

弹载激光主动成像制导技术发展现状分析

李建中, 彭其先, 李泽仁, 李 剑, 王荣波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 激光制导武器具有低成本、高效费比、高精度等特点, 已成为现代战争中最为重要的精确打击武器之一。介绍了激光制导的各种类型并比较了其优缺点, 分析了最有发展前途的制导方向之一——弹载激光主动成像制导的工作原理、特点、影响性能的因素、技术路线及技术难度, 尤其是深入探讨了扫描和非扫描两种工作方式。综述了弹载激光主动成像制导的国内外发展现状与趋势, 重点解读了低成本自主攻击系统 LOCAAS、“网火”武器系统中的巡飞攻击导弹 LAM、通用激光雷达导引头 CLAS、“竖锯”计划 Jigsaw 等多套典型的非扫描成像激光雷达系统, 总结并提出了可行的研制方案和进一步发展该技术的建议。

关键词: 激光主动成像制导; 非扫描成像; 雪崩光电二极管; 弹载

中图分类号: TN958.98; TN959.2+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1117-07

Technology of missile-borne laser active imaging guidance

Li Jianzhong, Peng Qixian, Li Zeren, Li Jian, Wang Rongbo

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering and Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The laser guidance weapon is becoming one of the most important beating weapons and playing important roles in the modern war, with low cost, high effect-cost rate and high precision. The different types of laser guidance were introduced, and application perspectives of Missile-borne Laser Active Imaging Guidance (MBLAIG) in laser guidance was commented, its working principles, characteristics, factors affecting the detection capability, technical route and technical difficulty were introduced, scanning imaging and scannerless imaging are analyzed in detail. The recent advances and future development trends of MBLAIG were reviewed, and the typical scannerless imaging laser guidance system, low-cost autonomous attack system (LOCAAS), loitering attack missile (LAM), CLAS and Jigsaw were described in brief. A feasible solution and some valuable suggestions for development MBLAIG were presented, and the key technology for the new laser radar system was summarized also.

Key words: laser active imaging guidance; scannerless imaging; APD; missile-borne

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-09-25

作者简介: 李建中(1982-), 男, 硕士生, 助理研究员, 主要从事光电测试技术研究。Email: jianzhong265@163.com

导师简介: 彭其先(1970-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电测试技术研究。Email: qxpeng@126.com

0 引言

精确制导^[1-2]是现代高科技武器的发展趋势,它采用高精度制导系统控制和导引弹头对目标进行有效攻击,具有较高的命中精度。美国国家情报委员会在 2012 年 12 月 10 日发布了一份关于未来发展预测的报告,明确指出精确打击是未来战争的两大特征之一,未来 15~20 年,由于核心部件——成像制导系统的实用化,精确打击武器将大范围扩散,到 2030 年前后,世界各国政府,乃至非政府参与者都可能拥有精确打击能力。

精确制导技术主要有雷达制导、激光制导、红外制导、GPS 制导、电视制导等类型,其中激光成像制导^[3-4]作为研究广泛且富有成效的一种制导类型,由于其独特的工作机制,具备较高的角度、距离和速度分辨率,并具有抗干扰能力强、信息量大、灵敏度高、结构简单、成本低、易于与其他制导方式相结合进行复合制导等优势。由于具备众多优点,激光制导武器逐渐成为精确制导武器家族中一颗耀眼的新星,并在近年来的多次局部战争中获得了突出的表现,尤其是以其命中精度高和作战效能显著而名扬天下,成为各国(尤其是美国)在未来战争中实现“精确打击”、“斩首行动”的首选武器。

在各种类型的激光制导技术中,弹载激光主动成像制导^[5-6]是难度最大的一种技术,也是最重要的发展方向,国内对此具有迫切的军事需求。文中对弹载激光主动成像制导技术的理论基础及技术路线进行了深入分析,为研制相应的系统提供参考。

1 制导类型

弹载激光制导分为驾束制导^[7]、半主动寻的制导^[8]、主动寻的制导^[5-6]等工作方式。

驾束制导需要在弹体飞行的全程中照射目标,射程受限,同时也存在激光器及其载体易被敌方发现并击毁的风险。

激光半主动寻的制导技术成熟,是目前大多数弹载激光制导武器采用的方式,国内已装备了部队,但该制导方式需要载机或前方战士进入敌占区并靠近敌方目标,用弹外的激光目标指示器对目标实施主动照明,并且在目标被摧毁之前,目标指示器一直

不能撤离,从而增加了被敌方发现并击毁的概率,而目标指示器一旦被敌方摧毁,将导致制导武器失灵。此外,载机或前方战士必须靠近敌方目标并保持较长时间,存在着被敌方发现并反击的巨大危险。

随着技术的不断发展,目前的弹载激光制导武器都在向“发射后不管”的主动寻的制导方向发展,和激光半主动寻的制导相比,激光主动寻的制导武器不需要在弹外配置专门的激光目标指示器,而是将目标指示和寻的功能集成在弹体上,预先将打击目标的激光成像特征装订在导弹中,采用主动成像方式,获得目标的三维图像,并自动识别目标,主动寻的,直到命中目标。弹载激光主动成像的制导方式可以实现实时的智能化打击,同时还可以避免载机或前方战士靠近敌方目标后被敌方发现并反击的巨大危险。此外,激光主动成像制导还可以与其他多种制导方式相结合,实现弹载复合制导,有利于提高制导精度和应付各种复杂的战场环境,从而发挥全天候作战的优势,这也是武器系统实现精确打击的重要发展方向。

激光主动成像制导主要用于弹载末段制导,国内各军工单位已提出了两种主要的需求:一种是由于近距离作战的小型制导装备,应用于精确制导炸弹、火箭弹、空对空导弹、空对地导弹等小型弹载;另一种是用于远距离作战的大型制导装备,应用于巡航导弹的弹载末段制导。

综上所述,高速三维成像的弹载激光主动寻的制导正逐渐成为一项刚刚兴起、正待发展完善、具有重要军事意义的新技术,目前世界各国争相发展该技术。

2 技术路线

激光三维成像雷达从成像方式上分为扫描和非扫描两种工作方式。

扫描成像激光雷达将目标区域分成 $M \times N$ (即对目标成像的分辨率)个点(小分区),对各点依次进行捕获,技术相对成熟。激光器发出一个脉宽很窄且束散角极小的探测光脉冲,并由扫描光学系统将其指向目标,逐个扫描照射目标区域的 $M \times N$ 个点元,然后由单点探测器顺序接收各点反射的回波信号,得到对应的强度信息,并测量出探测光脉冲在发射装

置和目标各点间的往返时间 $i(i=0,1,\dots,M\times N)$,从而逐个得到目标上各点的距离信息。经过 $M\times N$ 次探测(探测光脉冲在发射装置和目标之间往返 $M\times N$ 次)后,得到目标区域全部的 $M\times N$ 个点的距离信息,最后经过处理得到目标区域的一幅三维距离图像。扫描工作方式的优势在于测量时对每个点依次进行采样,能量集中,成像距离较远,但其缺点是需用移动的扫描部件,此外,该方式属于串行测量,需要等前一个脉冲返回后才能进行下一点的测量,探测光脉冲的往返时间占据了测量过程中的大部分时间,得到目标区域的一幅三维图像需要费时 $(M\times N)\times i$,导致成像帧频低,实时性差,而且对运动目标易造成图像模糊的现象,因此很难实现目标三维图像实时且高分辨率的捕获。

非扫描成像激光雷达对目标区域各点(同样分成 $M\times N$ 个点)同时进行捕获,不需要复杂笨重的扫描装置。激光经扩束后照明整个目标区域,并使用阵列探测器进行接收,且发射光脉冲视场对应于整个阵列探测器的接收视场,每发射一个激光脉冲,探测器阵列上的所有单元都可以接收到回波信号,并通过集成的读出电路得到目标区域各个点的距离和强度值,实现了目标区域 $M\times N$ 个点的并行测量,即只需对目标区域的一次激光照射即可获得一幅完整的目标三维图像,实现单脉冲瞬间成像。因为没有扫描结构,所以系统的结构紧凑,外形尺寸小,此外,对目标各点同时进行捕获,帧率不会受到分辨率和测量距离的限制,很好解决了高分辨率三维信息的高帧率捕获难题,成为目前大信息量、实时三维测距成像的有效手段。

针对弹载激光主动成像制导系统,不宜采取目前较为成熟的扫描成像激光雷达方案,其主要原因如下。

(1) 难以小型化:扫描机构的存在使系统结构复杂,体积和质量大幅增加,难以小型化,导致较易实现机载,难以实现弹载。

(2) 成像速率低:生成一幅 $M\times N$ 分辨率的三维图像,需要扫描 $M\times N$ 次,所需时间为 $(M\times N)\times i$,完成一次成像需要的时间较长,实时性差,而成相同分辨率的三维图像,非扫描方式需要的时间仅为 i 。

(3) 分辨率(像素数)和成像速率的矛盾突出:扫

描成像可实现高分辨率,但分辨率越高,所需的成像时间就越长,即系统的成像速率就越慢,不适于实时应用的场合,如制导和导航等,反之,实时应用场合要求高成像速率,但高成像速率势必以牺牲分辨率为代价,对提供目标的图像特征非常不利,非扫描方式则不存在这个问题。

(4) 对光源要求高:对光源重复频率的要求较高,但高重频和高功率(能量)相互冲突的,无法同时满足,重复频率高了,功率(能量)会相应下降,从而导致工作距离受限。

(5) 缺乏合适的扫描机构:大多数扫描机构具有活动部件,扫描速度慢,并降低了系统的可靠性,光栅、电光、声光等扫描机构虽然没有活动部件,但存在扫描角度小和光透过率低的缺点。

(6) 存在成像误差和动态畸变:由于扫描机构的引入,构成一幅三维图像的 $M\times N$ 个像素点的获取时间并不一致,相邻两个像素点之间的延迟为 i ,各像素点最大延迟为 $(M\times N)\times i$,不同时刻像素点构成的一幅三维像不仅带来了成像误差,而且会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或模糊。

综上所述,针对弹载激光主动成像制导系统的研制,非扫描成像激光雷达的技术路线具有较大的优势,该方案没有扫描机构,能够解决传统的扫描成像激光雷达存在的问题,预期能够实现弹载末制导的要求。

3 国内外发展现状

3.1 国外发展现状

激光雷达在制导领域的发展,从功能方面看,大体可以分为五代产品:第一代产品是最早、最简单的测距机;第二代产品主要用于测距和导弹初始阶段的跟踪测量;第三代产品采用相干检测技术,增加了测速手段;第四代产品是扫描成像和多普勒成像雷达,可以高精度跟踪测量单目标或多目标,识别真假弹头,提供图像,测得目标的姿态和滚动速度;第五代产品是非扫描成像激光雷达,由于去掉了扫描装置,可解决传统扫描成像激光雷达帧率低、视场小、体积大等问题,具有高帧率、宽视场、坚固、体积小等优点。

非扫描成像激光雷达的各方面性能都全面超越

了现有的激光雷达,成为了激光雷达的发展趋势。美国国防部先进研究计划局(DAPRA)建议进行非扫描三维成像激光雷达的研究:“研究能完成多种军事任务的电光三维成像传感器的新颖技术。总目标是研究具有高效的、高精度、高速距离成像功能的传感器阵列。传统的单激光脉冲成像传感器是必需的,其他方法也将考虑”,这一建议给出了非扫描成像激光雷达的发展方向:一是发展基于单脉冲成像传感器的闪光(Flash)激光雷达,重点是进行阵列雪崩光电二极管 APD、PIN 光电二极管探测器和集成信号处理器的研究,二是利用成熟的阵列成像器件,如 CCD 等,采用新的工作体制,实现三维成像。随后,美国空军技术顾问委员会将使用焦平面阵列的非扫描成像激光雷达列为空军要在 21 世纪发展的新技术,此外,英国国防部技术转移中心年报中也将非扫描成像激光雷达的研究作为国防技术的重大创新。

如上所述,非扫描成像激光雷达已成为激光制导的发展方向,目前世界上在该领域研究得较为成功的单位大多为军事科研机构,例如美国的陆军研究实验室(ARL)、空军怀特实验室(WL)、洛克希德·马丁公司、雷声公司、麻省理工学院林肯实验室等单位,研制并测试了低成本自主攻击系统 LOCAAS、“网火”武器系统中的巡飞攻击导弹 LAM、通用激光雷达导引头 CLAS、“竖锯”计划 Jigsaw 等多套系统。

3.1.1 低成本自主攻击系统 LOCAAS

低成本自主攻击系统 LOCAAS 是美国在研的一种高度智能化、防区外发射的无人驾驶飞机(UAV),其激光导引头如图 1 所示,能以 100 Hz 的速



图 1 LOCAAS 的激光雷达导引头

Fig.1 Laser radar of LOCAAS

率精确、自主扫描,扫描宽度为 750 m,一旦捕获到目标,扫描宽度就减少到 100 m,视场角度为 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$,作用距离为 1~1.25 km,在 1 km 的作用距离上,分辨

率为 15 cm。LOCAAS 导引头具有对目标的三维成像能力,其对导弹发射车所称的三维像如图 2 所示,此外,其目标识别算法具有先进的特征提取功能,在飞行试验中,还成功的识别出了飞毛腿导弹。另据报道,为了解决导引头作用距离近、缺少全天候能力等问题,美国空军研究实验室后续研制了采用高功率二极管泵浦固体激光器和末段脉冲探测技术的成像激光雷达,最终在静态试验(91.4 m 高塔)和载飞试验(CFT)中的作用距离分别达到了 10 km 和 5 km,即使在雨、雪、雾和烟尘天气情况下,也达到了较远的作用距离。

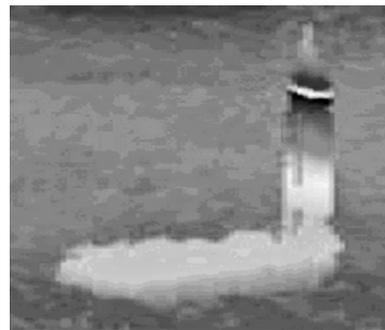


图 2 LOCAAS 激光雷达导引头对导弹发射车的成像

Fig.2 Laser radar image of missile-firing installation

从 1999 年开始,美国又尝试研制一种闪光(Flash)激光雷达,即非扫描三维成像激光雷达,其成像速率比 LOCAAS 前期所用的扫描成像激光雷达至少提高 5 倍,随后该导引头被转用在导弹上。2002 年,洛马公司和美国空军研究实验室在埃格林空军基地成功验证了 LOCAAS 导弹的激光雷达导引头。在这次试验中,LOCAAS 从试验载机发射,导弹沿预定航线飞行,搜索了配置各种车辆的典型区域,之后,飞到包括战术目标和非战术目标的第 2 个区域,在这个区域上空,导引头正确辨别出目标,并制导导弹命中目标。2005 年,洛马公司在埃格林空军基地成功进行了 LOCAAS 人在回路中的飞行试验,同时宣告 LOCAAS 计划圆满结束,随后其激光雷达导引头被美国陆军的巡逻攻击导弹 LAM 所采用。

3.1.2 “网火”武器系统中的巡飞攻击导弹 LAM

“网火”(NetFires, 网络火力支援)项目是美国 DARPA 和陆军联合提出的计划,旨在为陆军的未来作战系统 FCS 提供下一代攻击型和巡逻型精确制导导弹。“网火”武器系统中的巡飞攻击导弹 LAM 装有

能够自动确认目标的激光主动雷达导引头,其技术来源于 LOCAAS 激光成像雷达导引头,能连续扫描直径 500~600 m 的范围,分辨率达 15 cm,并采用了先进自动目标识别算法,使 LAM 在飞行高度 230 m、飞行速度 400 km/h 时还能自动辨认目标。另外,美国空军研究实验室在 LAM 导弹的研制中还重点开发了一种称为闪光 (Flash) 激光雷达的技术,它省去了水平方向上的扫描仪,激光在经过光学镜片后形成一定宽度的区域,这样图像就可以一次生成。2002 年,LAM 导弹进行了首次飞行试验,该导弹采用了非扫描--APD 面阵探测式的闪光激光成像雷达进行末制导,能够以攻击和监视双模式工作。美国陆军计划在 2010 年开始部署“网火”系统。

3.1.3 通用激光雷达导引头 CLAS

雷声公司一直致力于为小型无人机和导弹开发三维成像激光雷达,20 世纪 90 年代后期,在先进固态激光雷达验证项目中,其研究取得了巨大进展,开发出一种直径为 71/4 inch (1 inch=2.54 cm) 的导引头,应用于空军的小直径弹药。近年来,雷声公司为了满足未来作战需求,不断改进激光雷达导引头的设计,在降低能耗、减小体积和成本的同时提高系统性能,研制出一种直径 17.7 cm 的通用激光雷达导引头 CLAS。CLAS 具有自动识别目标的实时处理能力,采用柔性设计,可应用于从大范围巡逻搜索型到高分辨率精确攻击型多种小直径弹药。2005 年,洛马公司和雷声公司以三维闪光成像激光雷达构成跟踪器,验证了该雷达跟踪器在各种环境下自动识别目标的处理能力。图 3 是 CLAS 获取的三维距离图像。

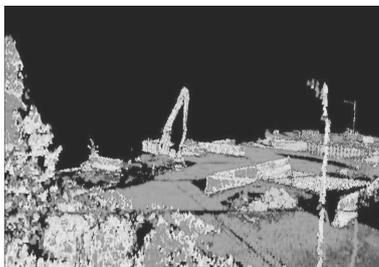


图 3 CLAS 获取的三维距离图像

Fig.3 3D range image obtained by CLAS system

3.1.4 “竖锯”计划 Jigsaw

经过初步实验阶段,DARPA 和美国陆军联合启动了“竖锯”项目 Jigsaw,开发无人机机载的高分辨三维成像激光雷达系统,并用于地面伪装军事交通

工具的成像和识别。“竖锯”项目于 2002 年 5 月授予两个项目组,一个项目组由诺斯罗普·格鲁曼公司和 Irvine 传感器公司组成,另一个项目组由林肯实验室和哈里斯公司组成。两个项目组分别使用了不同的成像系统,前者利用 1.06 μm 激光和 8×128 的 InGaAs-PIN 阵列探测器实现,后者的方案更为可行,为一种由微芯片单脉冲激光器和基于 APD 的新型 32×32 焦平面阵列构成系统主体的闪光成像激光雷达,并在 2002 年 12 月,以直升机为平台,成功完成了飞行试验。

“竖锯”计划迄今为止已经发展了三代闪光成像激光雷达系统,分别为车载、机载和机载,其具体外形如图 4 所示。Gen-III 采用被动 Q 开关固态倍频 Nd:YAG 微芯片激光器,工作波长 532 nm,重复频率 5~10 kHz,脉宽 700 ps,单脉冲能量 33 μJ 。Gen-III 的探测器采用了工作于盖革(Geiger)模式的 32×32 的 APD 阵列,其有效面积直径 30~40 μm ,像素间距 100 μm ,占空比 7%~13%,与 COMS 计时电路集成在一起,CMOS 时钟频率为 500 MHz。

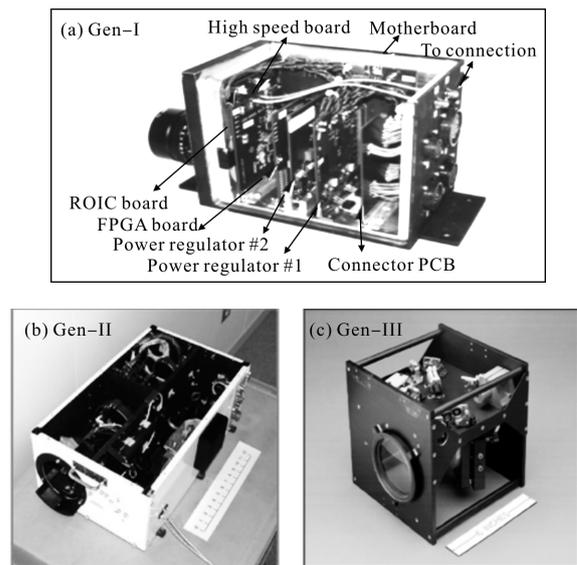


图 4 “竖锯”项目中的激光雷达导引头

Fig.4 Laser radar of Jigsaw

林肯实验室对 Gen-III 进行了实地试验,该系统对距离 500 m 处一个坦克成像得到的 3D 点云图如图 5 所示,可见,从该系统所成的三维距离像中可以明显的识别出目标。

林肯实验室还进行了机载的树叶穿透能力试

验,其给出的图像如图 6 所示,可以看出,Gen-III 能够对隐蔽在浓密树林中的目标进行成像及目标识别,具有重要的军事意义。

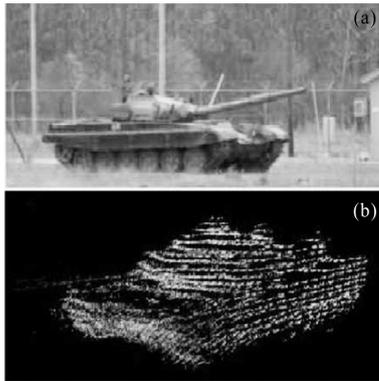


图 5 坦克的激光雷达 3D 图像
Fig.5 Laser radar image of tank

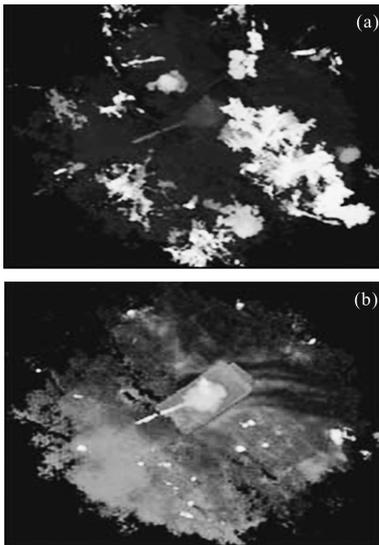


图 6 林木覆盖下坦克的实验图像
Fig.6 Laser radar image of tank in woods

经过相应的改进,基于时间飞行法和 APD 阵列的激光三维闪光成像雷达非常适宜用于弹载激光主动成像制导,林肯实验室正着力于将“竖锯”计划中研制的激光雷达系统进行改造,并将其应用于弹载制导系统。

3.2 国内发展现状

在国内,激光主动三维成像雷达处于起步阶段,相关研究单位主要包括国防科学技术大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、中国科学院上海技术物理研究所、西南技术物理研究所、中国工程物理研究院第十研究所等。

2005 年,国防科学技术大学的胡春生和秦石乔

研制成功了一种单点二维扫描方式的激光三维成像雷达,该系统采用半导体激光器为光源,APD 为接收器,能够以 30 Hz 帧率成 16×101 分辨率的图像,在距离为 24 m 的情况下测距精度为 9.2 m。

2008 年,浙江大学的张秀达基于德法圣路易士研究院的方案提出了光脉冲波形无关的增益调制门选通测距法,研制了脉冲光源三维主动成像系统。该系统采用的光源是 808 nm 的半导体激光器,接收器的像素为 800×600 ,测距范围可达 600 m 以上,测距分辨率为 2 m。

2010 年,哈尔滨工业大学的孙秀东研制出以 YAG 激光器为光源的激光成像雷达,使用了 16 位 CCD,像素为 256×256 ,在距离为 150 m,选通距离为 30 m 的情况下,测距精度为 2~4 m。

2010 年,中国科学院上海技术物理研究所的郭英利用分立盖革模式探测器对盖革模式激光成像系统进行了原理验证,实现了对目标的三维成像。

3.3 发展现状

对于激光制导技术,国内外的研究大多为半主动寻的制导或驾束制导,技术较为成熟,国内外均有产品交付部队,并在实战中多次应用。

与半主动寻的激光制导相比,激光主动成像制导的研制难度较大,国外研发相对成熟的多为机载系统,对于弹载系统,由于在体积、质量、功耗等指标上受到了极大的限制,同时对相关元器件及集成电路的设计和制造的工艺水平要求很高,故研究弹载激光主动成像制导系统的单位为国外(主要是美国)的个别军事科研机构,但目前发展还不成熟,处于系统研制及测试阶段,暂未装配部队。

整体而言,国内在激光主动成像制导方面的研究已经取得一定的成果,但跟国外相比还存在较大的差距。

4 技术难度分析

与半主动寻的激光制导相比,弹载激光主动成像制导的难点如下。

(1) 小型化:弹载部分多了激光器、光学发射、扫描等三大模块,由于大能量和高重频的激光器一般体积、质量和功耗均较大,光学发射系统和扫描模块也需占用较大空间,加上光学接收模块、大面阵探测

器和图像处理模块,使整套制导系统难以小型化,容易机载,难以弹载。

(2) 探测器的要求高:弹载激光雷达系统对探测器(阵列)的要求大为提高,国外严格禁运,国内无研制及生产能力,在国内可购置到的类似产品,其指标远达不到要求(工作机制存在缺陷,同时关键指标也差两、三个数量级)。

(3) 激光器的要求高:弹载激光雷达系统需要既满足体积、质量和功耗要求,又满足能量、重频、光束质量等要求的微芯片激光器,国外的相关产品严格禁运,国内微芯片激光器的制造工艺不成熟。

(4) 自动识别难题:弹载末制导的工作时间十分有限,半主动制导仅需要对光斑位置进行检测,无需成像,所需时间较短,而主动成像制导需做动态的三维图像处理和目标自动识别(即需要成像及识别),大幅增加了处理难度和处理时间,甚至可能导致在末制导工作期间无法实时识别出目标。

5 结束语

弹载激光主动成像制导是一项涉及光、机、电等领域的新技术,必须通过提高国内各领域的技术水平,尤其是相关元器件及集成电路的设计和制造的工艺水平,才能在国内研制成功相关的制导系统并装配部队。

文中对弹载激光主动成像制导技术的理论基础进行了详尽的分析,并在深入探讨国内外研究现状的基础上,提出了具体的技术路线及其研制难度,为研制相应的制导系统提供参考。

参考文献:

- [1] Yao Yu, Ji Denggao, Ma Kemao. General design trade-offs for a precise terminal guidance system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 382-385. (in Chinese)
姚郁, 季登高, 马克茂. 关于精确末制导系统总体设计的综合考虑[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 382-385.
- [2] Yao Xiujian, Peng Xiaole, Zhang Yongke. Brief descriptions of precision guidance technology[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(5): 338-340. (in Chinese)
姚秀娟, 彭晓乐, 张永科. 几种精确制导技术简述[J]. *激光与红外*, 2006, 36(5): 338-340.
- [3] Wang Kuangbiao. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 651-655. (in Chinese)
王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5): 651-655.
- [4] Barenz J, Baumann R, Tholl H D. Eyesafe imaging LADAR/infrared seeker technologies[C]//SPIE, 2005, 5791: 51-60.
- [5] Wang Xiangke, Zhang Hui, Zheng Zhiqiang. Laser active imaging seeker design technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 797-801. (in Chinese)
王祥科, 张辉, 郑志强. 激光主动成像图像制导导引头设计 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 797-801.
- [6] Qin Yuliang, Cheng Yongqiang, Wang Hongqiang, et al. Two-dimensional imaging homing guidance technology for active radar seeker [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(4): 1-4. (in Chinese)
秦玉亮, 程永强, 王宏强, 等. 主动导引头二维成像寻的制导技术[J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(4): 1-4.
- [7] Ma Liguang, Wu Bo, Zhou Dingfu, et al. Design of the code modulator on 10.6 μm laser beam-riding guidance instrument [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (1): 71-75. (in Chinese)
马利国, 伍波, 周鼎富, 等. 10.6 μm 激光驾束制导仪编码调制器的设计[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 71-75.
- [8] Li Shuanggang, Nie Jinsong, Li Hua, et al. Assessment of effectiveness on angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 41-45. (in Chinese)
李双双, 聂劲松, 李化, 等. 对激光半主动制导武器的角度欺骗干扰的效能评估 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 41-45.