对空红外制导关键技术发展分析

李同顺[1,2],奚　勇[1,2],印剑飞[1,2]

(1.上海航天控制技术研究所,上海 201109;2.中国航天科技集团公司 红外探测技术研发中心,上海 201109)

摘　要: 针对未来红外制导导弹对空作战面临的对象日趋多样、目标隐身能力大幅提升、新型对抗技术广泛使用、战场环境更加复杂等重大挑战,分析了对空红外制导技术的国外发展现状及趋势;全面梳理了现代战争对下一代对空红外制导技术的军事需求,提出了对空红外制导的关键技术,包括弱小目标探测、自主目标识别、双多波段红外探测和多模复合制导等,并对相应关键技术的内涵、发展趋势、技术途径及研究成果进行了阐述,为红外制导技术的发展提供建议和参考。

关键词: 红外制导导弹; 弱小目标探测技术; 双多波段探测技术; 复合制导技术

中图分类号: TP 391.4　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.03.018

Analysis on the Development of Key Technologies for Surface-to-Air Infrared Guidance

LI Tongshun[1,2], XI Yong[1,2], YIN Jianfei[1,2]

(1.Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China; 2.Research and Development Center of Infrared Detection Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to overcome the challenges which infrared guided missiles will face in the future air combat such as increasingly diverse targets, greatly enhanced stealth capability of targets, extensively used new countermeasure technologies, and increasingly complex battlefield, the development status and trend of the surface-to-air infrared guidance technology abroad are analyzed, and the military needs for the next generation surface-to-air infrared guidance technology in modern war are comprehensively reviewed. The key techniques of the surface-to-air infrared guidance technology, including the dim-small target detection technique, the autonomous target recognition technique, the dual/multi-band infrared detection technique, and the multimode compound guidance technique are put forward, and the corresponding connotations, development tendency, technological approaches, and research achievements of these key techniques are illustrated, providing suggestions and references for the development of the infrared guidance technology.

Key words: infrared guided missile; dim-small target detection technology; dual/multi-band infrared detection technology; compound guidance technology

0　引言

红外制导技术是通过利用红外探测器捕获和跟踪目标自身辐射的红外能量实现寻的制导的技术,具有隐蔽性好、制导精度高、可全天时作战的特点。自1956年美国研制成功第一代红外制导导弹——“响尾蛇”空空导弹问世以来,该技术取得了迅猛的发展,在地空、舰空、空空等对空导弹武器中得到了广泛的应用,从便携式防空导弹、车载/舰载防空到红外空空导弹,在领域持续拓宽的同时性能不断得到提升,成为精确制导武器的一个重要分支[1]。

1　国外发展现状

半个多世纪以来,红外制导导弹已经发展到了第四代。作为其换代标志的红外导引头也从最初的单元调制盘探测体制发展到了如今的成像探测体制。随着红外成像探测体制的日渐成熟,红外成

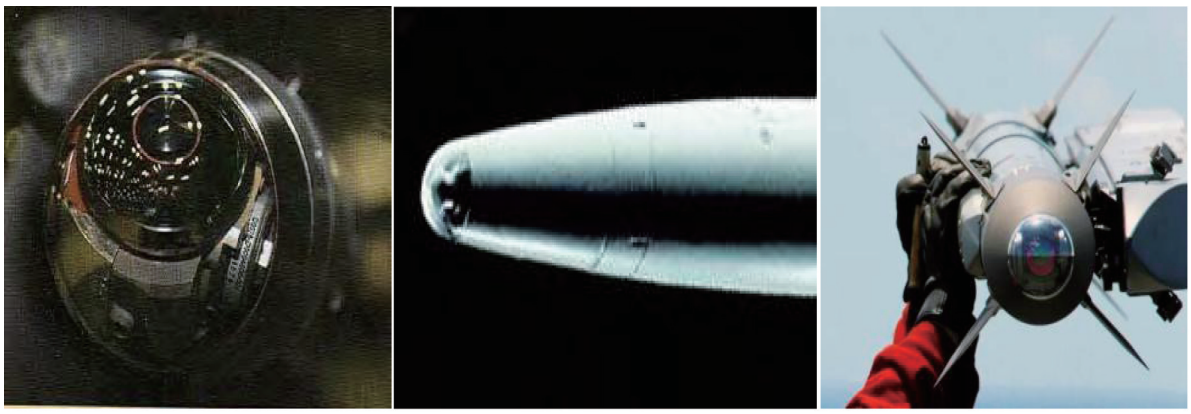
收稿日期: 2021-03-28; **修回日期:** 2021-04-25

作者简介: 李同顺(1969—),男,硕士,研究员,主要研究方向为红外制导技术。

像制导技术逐渐发展成为红外制导技术的主流。

1.1 单波段红外成像制导技术

德国的IRIS-T空空导弹采用128×4元线列扫描中波红外成像制导技术,导引头具有较好的响应均匀性,抗人工和自然干扰性能好;德国的LFK NG车载防空导弹采用了红外凝视成像制导技术,防御目标除了固定翼和旋翼飞机外,还包括无人机等目标;英国的ASRAAM导弹采用128×128元的中波凝视焦平面红外成像制导技术,导引头具有多目标跟踪和全向跟踪能力,具备抗红外诱饵干扰的能力;美国的AIM-9X空空导弹采用128×128元的中波凝视焦平面红外成像制导技术,导引头的目标截获距离在背景条件良好情况下为13~16 km,具有大范围红外寻的与发射后截获能力。相关导弹的导引头如图1所示[2-5]。



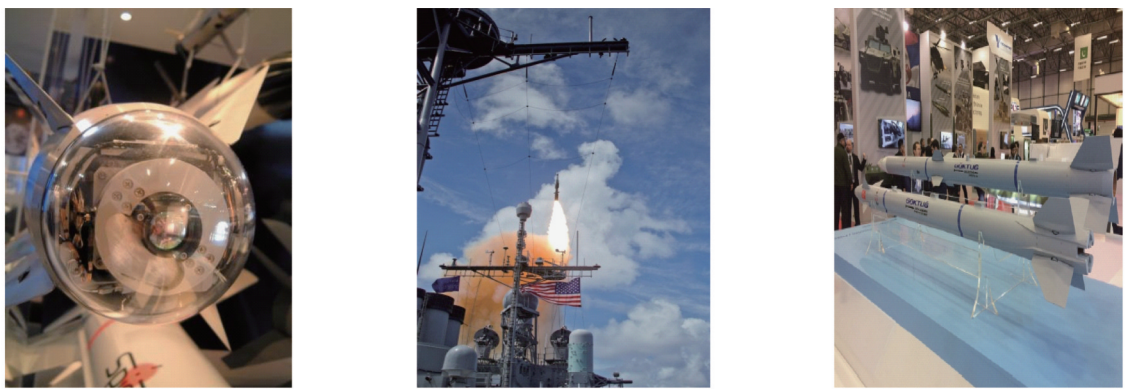
(a) IRIS-T (b) ASRAAM (c) AIM-9X

图1 典型单波段红外导引头

Fig.1 Typical single band infrared seekers

1.2 双波段红外成像制导技术

以色列的“怪蛇-5”空空导弹采用中/短双波段红外成像制导技术,利用目标、背景、干扰的双波段成像特性差异实现目标识别,具备下视、复杂云层背景下拦截目标能力,大幅提升了抗干扰性能;土耳其的游隼(Gokdogan)空空导弹同样采用高分辨率双波段红外成像制导技术,提升系统的抗干扰能力;美国的SM-3导弹担负海基中段反导拦截任务,Block 1B和Block 2为提高抗诱饵干扰能力,采用大面阵512×512元长波双波段红外成像制导技术,在拦截末段,利用红外双波段信息进行目标鉴别、捕获,实现对来袭弹道导弹的精确制导和碰撞杀伤。相关导弹的导引头如图2所示。



(a) 怪蛇-5 (b) SM-3 (c) 游隼

图2 典型双波段红外导引头

Fig.2 Typical dual-band infrared seekers

1.3　多模复合制导技术引领技术发展

以色列研制的“箭-2”导弹在“箭-1”的基础上改进了其纯红外制导的方式，采用主动雷达/红外双模复合制导技术，大大提升了其命中率；以色列和美国联合研制的“大卫投石索”拦截弹采用红外成像和毫米波主动雷达复合制导技术，具有先进反电子和抗红外干扰能力；美国的RAM舰载末端防御导弹采用被动雷达/红外扫描成像制导技术，主要拦截掠海飞行的反舰导弹；美国正在研制的新一代远距空空导弹AIM-260，将替代现役的AIM-120空空导弹，据报道采用了红外和雷达双模复合制导体制，使其在复杂的空中作战环境中更具优势；美国在下一代导弹防御计划中，正在开展512×512元红外成像与256×256元主动激光成像双模复合导引头研发，以大幅提高导弹的拦截精度。相关导弹的导引头如图3所示[6-13]。



(a) “大卫投石索”拦截弹　　(b) AIM-260空空导弹

图3　典型多模复合导引头

Fig.3　Typical multi-mode compound seekers

2　对空作战军事需求

随着新技术的不断涌现以及对空作战理念的不断更新，新型空袭模式应运而生，形成了以“空中为主体、网络为中心、空间为支援和临近空间为重要补充”的格局。这使得对空作战军事需求发生了深刻的变化，这种变化具体体现在以下两个方面。

2.1　拦截目标日趋多样，隐身能力大幅提升

在传统的对空作战中，防空导弹的主要任务是打击天空背景下的高速飞行器（如战斗机、轰炸机等）。未来空战则对作战任务提出了更高的要求，呈现出大规模跨域作战、作战目标多样、作战样式多变的特征。当前，以F-22、F-35等为代表的隐身战斗机作为主战装备投入实战，无人飞机也在迅速加入空中战场，无人机自主作战以及无人机与有人机协同作战能力不断提升；同时，随着X-51A、X-37B、SR-72等高超声速目标的出现，对空作战的拦截目标不再局限于有人作战飞机、直升机等传统飞行器，逐步向以巡航导弹、无人机、临近空间飞行器、弹道导弹为目标的防空反导反临多任务拓展，来袭目标呈现隐身、跨域、高速及高机动等特点，对空红外制导技术面临革命性的要求[14-15]。相关新型飞机目标如图4所示。

2.2　新型对抗技术广泛使用，战场环境更加复杂

现代空战的对抗日趋激烈：一方面，战机对来袭导弹告警能力不断提升，F-35战机已实现全向告警及自动干扰对抗投放，战机的自卫能力得到大幅提高；另一方面，红外人工干扰技术也在不断发展，红外点源诱饵弹通过改变干扰释放策略，以不同压制比的多诱饵弹多方向投放来提高干扰效果，新型伴飞诱饵或拖曳式诱饵可模拟飞机的运动轨迹，新型面源型红外诱饵，可形成干扰云团。上述新型诱饵在光谱特性、能量特性、形状特性和运动特性上更加逼近目标，对目标形成大面积、长时间的遮蔽，红外制导技术识别目标能力受到极大的挑战。此外，激光定向能干扰技术也日趋成熟，当探测到来袭导弹时可向导弹发射高能量激光，使红外导引头致盲或致眩，从而破坏导弹对目标的稳定跟踪而造成脱靶。相关新型对抗技术如图5所示。



(a) F-35隐形战斗机　　(b) X-51A无人飞机

图 4　典型新型飞机目标

Fig.4　Typical new aircraft targets



(a) 全向告警系统　　(b) 红外诱饵干扰　　(c) 激光定向干扰

图 5　新型对抗技术

Fig.5　New countermeasure technologies

随着作战样式的革新和精确制导武器全天时全天候使用的迫切需求,对空红外制导技术面临的环境也由较为传统的简单天空背景转变为更为复杂的云雾气象条件、地物和海面背景,对复杂环境适应性提出了更高的要求,迫使红外制导技术必须从能力挖潜和体制革新上加大研究力度[16]。

3　对空红外制导关键技术

3.1　弱小目标探测技术

随着F-22、F-35等隐身战机的大量装备和“扫描鹰”“小精灵”等小型无人机群的不断涌现,新型作战目标红外辐射能量较传统目标下降一个数量级以上,探测难度大幅增加,对红外制导系统提出了极大挑战。弱小目标探测技术成为对空红外制导技术的首要关键技术,对提高精确制导武器的作战距离及反应速度具有重要意义。

对空红外制导系统获取的目标信号在像面上只是一个很小的斑点,没有明显的边缘轮廓和结构特征,且信噪比较低,特别是在云层、地物、海面等杂波干扰影响下,目标甚至被大量噪声淹没,远距离弱小目标的检测非常困难,可以从提高红外器件性能、新型光学系统设计和应用、微弱目标信号提取方法等方面开展研究。

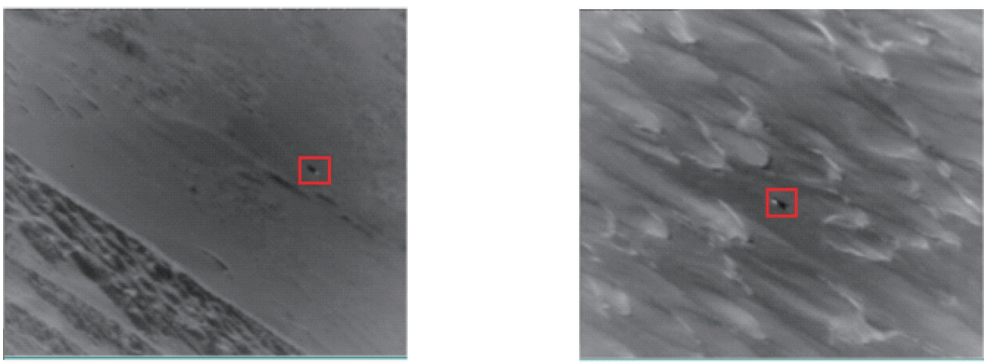
1) 高性能红外探测器技术。红外探测器是红外制导系统的核心部件,其技术的不断发展是制导系统探测能力提升的前提条件。一方面,随着大面阵、小间距成像探测器的发展,系统更容易实现高成像分辨率、低等效背景噪声辐射,目前探测器面阵规模已由256×256向1 K×1 K及以上发展,像元间距由50 μm×50 μm、30 μm×30 μm向15 μm×15 μm及以下发展;另一方面,随着高帧频数字化探测器、自适应红外探测器的发展,在红外焦平面阵列上可实现像元级全数字化处理,并进行片上非均匀性校正、目标特征提取等,有利于提高系统探测灵敏度并降低系统复杂度。目前欧美等国正在大

力发展大规模单片式数字化阵列、自适应红外焦平面阵列、灵巧红外焦平面阵列等技术，为新一代红外成像制导系统实现复杂环境下超强的探测能力提供必要的技术条件。

2）近衍射限光学成像技术。高透过率、大口径和小像差的光学成像系统也是提高探测能力的一条有效途径。随着自由曲面、微纳光学等技术的发展和多轴超精密加工技术的不断成熟，一方面可考虑同轴两反/四反、离轴三反等全反射式光学成像技术在对空弹载平台上进行应用研究；另一方面可开展平面超构光学技术研究，替代传统光学透镜组件，提高光学透过率。据报道，2017 年美国雷神公司联合亚利桑那州立大学光学中心研制了面向 AIM-9X 空空导弹应用的基于平面超构光学的红外成像光学系统样机，镜片数量减少 8 片，有效提高了系统探测性能。同时，可研究捷联稳定成像、双滚转伺服成像等技术，在有限体积空间内，提高系统的入瞳口径；研究主动一体式光机制冷技术，降低光学系统自辐射噪声影响，提高系统检测信噪比。

3）弱小目标信号提取技术。针对复杂背景下红外图像弱小目标检测困难、信噪比低等问题，越来越多的新方法不断被提出。实时、鲁棒和通用成为了红外弱小目标信号处理技术的核心需求。一方面，可通过大增益低噪声电路、数字时频域滤波等技术，降低探测系统背景噪声，并结合图像时空联合滤波、多分辨、多尺度分析等方法，提取目标与背景的多维度特性差异，达到抑制背景和提升图像信噪比的目的；另一方面可利用弹载组合导航和目标装订信息，构建相对惯性空间的目标轨迹链，有效剔除背景干扰，提高复杂环境下对目标的探测能力。

八院 803 所通过相关技术研究，红外制导系统探测灵敏度由 10^{-12} W/cm^2 量级提升到 10^{-13} W/cm^2 量级，下视杂波背景条件下探测距离提升 1 倍，杂波背景下弱小目标识别结果如图 6 所示。



(a) 下视复杂地物背景　　(b) 下视复杂海面背景

图 6　弱小目标识别结果

Fig.6　Recognition results of dim-small targets

3.2　自主智能目标识别技术

随着目标隐身性能、机动性能和干扰场景复杂度不断提高，对弱小目标检测与识别的鲁棒性和实时性提出了更高要求。传统目标检测方法一般针对特定的目标和环境，采用人工设计特征以增强目标信号，抑制杂波背景。但是，传统人工设计特征的信息维度和信息处理能力不足，应用场景单一，泛化性能不足。以深度学习为代表的自主智能目标识别技术具有高维特征学习和知识推理识别能力，使自主智能目标识别技术在精确制导领域的应用成为可能。

自主智能目标识别技术基于人工智能技术，结合弹载平台感知的环境和目标信息，自主实现目标特征提取与分析，完成复杂战场环境下的目标识别和抗干扰任务。欧美各国已逐步将自主智能目标识别技术作为复杂战场环境下目标探测、识别与抗干扰等军事研究的重要技术途径，典型产品如美国海军的远程反舰导弹（Long Range Anti-Ship Missile，LRASM）、第 2 代小直径炸弹（Small Diameter Bomb-II，SDB-Ⅱ）等[17-21]。因此，弹载信息处理系统的自主智能目标识别技术将是未来复杂战场中红外制导武器实现目标精准打击的关键因素之一。

采用自主智能目标识别技术有助于解决传统跟踪算法的不足,提升对于复杂目标场景下的目标探测与跟踪能力。但在弹载应用中,典型目标红外样本库构建难度大,现有弹载信息处理平台难以支持复杂的目标识别网络模型。

为了实现红外弹载自主智能目标识别技术,可采用如下的技术方法:

1) 红外样本库的构建与增广技术。研究基于复杂战场环境的目标特性、三维场景建模和红外场景目标仿真的数据增广技术,以及基于图像仿射变换、裁剪与拼接、生成对抗网络等方法的样本扩容技术,构建场景丰富、多视角、多尺度的红外目标样本数据库,为基于深度学习算法模型的目标识别能力训练和增量学习提供充足的数据支撑。

2) 基于智能识别网络模型设计及轻量化技术。红外制导领域的自主智能目标识别算法需综合利用精确制导体系的多维度和多模式的探测能力,开展高维特征提取、拼接、融合等智能网络架构设计,设计面向低特征目标识别和多维/多源异构信息的智能融合的算法模型,实现适配弹载平台低功耗和高帧率要求的轻量化网络设计。研究传统与智能两条技术路线的算法融合方法,克服单一算法途径的局限性,支撑强鲁棒和高实时性的自主目标识别性能提升。

3) 弹载智能信息处理平台架构技术。构建面向弹载应用的智能信息处理平台架构,基于低功耗AI芯片,突破DSP/FPGA+AI芯片的异构处理器系统技术。研究智能算法模型低复杂度、低比特量化、张量压缩等技术,突破智能识别算法模型的硬件平台嵌入式移植等关键技术,实现智能目标识别算法在弹载平台上的实时运行。

八院803所通过相关技术攻关,已初步完成红外图像数据集的构建,完成智能目标识别系统样机研制,初步具备复杂干扰场景下自主智能目标识别分类能力,识别结果如图7所示。



(a) 云背景干扰 (b) 目标分类 (c) 人工诱饵干扰

图7 自主智能目标识别结果

Fig.7 Autonomous intelligent target recognition results

3.3 双多波段红外制导技术

随着红外干扰技术的发展,红外诱饵干扰从传统的点源诱饵干扰发展到面源、点面复合、伴飞式等多种新型红外干扰形式。随着打击目标(巡航弹、无人机等)和作战模式变化,下视下射等复杂背景下的作战模式日益增多,传统的单波段红外制导技术难以满足复杂环境及新型干扰对抗条件下作战需求。

红外诱饵干扰与战机类目标因工作介质不同,其红外辐射与目标在部分波段上存在明显差异,典型背景多为中低温自辐射和阳光反射,与战机类目标在部分波段上亦存在显著差异。基于多色探测的多波段红外制导技术可以得到同一时刻、不同波段的目标辐射特性,利用红外辐射的波段差异可有效提高目标鉴别能力。因此,双/多波段红外制导技术是提高红外制导复杂环境适应性、抗干扰能力的一个重要技术途径和发展趋势。

双/多波段红外制导技术主要包括转轮式多波段和共焦面叠层双波段两种技术体制。转轮式多波段体制技术相对成熟,但光机系统较为复杂,滤光轮机构设计和控制、光机小型化是技术难题;叠层双波段体制的光机结构形式与单波段基本一致,但对数据吞吐和高速信号处理提出更高要求,叠层探测器的工程化水平也急待提高;共性的双多波段

信息处理是双/多波段红外制导技术的核心关键[22-28]。

为实现双/多波段红外制导系统的探测和抗干扰能力提升，可开展如下技术研究：

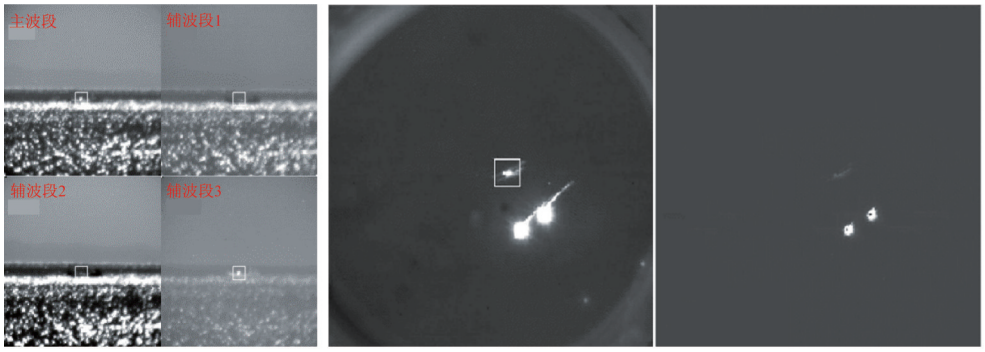
1）典型目标多波段光学特性检定及建模。开展典型目标、背景和诱饵干扰的细分多波段红外辐射数据采集及特征分析，完成红外多波段动态场景数学建模，支撑自适应波段选择、多波段目标识别、抗干扰算法设计及仿真测试。

2）宽波段高光效多波段集能器技术。开展宽波段高透过率高品质光学成像技术研究，针对转轮式多波段体制，需重点研究波段选择、滤光轮分区、小型化旋转滤光机构和高速旋转滤光轮动平衡工艺等技术。针对叠层双波段体制，需重点推动中长、长长等多波段叠层探测器的基础研发。

3）基于多波段融合的信息处理技术。多波段信息融合处理技术是本项技术的核心重点，需重点研究支撑多波段大数据吞吐和高速处理的弹载信息处理平台技术，基于目标与背景、干扰在不同波段上的灰度比、轮廓等特征级融合算法。采用基于引导滤波等方法的像素级融合算法，基于多波段信息融合的目标探测及抗干扰算法，实现双多波段红外制导技术相对传统单波段红外制导技术在探测和抗干扰方面的性能提升。

八院 803 所已开展双/多波段红外制导系统研制和关键技术攻关，与传统单波段红外制导系统相比，复杂背景条件下探测信噪比提高 2 倍以上，综合抗干扰性能提升 30% 以上。

双多波段样机复杂背景和抗干扰成像图如图 8 所示。



(a) 多波段海背景成像图　　(b) 双波段抗干扰成像图

图 8　双多波段红外成像图

Fig.8　Dual/multi-band infrared imaging

3.4　多模复合制导技术

随着作战目标和干扰环境的复杂化，针对全天时、全天候和多任务的作战要求，单模制导逐渐暴露不足，复合制导模式是精确制导技术发展的必然趋势。与单模导引相比，多模导引可以获取更多的目标信息，通过对这些信息的综合处理可以提高导引头对隐身目标、弱小目标及复杂背景的作战适应性，此外，多模制导还可充分利用多维信息，提高导弹抗干扰能力，这在未来的强电磁干扰环境下尤其重要。

一直以来，对空多模复合制导多以红外/雷达复合制导形式为主，近年来随着激光探测器件的发展，红外/激光复合制导技术也渐成光电复合的一个重要发展趋势。

雷达红外双模复合制导从体制上有机扫雷达/红外成像复合及相控阵/红外成像复合两种形式，从实现形式上有分口径及共口径两种形式。红外被动探测的特点与雷达全天时、高功率及信息维度多的优点结合，使红外雷达复合制导具有强对抗和强环境适应性的优势。激光/红外复合成像制导技术是近年来发展出的新兴制导方向，红外成像探测是一种被动二维图像强度的信息表达，红外诱饵产生辐射能量会对目标形成遮挡，使导引头无法跟踪目标。激光的三维成像探测技术，利用距离信息和激光高分辨率探测，可以很好解决辐射遮挡问题，克服原有单一红外制导体制的局限性[29]。

面对现实作战需求、技术现状及发展趋势，对空复合制导技术应着重加强如下两个方面研究：

1) 体制复合多约束系统高性能总体设计技术。体制复合的实现形式有分口径和共口径两种,在导弹苛刻的结构约束下,要实现各单模探测性能不降低的高性能指标约束,一体化、高性能共口径综合总体设计技术将尤为重要。对雷达/红外复合制导需重点开展高性能复合头罩研制、保形雷达阵面布局、小型化红外光机设计、结构综合优化综合等技术研究。红外/激光成像双模复合系统总体设计核心在高效复合光路设计、高精度光机装调等方面。

2) 多模信息融合处理技术。多模信息融合处理主要围绕如何高效地利用多维体制探测信息,通过体制优选和信息互补,实现对目标、干扰等对象的感知分类及不同环境下的强探测能力。针对多模信息融合处理技术,需重点开展多体制探测信息的时空配准、时域信息的航迹关联、数据/特征/决策层融合方法、多维全谱目标特性统计建模等技术研究。

4 结束语

军事装备和作战思想正在高速革新,其中,对空作战仍然是未来战争的主战场。针对未来空中作战的隐身化、智能化、强对抗、全天候等发展趋势,红外制导技术面临重大挑战,须加强相关基础理论研究以及新技术、新材料的创新应用,以快速推进红外制导技术的发展。

参考文献

[1] 马晓平,赵良玉.红外导引头关键技术国内外研究现状综述[J].航空兵器,2018(3):3-10.

[2] 李丽娟,刘珂.空空导弹红外成像探测技术发展分析[J].红外技术,2017,39(1):1-7.

[3] 朱传伟,童幼堂,斗计华.美国舰载标准系列导弹对海军防空导弹发展的影响[J].国防科技,2014,35(1):40-44.

[4] 张肇蓉,高贺,张曦,等.国外红外制导空空导弹的研究现状及其关键技术[J].飞航导弹,2016(3):23-32.

[5] 吕洁,罗勇,卿松,等.红外制导技术在空空导弹中的应用分析[J].兵器装备工程学报,2017,38(12):70-74.

[6] 张雷雷,王铎.复合导引头制导技术研究[J].红外,2019,40(5):18-22.

[7] 张纯学.复合制导技术的进展[J].飞航导弹,2004(9):50-59.

[8] 刘箴,张宁,吴馨远.多模复合导引头发展现状及趋势[J].飞航导弹,2019(10):90-96.

[9] 徐春夷.复合制导技术的现状与发展[J].制导与引信,2008,29(1):17-37.

[10] 吴涛,白云塔.激光/红外复合制导技术研究综述[J].红外,2008,29(9):6-8.

[11] 陈士涛,杨建军,马丽.末端高空区域防御系统及其作战部署[J].飞航导弹,2011(5):61-65.

[12] 王为奎,田戎,吴华,等.国外红外导弹导引系统发展与特点[J].飞航导弹,2017(11):33-37.

[13] 范晋祥.美国动能拦截弹红外成像导引头的发展分析[J].红外与激光工程,2009,38(1):1-6.

[14] 沈昱恒,刘鑫,张迪.防空导弹精确制导技术发展的几点思考[J].航天控制,2019,37(3):67-72.

[15] 刘杰,何峰,吴静.未来防空反导作战中高超声速目标的发展趋势分析[J].飞航导弹,2014(4):19-23.

[16] 王泉,董维浩,刘新爱,等.新型红外空空导弹抗干扰能力评估分析[J].航天电子对抗,2019,35(3):16-19.

[17] 范晋祥,刘嘉.精确制导自动目标识别智能化的挑战与思考[J].航空兵器,2019,26(1):30-38.

[18] 张耀,王永海,王菁华,等.美国下一代反舰导弹LRASM性能分析与研究[J].飞航导弹,2018(7):18-22.

[19] 晁丽君,熊智,杨闯,等.无人飞行器三维类脑SLAM自主导航方法[J].飞控与探测,2020,3(5):35-43.

[20] 曹姝清,刘宗明,牟金震,等.空间目标快速轮廓特征提取与跟踪技术[J].飞控与探测,2018,1(2):38-43.

[21] SCHACHTER B J. Automatic target recognition [M]. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE Press, 2017.

[22] 卢晓,梁晓庚,贾晓洪.红外成像空空导弹智能化抗干扰研究[J].红外与激光工程,2021,50(4):20200240.

[23] 王延新,刘琪,李兆熠,等.红外成像导引技术应用中若干问题的分析[J].红外与激光工程,2014,43(1):26-32.

[24] 张旗.红外成像制导技术的应用研究[D].北京:北京理工大学,2015.

[25] 小哈得逊.红外系统原理[M].北京:国防工业出版社,1975:157-162.

[26] 李其昌,李兵伟,王宏臣.非制冷红外成像技术发展动态及其军事应用[J].军民两用技术与产品,2016,11(1):54-57.

[27] 阎胜利,潘洪涛,王子辰,等.非制冷红外成像在对空制导中应用的关键问题[J].红外与激光工程,2015,44(8):2315-2320.

[28] 李煜,白丕绩,陶禹,等.应用于红外成像导引头的非制冷焦平面探测器[J].红外技术,2016,38(4):280-289.

[29] 李宇鹏.激光/红外复合制导技术发展综述[J].电子质量,2020(2):39-41.