

文章编号: 1672-8785(2016)08-0001-06

红外成像制导技术发展展望

杨俊彦^{1,2} 吴建东^{1,2} 宋敏敏^{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: 近年来, 随着精确制导武器在现代战争中的地位不断提升, 红外成像制导技术的开发和应用越来越受到国内外的重视。而随着作战使命和作战环境的日趋复杂, 精确制导武器对红外成像制导系统的要求也越来越高。着眼于未来的军事发展需求, 结合红外成像制导技术的发展现状, 指出红外成像制导将向多波段高光谱、激光主动成像、多模复合成像以及低成本红外精确制导的技术方向发展。提出了红外成像制导发展所需掌握的关键技术, 包括高性能红外探测器技术、成像自适应抗干扰技术、多维信息融合处理技术以及系统结构优化技术等。

关键词: 红外成像; 制导技术; 红外诱饵; 红外隐身

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.08.001

Development and Prospect of Infrared Imaging Guidance Technology

YANG Jun-yan^{1,2}, WU Jian-dong^{1,2}, SONG Min-min^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;

2. Infrared Detection Technology Research and Development Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

Abstract: In recent years, with the increasing improvement of the ranking of precision guided weapons in modern wars, the development and application of infrared imaging guidance technology have attracted more and more attention at home and abroad. However, since the combat missions and battle environment are more and more complicated, the requirement of infrared imaging guidance systems for precision guided weapons is becoming higher and higher. According to the future military development and the current status of infrared imaging guidance technology, it is pointed out that the infrared imaging guidance will develop toward multiband hyperspectral, laser active imaging, multi-mode imaging and low cost infrared precision guidance technologies. The key technologies required in the development of infrared imaging guidance including high performance infrared detector, adaptive imaging anti-jamming, multi-dimensional information fusion and system structure optimization etc are proposed.

Key words: infrared imaging; guidance technology; infrared decoy; infrared stealth

收稿日期: 2016-05-31

作者简介: 杨俊彦 (1983-), 男, 山西代县人, 硕士, 主要从事红外探测与仿真技术研究。

E-mail: yjypop2014@163.com

0 引言

自问世以来,红外成像制导技术已经取得了巨大进步^[1-3]。特别是在进入 21 世纪的几次局部战争中,该技术被广泛应用于各种武器,包括各个红外波段以及(非)制冷红外成像技术在对地和空对空制导中的应用。因此,红外成像制导技术越来越受到国内外的重视。

红外成像制导技术是一种基于目标和背景的红外辐射成像来完成目标识别与跟踪,并引导红外导弹准确攻击敌方目标的集光、机、电及信息处理于一体的综合技术。红外成像的图像质量并不比电视差,但前者却能适用于全天候气象环境。同时,对于新一代红外导弹而言,红外成像导引头也是发展方向。它能大幅增加导引头对弱小目标的作用距离,并具有对抗各种红外干扰的良好能力^[4-5]。采用红外成像制导技术可为导弹提供多方位的目标信息,以更好地对抗自然背景和人工干扰,从而提高目标识别概率和命中精度。

1 军事发展需求

随着光电对抗环境的复杂化,红外导弹所面对的作战对象正向着飞行远程化、高速化、隐身化和智能化的方向发展,同时还具备红外诱饵、激光欺骗和强光攻击等多种光电对抗措施。另外,红外导弹所面临的作战任务也越来越多样化,既要满足末端防御任务还要具备主动攻击能力。因此,光电对抗场景和作战使命的变化对红外精确制导技术提出了更高的要求。未来红外导弹在红外探测和抗干扰能力方面的需求将会有显著提升^[6-7],主要表现在以下几点:(1)具有更高的探测灵敏度性能以及更强的红外隐身目标探测能力;(2)具有更强的对抗自然环境干扰的能力以及对复杂背景下弱小目标的精确跟踪能力;(3)具有更强的机动能力以及精确攻击高动态目标的能力;(4)具有更强的对抗人工干扰的能力,即具有高强度对抗红外诱饵或假目标等欺骗性干扰,同时对抗激光等机载定向能干扰以及对抗基于各种干扰措施的组合干扰的能力。

2 红外成像制导技术的发展现状

自进入 21 世纪以来,单波段大规模、小像素红外焦平面阵列,大规格双色/多色红外焦平面阵列以及灵巧型红外焦平面阵列已经在红外成像制导技术领域得到了广泛应用和发展。

2.1 单波段红外成像制导技术在精确制导武器中的广泛应用

近十几年来,单波段红外成像制导技术日趋成熟。包括美国在内的军事强国采用红外凝视成像末制导方式发展了动能拦截弹、近距格斗空空导弹、近程面空/舰空导弹和空对地导弹等多种精确打击武器,譬如美国的“标准-3”动能拦截弹,美以联合研制的“箭-2”反导系统,美国的战区高空区域防御导弹(THAAD),英法共同研制的“风暴前兆”巡航导弹,美国的“战斧”巡航导弹(BIockIV)、AGM-158 联合空面远程攻击导弹(JASSM)和 AGM-84H/K SLAM-ER 远程对地攻击导弹、挪威的联合攻击导弹(JSM),法国的 AASM 远程空地精确打击武器和 MICA 红外型舰空、地空、空空导弹,美国的 AIX-9X 空空导弹以及德国的 LFK NG 导弹(见图 1)等。



图 1 德国的 LFK NG 导弹

2.2 双波段红外成像制导技术的应用

21 世纪初,双波段红外成像制导技术取得了重大突破。基于多色探测可以得到同一时刻、不同波段下的目标辐射特征,然后利用不同波段的光谱信息便可有效地将目标信号从包括太阳辐射在内的自然背景干扰以及人工诱饵信号中区分开来。目前,国外已经研发出了多种基于

双色红外或多色探测系统的双色红外成像制导导弹或多色制导武器, 比如采用双波段红外成像导引头的以色列 Rafael Python 5 空空导弹 (见图 2)、采用多光谱红外成像导引头的南非/巴西第五代空空导弹 A-DARTER 以及采用可见光和双波段红外导引头的美国大气层外动能杀伤器 EKV (通过经光学系统分光的数个独立单色成像器件来完成多色探测)。

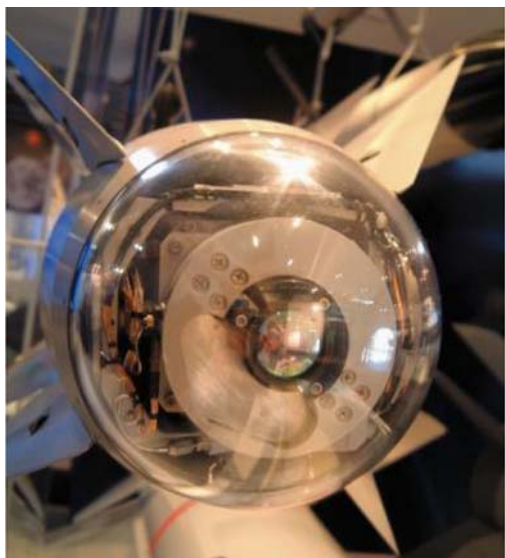


图 2 Python 5 空空导弹

双波段红外成像制导技术所采用的单芯片集成型双色/多色红外成像探测器, 具有系统复杂度低、体积小、功耗低以及可靠性高等优点。为此, 欧美各国和以色列都在大力发展新一代单芯片集成型双色/多色红外成像探测器, 并且已经实现了实用化。例如, 美国正在研制的“标准-3” Block IB 拦截弹的导引头就将采用单芯片集成型 256×256 元双波段红外焦平面阵列; “标准-3” Block IIA/B 拦截弹将采用雷神公司研制的单芯片集成型 512×512 元双波段红外焦平面阵列。

3 红外成像制导技术的发展趋势

3.1 多波段/高光谱红外成像制导技术

多波段/高光谱红外成像制导技术可以应用于反隐身领域。目前, 作战对象所采用的红外隐身措施一般针对单一波段来实现隐身。因此, 人

们可以扩展成像探测系统的工作波段, 即采用多波段高光谱探测来更多地获取目标的多维度信息以实现目标识别。同时, 光谱也是用于描述物体内在属性的重要信息, 所以对于区分目标和诱饵来说具有十分重要的作用。用于区分目标和诱饵光谱信息的多光谱成像技术是提高红外成像制导抗干扰水平的重要手段之一。这项精确制导技术现已应用于国内外的新一代空空导弹和反导动能拦截弹。

近年来, 美国发展了可同时获得用于目标截获和跟踪的二维全色图像和用于目标识别与分类的多光谱图像的新一代自适应光谱成像器。它能够解决常规的多光谱成像由于谱段细分而造成目标截获距离较小的问题^[8]。同时, 国内也在发展自适应光谱成像系统。如图 3 所示^[10], 在 2 个转轮上装有 6 个滤片窗口, 由此可根据实际应用选择相应的成像波段。

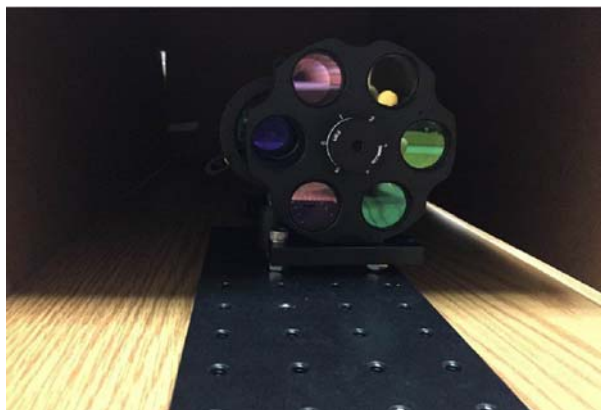


图 3 自适应光谱成像机构

3.2 激光主动成像制导技术

激光雷达主要工作在红外波段, 而红外波段又是精确制导技术最常用的波段之一。由于兼具微波和红外系统的优点, 激光主动成像制导技术可以对目标进行三维成像^[9]。在获得目标红外图像的同时, 该技术还可以对目标的距离或速度进行测量。与传统的制导体制相比, 激光主动成像制导技术在角度、速度和相近目标的分辨能力上均得到了明显提高。这种技术可以区分出目标的关键部位并对其进行攻击, 从而大大地提高了武器的作战效能。与一般的红外

制导相比,激光雷达对气候的适应能力更强。倘若与微波雷达等体制进行复合制导的话,则可极大地增加作用距离,进而实现全天候、全程制导。因此,激光主动成像制导技术是红外成像制导技术的重要发展方向之一。

近年来,随着半导体激光器技术、固体激光器以及高性能雪崩光电二极管 (APD) 焦平面阵列等器件的不断发展,激光主动成像制导技术已经得到了广泛应用。比如,美国正在为其自动攻击武器系统 (LOCAAS)、增强型自动攻击武器系统 (PLOCCAAS) 和精确攻击导弹 (PAM) 等空地精确打击武器研制新型激光三维成像导引头,同时也在发展用于新一代动能拦截弹的固体激光三维成像导引头,以期显著提高动能拦截弹对弹头目标和先进诱饵的识别能力。

3.3 多模复合成像制导技术

为了增强红外精确制导武器对抗多种光电干扰的能力、提高对隐身目标和复杂环境下弱小目标的识别概率^[11]和发挥多种制导模式的综合优势,多模复合成像制导技术已经成为了世界各国争先研究的热点之一。当前多模复合制导的重点发展方向是频段和体制差异大、信息含量丰富的多模制导技术。根据作战任务的不同,该技术可以分为主动/被动红外成像复合制

导技术、主动微波 (毫米波) 雷达/红外成像复合制导技术、超宽带被动/红外成像复合制导技术以及合成孔径雷达/红外成像复合制导技术。

近年来,多模复合成像制导技术的应用极大地提高了精确制导导弹的目标识别和抗干扰能力。比如,美国为其联合空地导弹 (JAGM) 和小型监视攻击巡航导弹 (SMACM) 研制了主动毫米波/红外成像/激光半主动三模导引头。目前,由美国洛克希德·马丁公司、波音公司和雷神公司分别研制的三模导引头已经成功地完成了挂飞试验和实弹飞行试验。而国内则正在发展包括图 4 所示的红外成像/激光半主动导引头在内的多模复合成像制导技术^[12]。国内最新研制的多模复合制导导弹的身影已在最近的阅兵活动中显现。

3.4 低成本红外精确制导技术

受全球经济衰退对各个行业包括武器防御工业的影响,对于以拦截精确制导空地导弹和制导炸弹作为主要作战任务的近程防空、末段防御武器系统而言,低成本将是其增强竞争力、提高生命力的关键所在。

非制冷红外成像制导具有成本低、体积小、维护方便等优点,为此越发受到国内外的关注。

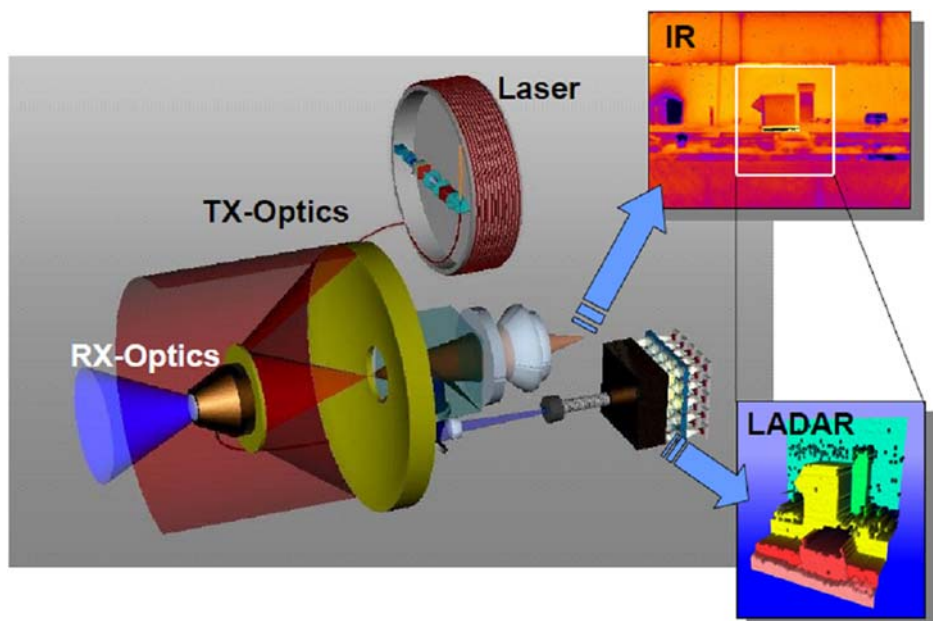


图 4 红外成像/激光半主动成像

非制冷红外成像制导技术已经在某些制导武器中得到了应用, 如反坦克导弹、Paveway IV 型精确制导炸弹、改进型 JDAM 导弹、无动力滑翔弹和小口径制导炸弹等。但是非制冷成像制导的探测性能尤其是作用距离目前还无法与传统的制冷成像制导相媲美, 因此可以采用复合制导的方式。例如, 采用激光/非制冷红外复合制导和毫米波/非制冷红外复合制导等技术来弥补非制冷成像的不足, 将是未来发展的热点。与此同时, 美国陆军正在设计下一代成像导引头组件。他们通过降低热负荷的技术, 即缩短制冷时间, 设计、制造和验证基于先进制冷技术的低成本红外成像组件, 以降低制导系统的成本。而国内的非制冷成像制导产品早在 2014 年珠海航展上就进行了展示 (见图 5)。



图 5 非制冷成像制导产品

在红外制导系统的全部成本之中, 万向支架所占比例较大。因此, 采用捷联方式 (弃用万向支架) 就能明显缩减研制成本。例如, 美国海军正在开发的低成本红外焦平面阵列和捷联方案已被 Hydra 火箭装备的低成本制导系统所采用。该系统已于 2010 年 5 月成功地完成了最后的试验验证工作。最近, 北约对利比亚的空袭中所用的法国 Sagem 公司生产的红外型 AASM 模块化空地武器系统就采用了捷联成像系统。

此外, 成像制导系统的成本降低还可以通过设计一体化、模块化结构, 改进电路等设计方式以及优化生产等手段来实现。以上做法的优势是设计周期更短, 可避免重复投入, 且具有通

用化、互操作性的能力, 所以能够显著降低研发和生产成本、节约资金、减少风险, 并可减轻后勤保障压力。例如, 在美国海空军启动的 JCM 导弹计划中, JCM 导弹的模块化程度已达到分系统以下层面, 其中许多细化模块都有多项现成产品可以选择, 比如红外成像阵列模块就是由“标枪”反坦克导弹的红外成像系统派生而来的, 但其成本却比“标枪”反坦克导弹更低。

国内在实现红外精确制导技术的低成本上是不遗余力的, 我国武器价廉物美的美名也早已享誉全球。

4 红外成像制导发展中的关键技术

由于红外成像制导技术日新月异, 国内在紧跟国外先进技术的同时, 正着重发展高性能红外探测器技术、成像自适应抗干扰技术、多维信息融合处理技术以及系统结构优化设计等关键技术。

4.1 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之一。新型高性能红外探测器的出现推动了红外成像制导技术的不断发展。双波段/多波段二维大规模单片阵列技术的发展使小型化的红外成像制导系统更易实现双波段/多波段探测与跟踪, 从而提高对复杂背景下弱小目标的识别能力; 灵巧型红外焦平面阵列和自适应红外焦平面阵列的发展则将为新一代红外成像制导系统实现复杂背景下的超强抗干扰能力和有效目标识别能力提供必要的技术条件; 在红外焦平面阵列中提供改进的数据压缩与特征提取方法并实现全数字化处理, 可以有效降低整个数据传输系统的复杂程度, 从而实现红外成像以及信息提取和处理的一体化。目前, 欧美各国正在大力发展一种基于计算混合成像概念的大视场、高分辨率红外成像技术。与常规的透镜式光学成像采用自适应编码孔径成像等计算混合成像机制不同, 该技术将数据处理纳入了成像探测系统的设计考虑之中, 即通过综合利用光学系统、采样和图像重构技术来实现大视场、高分辨率成像。

4.2 成像自适应抗干扰技术

由于红外诱饵和激光干扰等光电干扰、电磁脉冲炸弹等电磁干扰以及红外烟幕等各种红外干扰技术的迅速发展和广泛应用,红外成像制导系统需要在复杂的光电对抗场景下具备精确识别目标的能力。因此,红外抗干扰技术是红外成像制导必须攻克的难关。掌握各种典型目标和干扰(包括自然背景和人工干扰的多维形态特征和辐射特性)是对抗干扰的必要条件;对成像制导系统中各波段探测器以及速率传感器等的丰富信息进行系统级信息决策融合是对抗干扰的关键;同时,通过建立一套经过验证的抗干扰性能评估指标体系和评估方法,可以对红外成像制导系统的抗干扰性能进行系统级综合评估和各级分层评估,从而为提高抗干扰能力提供有效保障。由于成像自适应抗干扰技术可以提高红外成像制导系统对抗复杂背景干扰和多重组合干扰的能力,红外成像抗干扰技术已经成为了一个颇具特色的研究方向,并得到了国内外的广泛重视。

4.3 多维信息融合处理技术

多模复合、多波段/多光谱制导系统的核心技术是多传感器信息融合技术。基于多传感器提供的多维目标信息,可以提高探测系统在复杂背景下对目标进行检测、定位、识别和跟踪的能力。多维信息融合处理过程主要包括采集信号的处理与增强、高动态目标的识别、信息的综合处理等。对融合处理后的信号进行融合,既可实现在线成像显示,也可将其存储起来供离线处理分析。信息融合可以在传感器信息的预处理前后以及传感器处理部件完成决策后进行。融合方式一般分为三种:一是像素级融合,其特点是信息处理量大、处理时间长、实时性差;二是特征级融合,即对所采集的场景信息(如边缘、形状、轮廓、方向和距离等)进行综合处理,以保留足够数量的重要信息,从而实现数据压缩并有利于实时处理;三是决策级融合,即根据一定的准则和决策的可信度作出最优决策,以便

实现良好的实时性和容错性。信息融合所采用的算法一般有模糊逻辑法、贝叶斯估计法、统计模式识别法和显式推理法等。通过硬件和软件两个方面的进步,加快了多维信息融合技术的发展。从硬件上来看,为了满足多维信息产生的巨量数据的实时处理,必须采用高速微处理器和并行处理技术;从软件上来看,必须发展更加有效的特征级、决策级算法。

4.4 系统结构优化设计

复合制导、多波段探测技术的发展给红外成像制导系统的结构设计带来了前所未有的挑战。如何在日益紧张的制导结构空间内,合理安排机械、光学、电气、微波部件的位置,实现各类传感器所需的视场,保证头罩的透光率和微波传输率,满足电磁兼容性和热设计要求,同时还要配合整体的气动外形设计,这在系统级的结构优化设计中显得尤为重要。

在多模复合制导系统中,需要根据各个传感器的工作方式、系统内部结构的尺寸以及信号处理模式来决定采用哪种孔径方式,如共孔径方式或分离孔径方式。针对当前重点发展的频段差异大、体制差异大的多模复合制导技术,宽频段头罩技术已成为制约精确制导技术发展的重要因素。因此,人们应该进一步开发在微波、毫米波、红外等波段均有较好适用性的新材料,使其尽快走向工程化应用。随着导弹飞行包线的不断增大,高速飞行和大机动所带来的高量级振动冲击将会对采用微机电系统作为角速率传感器的成像制导系统的制导精度产生严重影响。选择适当的减振措施后,一般可使系统受到的机械振动量级降至原量级的 40% 以下。但系统频率与系统的刚度、阻尼及质量之间具有复杂关系,所以更改其中任意一个都会影响其他因素。在实际的设计过程中,需要结合不同的结构形式来设计不同的减振措施,只有这样才能使系统满足要求。

(下转第 28 页)