹和目标之间的相对运动耦合进成像过程,使所成图像产生动态畸变,这就需要对动态成像畸变进行修正,而动态成像畸变修正算法的大运算量将极大地影响制导系统的实时性<sup>[4]</sup>。

随着固体激光器技术的发展,针对扫描激光成像技术存在的问题,西方各国于 20 世纪 90 年代开始对无扫描激光成像技术进行研究,并取得了一系列的成果<sup>[6,7]</sup>,该技术克服了激光扫描成像技术带来的问题。

目前比较成熟的无扫描激光成像技术主要有两种:对连续波激光强度进行相位调制的无扫描激光成像技术<sup>[7]</sup>;对连续波激光强度进行频率调制(FM)的无扫描激光成像技术<sup>[6]</sup>。采用这两种技术设计的无扫描成像系统都没有扫描机构,而有大的照射视场和接收视场,可同时获得整个照射视场内的目标和场景的 3D 距离像和 2D 强度像。但是,前者采用的是相位法测距,主要缺点是存在距离模糊(即最大的成像距离不能超过调制波长)和距离歧义性(即探测器的一个输出值对应着两个相位,从而对应着两个距离值);后者,系统设计复杂,产生具有满意的带宽和线性度的啁啾信号需要高的代价。这两种无扫描激光成像技术应用到导弹导引头设计中,存在的主要问题仍然是作用距离短(小于 1 km),照射和接收视场无法满足搜索捕获目标的要求。

## 2 共孔径红外/激光双模成像导引头系统

前面介绍的无扫描激光成像方式都是针对连续波激光,采用连续波激光的主要缺点是能量损耗大及能量利用率低。从激光作用距离方程可知,在发射激光能量相同和采用探测器相同的情况下,由于脉冲激光相对于连续波激光有更高的峰值功率,因此有更远的作用距离。并且由于采用脉冲式激光,还可利用目前发展比较成熟的高功率、小体积的半导体二极管泵浦固体激光器。美国雷神(Raytheon)公司开发的用于

导弹导引头的单脉冲成像闪烁激光雷达(Flash Ladar),作用距离可达7~10 km<sup>[9]</sup>。基于此,针对上节指出的单模无扫描激光成像导引头存在的问题,给出一种共孔径红外/脉冲激光双模成像导引头系统设计方案,其应用领域为巡航导弹和各种对地攻击武器(如灵巧炸弹)的末制导段,可对背景和目标辐射的被动红外光波以及主动激光照射回波同时成像,用于对地面固定目标和各种可重定位的目标(如各种军车、装甲车、导弹发射车等)进行识别和跟踪,要求发射激光经过扩束后照射整个关注视场,并且探测器需大到可以对整个关注视场成像,其结构示意图见图1。

采用被动红外成像目的有两个:辅助目标搜索和辅助目标探测识别。对于被动红外的辅助目标搜索作用可作如下解释:采用无扫描激光成像体制,一般激光焦平面探测器不可能很大,虽然大的探测器可以对应较大的接收视场,但是也要求提高激光器的发射功率以满足大的照射视场的要求,这样会增加激光器的体积和价格;另一方面,对于大的探测器为了保证每个像素有足够的横向分辨率势必要把每个探测单元做得足够小,而这样也将提高制作探测器的工艺复杂程度和价格。

图1的系统中采用两个探测器(一个用于被动红外探测,一个用于主动激光探测),其中被动红外探测器采用大面积的焦平面阵列以对应大的视场,但是其探测单元集成度比较低,即所采用的焦平面阵列由较少的探测单元数组成,每一探测单元尺寸大且对应空间分辨率比较低;而主动激光探测器可采用较小面积且探测单元集成度比较高的焦平面探测器(如探测器的面积可根据作战指标给定的盲区距离和最大攻击

目标来确定,即在盲区时最大目标刚好充满整个探测器),而每一探测单元有高的成像分辨率和小的尺寸以利于目标的识别。当巡航导弹进入末制导段时,由于激光作用距离的限制以及存在导航误差,目标一般不是正好出现在主动激光探测器接收视场内,这样可利用具有大视场、较远的探测距离以及较粗成像分辨率的红外探测器,搜索出存在目标的可疑区域;然后再利用高分辨率的激光探测器在缩小的目标范围内,对目标进行精确的探测和识别。需说明的是,在这里激光探测采用的是直接探测方式,因为被动红外成像系统的引入放宽了主动激光的最大作用距离要求;其次是目前激光器和探测器技术的进步使得采用直接探测方式也可得到比较好的探测效果<sup>[9,10]</sup>,因此在这里未采用具有更高的探测灵敏度、但也更加复杂和高成本的相干探测方式。

对于被动红外探测器的辅助探测识别作用解释如下:首先被动红外成像通道可辅助主动激光成像通道对目标的筛选和决策,如作战任务要求攻击地面上的一些车辆目标,由于车辆目标的发动机是强辐射源,因此可利用被动红外通道把各种车辆目标从背景中分离出来。其次,可辅助目标的分割,如激光回波信号受到空气中的粉尘和水分子等后向散射的杂波干扰,可能引起目标3D距离像产生形状畸变和2D强度像发生模糊,利用目标和各种干扰热辐射特性的差异,可以容易地把目标从各种干扰中分离出来。第三,对于跑道、路面等基于激光距离图像不容易从周围的环境中探测和分割出来的目标,一般与周围环境的热对比度不同,采用红外图像可以辅助导引头对目标的识别。最后,为了防止背景和目标辐射对激光主动成像

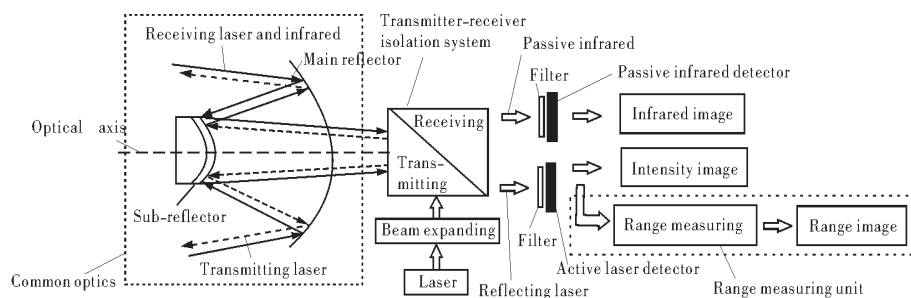


图1 共孔径红外/脉冲激光双模成像导引头系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of common aperture IR/Ladar dual-mode imaging seeker system

通道的干扰,一般选用的激光波长范围远离目标和背景的主要红外辐射波段,这样被动红外成像通道和主动激光成像通道将对目标的细节有不同的侧重,可采用图像融合的方法以利用更多的目标信息,从而提高对目标的识别率。

下面对图 1 做进一步的解释,其中收发共用的光学系统采用的是卡塞格伦型反射式望远镜,目的是满足无扫描激光成像系统大收发视场的要求,以及小的轴向尺寸可满足一般导引头的长度要求。变焦扩束系统可以满足无扫描成像泛光照射的要求以及导弹相对目标由远及近的照射视场的要求。收发隔离装置用于隔离发射激光信号和接收激光信号以及对目标辐射的被动红外信号和目标反射的主动激光信号进行分离。加虚线框的距离测量单元可一次脉冲成像即可获得整个目标场景的 3D 距离像。图 2 是收发隔离装置的光路图,其中光开关实际上是一个偏振控制装置,可由布儒斯特(Brewster)分束片和  $\lambda/4$  波片组成,其作用是根据发射激光和接收激光偏振方向的不同,使得光开关反射发射激光,透射接收激光,从而实现收发激光信号的隔离。分束镜 1 的作用是反射目标辐射的红外信号,透射目标反射的主动激光信号。需注意的是要求选择激光器的发射激光频率一定要与目标的主要红外辐射波段间有足够的带宽,使分束镜 1 可对两者进行充分的分离。分束镜 2 是全反射镜。

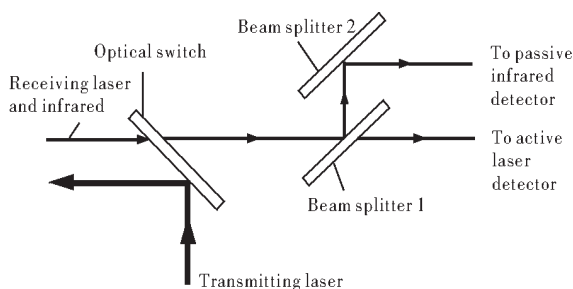


图 2 收发隔离装置光路图

Fig.2 Optical path of transmitter-receiver isolation system

### 3 实施难点考虑和建议

对于上述系统的实际实施,主要存在以下问题:一是主动激光和被动红外的波段的选择,因为选择的波段既要在频谱上有足够的间隔以实现接收时两者的隔离,又要有好的大气传输特性。二是所设计收发

隔离装置必须对收发激光、接收的主动激光与被动红外信号进行充分的隔离,这样才能减少信号能量的损失和信号源之间的串扰,因此双色片设计(即分束镜 1)和收发隔离光开关的设计也是问题实施的一个难点。三是被动红外图像与主动激光强度和距离图像的融合问题也是本装置实施过程中亟需解决的问题。

对于第一个问题,随着小型高功率固体激光技术的发展,激光器可选用近红外波段的二极管泵浦激光器,如  $1.06\ \mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光器、 $1.047\ \mu\text{m}$  的 Nd:YLF 激光器等,另外随着光学参量振荡器(OPO)技术的发展,获得人眼安全的  $1.57\ \mu\text{m}$  的固体激光器已成为可能,采用近红外波段的激光器的优点是其探测器不需制冷,且所需的 Si:APD 焦平面探测器也容易获得。对于被动红外波段可采用  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  中红外波段,这样可以在频谱上与主动激光所采用的近红外波段相隔离。目前对于中红外波段的焦平面探测器主要采用 PtSi、InSb 和 HgCdTe 焦平面探测器,PtSi 焦平面探测器其特点是具有高的量子响应均匀性,且由于其采用硅 MOS 技术,因此可以大批量地生产大面阵的探测器,其主要缺点是需制冷(需制冷到小于  $80\ \text{K}$ )并且量子效率低( $<1\%$ )。而对于 InSb 和中波红外 HgCdTe 焦平面探测器,其优势是都具有较高的量子效率( $>65\%$ )和好的温度分辨率,且在整个中红外波段都具有相当好的响应均匀性,两者都需要制冷,InSb 需制冷到  $88\ \text{K}$ ,而 HgCdT 仅需制冷到  $120\ \text{K}$ ,但是这两种探测器的价格要高于 PtSi 焦平面探测器,并且大面阵焦平面阵列的批量生产技术还不成熟。目前比较有发展潜力的中红外波段焦平面探测器技术是量子阱探测技术(MW QWIP),其具有较高量子效率和好的温度分辨率,且利用目前已经发展成熟的 GaAs 生产线,可以大批量生产大面阵的中红外波段量子阱焦平面探测器,因此在将来有可能最终取代 PtSi 焦平面探测器<sup>[11]</sup>。

对于第二个问题,由于被动红外和主动激光信号在频谱上是分离的,因此从原理上讲,设计出对中波红外具有高反射性而对近红外波段的主动激光具有高透射性的双色片是完全可行的,目前研究的重点是如何获取具有高效率、低价格的材料。基于偏振控制的收发隔离技术目前比较成熟,因此光开关是完全可

以工程实现的。

对于第三个问题,目前在有关红外图像和激光雷达所成距离图像的算法研究方面已经作了很多的工作,这方面的详细介绍请参阅参考文献[1]和[12],但主要集中在像素级的图像融合方面,而为了进一步提高目标识别的精度,应在特征级的图像融合及有关算法的实时性和硬件实现方面作进一步的工作。

#### 4 结束语

针对应用单模激光主动成像导引头存在的问题,提出了一种共孔径红外/脉冲激光(IR/Ladar)双模成像导引头系统设计方案,以被动红外成像来辅助导引头对目标的搜索和捕获,以主动激光雷达成像来完成对目标的精确识别和跟踪。可用于巡航导弹以及各种对地攻击的灵巧炸弹的末制导段,完成对地面固定目标和各种可重定位目标的精确识别和跟踪。该系统投入到实际应用中还需作进一步的工作,但是从原理上讲,采用现有的技术和器件是完全可以实现的,对于我国激光主动成像导引头系统的研制也有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Paul Claps,Mark Cullen,Duncan Harris.Real-time image processing and data fusion of two-channel imaging laser radar sensor[A].SPIE[C].1992,1633.281-287.
- [2] Harney R C.Military application of coherent infrared radar[A].SPIE[C].1981,300.2-10.

- [3] Monson T C,Grantham J W,Childress S W.Characterization of scannerless lidar[A].SPIE[C].1999,3707.409-420.
- [4] DI Xiao-guang,ZHOU Feng-qi,ZHOU Jun.The study of correcting method of distortion resulting from missile scanning guidance lidar imaging moving target [J].Journal of Projectiles,Rockets, Missiles and Guidance(逄小光,周凤岐,周军.扫描激光制导雷达对运动目标成像畸变修正方法研究.弹箭与制导学报),2002,22(4):115-117.
- [5] Broome K W,Cartens A M,Hudson J R,et al. Demonstration of Advanced Solid State Ladar (DASSL) [A].SPIE [C].1997,3065.148-157.
- [6] Barry Stann,Ahmed Abou-Auf,Scott Frankel,et al.Research progress on scannerless lidar system using a laser diode transmitter and FM/cw radar principles[A].SPIE[C].2001,4377.12-22.
- [7] John P.Anthes,Phils Garcia. Non-scanned LADAR imaging and application[A].SPIE[C].1993,1936.11-12.
- [8] ZHAO Yuan,Cai Xi-ping,CHEN Zhong-xian,et al. Overview of imaging laser radar technique[J].Laser and Infrared(赵远,蔡喜平,陈锺贤,等.成像激光雷达技术概述.激光与红外),2000,30(6):328-330.
- [9] Maurice J Halmos,Michael D Jack,James F Asbrock,et al. 3-D flash lidar at Raytheon[A].SPIE[C].2001,4377.84-97.
- [10] ZHANG Yu,TANG Meng,CHEN ZHONG-xian,et al.Modeling and simulation of lidar for direct detection[J].Infrared and Laser Engineering(张宇,唐勐,陈锺贤,等.直接探测激光雷达系统的建模与仿真.红外与激光工程),2004,33(6):572-575.
- [11] Guenther Riedl,Dr Michael Assel,Dr Alfred Fendt,et al.IR focal plane array seekers for ground-to-ground and air-to-ground missile[A].SPIE[C].2001,4369.201-209.
- [12] David A Fay,Jacques G Verly,Michael I Braun,et al.Fusion of multisensor passive and active 3D imagery[A].SPIE [C].2001,4363.219-230.

#### 书讯

### 《现代光学与光子学的进展》简介

由《红外与激光工程》编辑部编辑,天津科学技术出版社出版的《现代光学与光子学的进展》一书,于2003年2月出版发行,主编母国光院士。此书共收集整理王大珩院士近10年来的部分学术报告和论文以及中国光学界20位院士撰写的学术论文。内容包括:现代光学与光子学在国民经济、国防建设和各学科领域的进展和应用;现代光学与光子学与其他学科交叉融合产生的新技术或潜在应用;对我国光子学技术和光电子产生发展的意见和建议。

全书共计59.5万字,472页,定价88元(含邮费),有需求者请与《红外与激光工程》编辑部联系,联系电话:(022)23666400;(022)23009840。