

红外成像导引技术应用中若干问题的分析

王延新¹, 刘琪², 李兆熠¹, 张爱珍¹

(1. 天津航技术物理研究所, 天津 300308; 2. 空装科订部, 北京 100843)

摘要: 从第一部红外导引系统问世以来, 因其优异的特性各国都投入大量精力进行红外制导技术的研究, 历经了三代探测器类型转变的快速发展, 已经取得了大量成熟的应用。近 20 年来, 红外成像导引技术的应用——红外成像制导武器, 在国外历次战争中都发挥出了决定性的作用。并且随着科学技术的进步和战场需求的变化, 红外成像技术又面临着新的发展机遇和挑战。文中介绍了国外红外成像导引技术的发展历程以及武器装备的研制、改进情况, 探讨了在现代战争中红外成像导引技术的特点及发展趋势, 最后进行了总结并提出了期望。

关键词: 红外成像导引; 导弹; 发展; 应用

中图分类号: TN976 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0026-07

Analysis on several issues of infrared imaging guided technology

Wang Yanxin¹, Liu Qi², Li Zhaoyi¹, Zhang Aizhen¹

(1. Tianjin Jinhang Institute of Technology Physical, Tianjin 300308, China;

2. Research Ordering Department of Air Force Equipment Ministry, Beijing 100843, China)

Abstract: Since the advent of the first infrared guidance system, its excellent properties countries have invested a lot of effort to study the infrared guidance technology. After the rapid development of three generations of the detector type changing, it has made a lot of sophisticated applications. The past 20 years, the application of imaging infrared seeker technology—infrared imaging guided weapons, wars abroad have played a decisive role. And with the scientific and technological progresses and changes in battlefield needs, infrared imaging technology is faced new opportunities and challenges. In this article, the course of development of IR imaging guidance technology and weapons was described, and the characteristics and development trend of IR imaging guidance technology in modern war was discussed. Finally, the summary of the status and expectations was elaborated.

Key words: infrared imaging guidance; missile; development; application

0 引言

红外成像导引技术是利用目标和背景的红外辐射能量,通过特定探测器转化为灰度图像,从而进行目标的识别与跟踪,并导导弹或制导炸弹准确攻击目标的,集光、机、电、控和信息处理于一体的一项专项技术^[1]。20 世纪 60 年代中期,在美国诞生了第一部前视红外成像系统,历经 50 多年的发展,其在军事需求牵引和科技进步推动下不断的革新和进步,并随着计算机技术等高科技领域的高新成果不断涌现,世界各国武器装备趋向于对目标的精确打击,以精确制导为主要特征的导弹武器是现代高技术战争中的“杀手锏”,因此发展精确制导技术并将其应用于导弹武器中,已经成为当今各国军事技术发展的重点之一。红外成像导引技术因为其全天时、对气象环境条件要求低等特点,近年来在精确制导、导航领域占据着越来越重要的位置,美欧各国及俄罗斯、乃至第三世界国家(如印度、巴西等)都竞相发展红外成像导引技术^[2]。

文中介绍了红外成像导引技术的发展历程,对国外红外成像在精导武器中的应用和技术现状进行了翔实的阐述和说明,并对红外成像导引技术发展趋势进行了深入分析,最后提出了对我国在该领域发展的期望。

1 红外成像导引技术发展历程

从第一代红外成像系统的出现,就伴随着在军事领域中的广泛应用,军事需求又不断牵引着红外成像导引技术的发展,从成像模式上其大体历经了三个阶段^[3-5]:第一个阶段是利用点源红外探测器的点源或亚成像制导;第二个阶段是利用线阵红外探测器的光机扫描成像制导;第三个阶段是利用凝视红外焦面阵列(IRFPA)的成像制导。

1.1 红外点源或亚成像制导

目标和环境背景辐射的能量存在强度和空间尺寸的差别,红外点源或亚成像探测器通过对这种辐射特性差异的获取,并利用调制码盘进行空间滤波,即可从杂乱的背景中提取出感兴趣的目标。

采用红外点源或亚成像制导技术的制导武器主要有:“萨姆-7”、“西北风”、“红眼睛”、“尾刺”等。

1.2 光机扫描成像制导

随着红外探测器技术的发展,诞生了敏感元件规格为 $1 \times n$ 像素的线阵列红外探测器。光机扫描成像是通过机械结构推动光学系统或探测器运动,将一帧图像逐行采集,并经过处理形成一幅完成的图像。这种成像方式由于扫描机械结构的存在,导致体积、重量都较大,且图像帧频较低,图像质量较差。此种方式首次实现了对目标区域的红外成像,制导精度和抗干扰能力得到了大幅提升。

采用红外扫描成像制导技术的武器包括“幼畜 AGM-65G”(见表 1)、“标枪”等。

表 1 AGM-65G 性能参数

Tab.1 Typical parameter of AGM-65G

Item	Parameter
Max range/km	43.4
Min range/km	0.6
Max velocity/Ma	1.2
Altitude of flight/m	9 150
Mode of guidance	IR scan
Weight/kg	307
Length/m	2.49
Diameter/mm	305

1.3 凝视焦面阵列成像制导

红外凝视成像导引头通过红外焦平面阵列(IRFPA)探测器来完成对前端光学系统所投射的场景辐射能量的采集,通过读出电路将电信号转化为数字信号,并量化到 256 个灰度级,实现了对目标场景红外辐射能量到灰度图像的转化。根据光学系统参数和距辐射目标距离,探测器中每一像元对应着空间场景相应的尺寸,随着探测器像元规模增大,导引头的空间分辨率也逐步提高。凝视成像与扫描成像方式相比较,其能够实现更高的帧频、更大的图像和空间分辨率、更小的体积和重量,现役制导武器中普遍采用此种制导方式来实现精确制导^[6]。

大气层外轻型射弹(LEAP)^[7]是 20 世纪 90 年代以来美国发展动能拦截弹技术的典型代表,其重要的特点是实现了 KKV 关键技术设备小型化,采用了红外凝视成像末制导方式,具有灵敏度高、分辨率好、无光机扫描、无运动部件、可靠性高等优点。其他采用红外凝视成像制导技术的武器有高层战区高空区域防御计划(THAAD)^[8]、美以合作研制的“箭-2”反导系统、英法共同研制的“风暴前兆”(Storm

Shadow)巡航导弹,美国“战斧”系列巡航导弹、“斯拉姆”对陆攻击导弹等。

2 红外成像在国外精确制导武器中的应用

在制导技术领域德国、美国、苏联起步较早,而随着时代的发展,美国逐渐引领着红外制导武器的进步,处于世界绝对领先地位。20世纪60年代,美率先研制成功空对空红外点源制导导弹^[9],并在70年代初,就着手于红外成像制导技术的预先研究,随着4×4元HgCdTe探测器的研制成功,休斯公司于1975年生产出了第一枚红外成像制导导弹。

随着红外导引技术的发展及历次战争中使用经验的积累,红外导引头形成了由点源到成像、由单色到双色多色、由单一体制到多模复合制导的发展趋势,形成了从早期单一对空发展到可对海、对陆等多打击目标的系列化的精确制导导弹家族。并且现代战争战场环境的逐渐恶劣,自然和人为干扰措施日渐增多,红外成像制导方式是抵抗干扰的有效措施之一。红外成像制导所展现出的优良特质,使得世界各国都在其中投入大量人力、财力进行研制,在20世纪末页初爆发的局部战争中,红外成像制导导弹展现出了卓越的实战能力^[10]。

2.1 防空作战中的红外导引头

防空作战中的红外导引头目前已发展到了第四代,其攻击目标不仅包括飞机、直升机、无人机等传统飞行器,逐步向以空地导弹、巡航导弹为目标的反导作战发展,针对此类高速运动、体积较小的目标,需要红外导引头具有更大的视场、更快的响应速度和更高的帧频,对探测器件提出了更高的要求。

2.2 对陆作战中的红外导引头

对地面目标进行攻击,面临背景环境复杂、干扰因素众多等不利因素,长期限制对陆导弹的发展。红外成像制导导弹利用获得的目标区域高精度、高分辨率图像,对目标进行有效探测和识别,实现了更准确的识别、更高精度的跟踪和更强的抗干扰能力。相对于传统可见光电视导引头而言,其依靠物体自身红外辐射,对攻击时间无特殊要求,并且红外波段辐射能量传输受气象条件影响较少,实现了全天候、全天候工作,能够有效解决了对陆攻击的难题^[11]。

20世纪80年代以后,随着红外探测器技术和成

像技术的飞速发展,世界各国研制成功了多型对陆攻击红外成像制导武器。如美国洛克希德马丁公司、雷神公司生产的标枪,其为单兵携带式导引反坦克导弹,通过红外成像导引实现射后不理。其发动机为固体燃料火箭,弹体长度1.1m、直径127mm、重量11.8kg;射程在75~2500m之间,弹头为纵列锥形装药高爆穿甲弹(HEAT)8.4kg,贯穿能力大于600mm滚轧均质装甲(RHA)。

2.3 海战中的红外导引头

随着反舰导弹的发展及多次海战中卓越的表现,各国纷纷研制和装备了大批量舰载干扰设备和舷外有源无源诱饵等反导装置,反舰导弹面临着及其恶劣的战场环境和对抗态势,其突防能力受到了前所未有的严峻挑战。并且,随着战略重点转移和战术应用变化,近岸和港内目标成为了反舰导弹新的作战打击对象。此种条件下,环境背景起伏变化较大且杂乱无章,港内及近岸大量的电力设施使得微波环境更加复杂,微波导引头难以将舰船目标从复杂的背景中分辨出来,导致微波导引头对近岸和港内目标的探测和识别能力差强人意。而随着红外成像技术的发展,各国同时将红外成像导引头应用于反舰导弹,以提高其抗干扰能力和目标的识别跟踪精度。

红外成像反舰导弹主要有美国的捕鲸叉改进型AGM-84A、幼畜AGM-65F空舰导弹、挪威的企鹅系列、瑞典的RBS15 Mk远程反舰导弹及台湾地区的雄风II反舰导弹,其他国外典型应用如表2所示。

表2 国外红外成像制导的典型应用

Tab.2 Typical applications of foreign infrared imaging guidance

Nation	Name	Mode of guidance	Detect range	Remark
	SLAM	IR+MITL	16 km	-
	SLAM-ER	IR+MITL ATR	-	256×256 (320×240) LWIR
	JSOW AGM-154C	IR+ATA (IR+MITL)	1.5 km	-
U.S.A.	JASSM AGM-158	IR+ATA	-	-
	AGM 130	IR+MITL	-	-
	AGM 137	IR	-	256×256
	BLOCK IV	IR+MITL	-	-
	Glard SLAM	IR+MITL	-	256×256
	JDAM	IR+ATA	-	FPA CEP 3 m

表 2 续表

Nation	Name	Mode of guidance	Detect range	Remark
Russia	X-25M	IR	-	-
U.K.	Storm shadow	IR+ATR MITL	-	320×256 MW MCT
France	SCALP-EG	IR+ATR MITL	-	-
Germany	Taurus KEPD-350	IR+ATR	-	256×256 InSb
Israel	AGM-142	IR+MITL	-	-
Sweden	ASOM	IR	-	-
Italy	SkyShark	IR+MITL	-	-
South Africa	Torgos	IR	-	-

3 国外红外成像导引技术现状

红外成像制导技术的不断发展成为红外成像制导武器作战效能不断提高的基础。目前国外已经将红外成像制导技术拓展:一是复合制导;二是智能化;三是“多用途化”“多制导类型”兼容制导体制;四是双/多波段制导。

3.1 复合制导

红外成像制导方式增强了制导武器的适应性、抗干扰能力和命中精度,但现有传统红外成像制导武器性能指标逐渐不能满足不断提升的作战需求。并且历次局部战争中其优异作战性能表现,致使各国都大力研制人工红外伪装和干扰措施,单一体制的红外制导方式被严重针对。随着 ATR 技术的发展,目标自动识别逐渐获得了应用,和人在回路进行攻击目标选取相比较,其需要更多的目标及背景信息来完成发射后对目标的自动识别。因此复合制导模式能够提供两种或以上信息源,其中包括采用不同波段红外辐射,采用红外、雷达和激光多种探测制式等多种复合组合方式,利用不同类型探测模式自身特点,充分发挥自身优势,弥补彼此的不足,使得复合导引头在识别跟踪性能上获得一次飞跃^[12]。

联合空地导弹(JAGM)采用了红外成像、半主动激光、毫米波雷达三模导引头,这三种导引模式可以同时工作,并可自由切换,以此克服战场烟尘、天气、昼夜等环境的影响,并能有效提高应对各种电子对

抗手段的能力。尽管世界各军事强国已装备了多种双模导引头的导弹装备,但三模导引头技术的应用还尚属首例。目前除 JAGM 之外,采用三模导引头的精确制导武器只有处于工程研制阶段的小直径制导炸弹 II(SDB II)。在三模导引头的研制过程中,面临着诸多技术挑战,包括传感器的小型化、结构集成化设计、射频和光学孔径的设计、头罩的工艺和制造、信息融合、数据综合决策等。

3.2 智能化

科学技术迅猛发展,人们希望依靠传感器技术、微电子技术、信息处理技术、人工智能技术的突破,实现精确制导武器自主、智能的完成侦查、攻击任务。智能化的发展趋势需要导弹具备自主航迹规划、飞行轨迹自动修正能力,在巡航段对地面目标的自动探测和侦查,完成末制导阶段对攻击目标的自动识别、锁定和跟踪,能够利用多枚导弹协同攻击,并对目标毁伤效果进行评估等等。

美国“战斧”Block IV 型智能导弹是从“战斧”Block III 型发展而来,其在智能化方面取得了新的进展,被称为越来越聪明的导弹。其巡航阶段采用改进型惯性导航系统以及全球定位系统,末制导阶段采用红外成像配合数据链反馈制导系统,与 Block III 相比脱靶量减小了两倍。Block IV 数据链通信包括两种类型:实时视频数据上传和双向卫星数据传输链路。视频数据上传可以实时向战地指挥人员传输侦查或打击目标图像,有效确保攻击目标的准确性;通过双向卫星信号传输,导弹可以在任务执行过程中接受指挥指令,读取预先装订的目标信息或根据目标经纬度进行新攻击目标设定,并自动进行航迹规划完成打击任务。并且导弹还能够在战区上空长时间巡航飞行,对地面战场进行侦查,待从卫星、预警机、无人机等接收重新瞄准目标和定位的数据,引导导弹对新目标实施打击,并可进行目标毁伤效果评估。

3.3 “多用途化”“多制导类型”兼容制导体制

近年来,红外制导导弹呈现出系列化、模块化的发展趋势,同一弹体能够配备多种制导方式的制导设备和导引头,实现对海、陆、空多种不同类型目标的打击,形成多用途化的系列导弹。

多制导类型可互换的“一弹多头”的兼容性发展体制是当今世界精确制导武器发展的趋势。美国的幼畜导弹、海尔法导弹、“铜斑蛇”精确制导炮弹等,

都配有四种以上不同制导体制的结构上基本兼容的导引头(激光、电视、雷达/红外、红外成像<光机扫描型和凝视型>等),而幼畜导弹还正在研制毫米波导引头。在新型精确制导武器研制过程中,要充分考虑不同功能部件的通用化设计,实现当有特殊需求时,通过功能模块的组装,即可完对特殊应用的快速实现。因此,模块化设计方法是实现“一弹多用”、“一弹多头”的制导体制的重要技术途径,它对于缩短不同制导类型的制导武器的更新换代的研制周期,降低研制成本等具有显著的重要意义。因此要把发展模块化设计技术放在不同制导体制研究的重要位置。

3.4 双/多波段制导

因为现代战争战场环境越发复杂,人工干扰和伪装使得单一波段的红外导引头探测和识别能力下降,导致命中精度降低。人造材质和自然材质在不同波段,例如在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个波段内,呈现出较明显的特征差异。因此采用双波段或多波段探测器件能够有效对伪装等干扰措施的鉴别能力,并通过不同波段大气透过率差异,提高系统的探测距离。随着多元双色探测器技术的成熟,新一代红外预警探测系统采用了双色探测器件^[13]以提高其探测识别能力。例如,美国新一代动能拦截弹,采用了包括双色红外凝视成像在内的多波段复合制导、法国“斯皮拉尔”(Spiral)舰用红外警戒系统、美加联合研制的 AN/SAR-8 舰用红外搜索跟踪装置、荷兰的 IRSCAN 均采用双波段探测等。

4 国外红外成像导引技术发展趋势

国外红外成像导引技术朝着低成本、小型化、多色等方向发展;应用领域朝着网络化、智能化制导技术及超声速等制导方向发展。

4.1 网络化、智能化、小型化红外成像精确制导武器

综观当今各国武器的发展趋势,无人战斗机和第四代隐身战斗机将成为未来空面制导武器的主要应用平台。由于无人战斗机载荷能力有限,四代机要求武器内埋挂装,为了增加挂弹数量,满足对多目标的打击要求,同时减小定点打击的附带损伤,武器系统的设计必须满足小型化要求。与此同时,传统陆军弹药对精确打击能力也提出了越来越高的要求,为小型化精确制导武器的发展提供了更为广阔的需求背景。国外几种典型小型化精确制导武器详见表 3。

表 3 小型化精确制导武器举例

Tab.3 Examples of miniaturized precision-guided weapons

Species	Typical weapons	Nation	Terminal guidance
Mini air-to-ground missiles	JAGM	U.S.A.	Millimeter-wave + Semi-active laser+IR
	Helvire AGM-114A	U.S.A.	Semi-active laser
	AASM125	France	IR
	SDB II	U.S.A.	Millimeter-wave + Semi-active laser+IR
Guided bombs	Precision attack missile	U.S.A.	Semi-active laser+IR
	"Smart" terminal sensitive projectile	Germany	Millimeter-wave +IR
Light sub-munitions	LOCAAS	U.S.A.	Active laser
	Smart	Germany	Millimeter-wave + IR
Dispenser	BIU-108	U.S.A.	-

小型化精确制导武器主要有以下特点:

(1) 低成本

导弹武器进几年局部战争中消耗最多的高技术武器,导弹攻防对抗将成为未来高技术战争的主要作战样式,低成本对小型精确制导武器具有重要的现实意义。

(2) 模块化、通用化

模块化的武器装备可以适应不同类型平台,做到功能相似的零部件的通用,提高武器装备的通用效能。

(3) 信息化、网络化

现代战争已从过去单平台和单系统的作战逐渐转向电子战、信息战和网络化的体系对抗,武器装备已成为战争中的一个重要作战节点。

4.2 非制冷红外成像导引技术应用

非制冷红外成像探测器无需制冷机构,能够满足结构简单、小巧、轻便、价廉的新需求,更加适用于导弹这种无法重复使用的高消耗武器系统。随着器件发展,如图 1 所示,非制冷红外探测距离增大,特别是当今卫星导航、惯性导航精度的提高已经能够保证在飞行过程中较高控制精度,进入末制导阶段时,能够确保目标大体处于视场中心,这样对红外成像导引头的作用距离要求就不再那么严苛,使得非制冷红外成像探测器可以满足作战使用需要。如图 2 所示,随着非制冷红外成像器件的发展^[14-15]

以及 MEMS 新技术的应用^[16-17],使红外成像制导在小型精确武器中的应用成为可能,满足了小型化、低成本的需求。

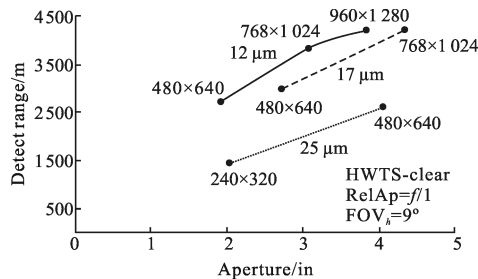


图 1 非制冷红外探测器探测距离

Fig.1 Detect range of uncooled infrared detector

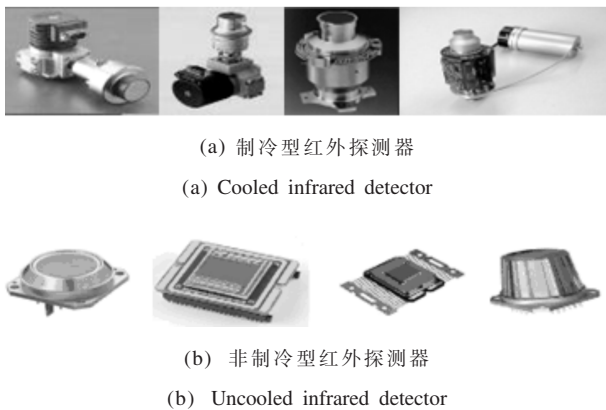


图 2 制冷型与非制冷型红外探测器的比较

Fig.2 Comparison of cooled and uncooled infrared detector

4.3 超声速/高超声速导弹红外成像导引应用技术

20 世纪 80 年代初,国外许多国家就开始了超/高超声速导弹相关技术的研究工作。美国、俄罗斯等国在 20 世纪末和 21 世纪初已陆续在若干关键技术上取得了重大突破,并相继进行了地面和飞行试验^[18]。军事发达国家的高超声速技术已经从概念和原理探索阶段进入了以高超声速巡航导弹、高超声速飞机、跨大气层巡航导弹和空天飞机等为应用背景的先期技术开发阶段,在航天、航空、导弹等方面实施多项高超声速研制计划,已取得不少技术成果^[19-20]。

红外成像末制导方式在超音速导弹的末制导方面典型的应用有:阿尔弗(ARF)超音速空射反辐射导弹,该导弹射程为 100 km,采用雷达和红外复合的双模导引头,工作在厘米波段的被动雷达用于目标定位,当目标雷达关机时红外成像传感器用于末段制导;阿米格(ARMIGER)远程超音速空对面反辐射导弹,该导弹射程为 150~200 km,采用雷达和红外复合

的双模导引头。美国雷声公司基于 AIM-9X 的低空拦截弹采用中波红外成像制导和平台稳像方式;圆形侧窗的材料为氧化钇;带保护罩;设计要求打击接近海平面高度目标时拦截弹末段飞行速度为 4Ma;打击 7 km 高度处目标时拦截弹末段飞行速度为 5Ma;打击 11 km 高度处目标时拦截弹末段飞行速度为 6Ma。目前,雷声公司正在通过软件改进,验证该导弹的空对地攻击能力,最近一次试验中,该导弹命中了墨西哥湾海面上快速行驶的机动舰艇。而在上一次试验中,该导弹成功命中一辆地面移动的装甲运兵车。

超声速导弹具有更高的生存能力及更有效的打击能力,符合未来的发展方向。末段制导采用红外成像、雷达/红外成像复合,可以有效的保证命中精度、全天候作战能力及提高导弹的作用距离。但超声速导弹红外成像末制导系统必须解决气动光学效应问题,并解决一系列所面临的关键技术。如超声速导弹采用红外成像末制导时,在大气层内面临着严重的气动光学效应和云层干扰。由于导弹头部与大气的相互作用,头罩周围形成一个高温、高压及成分和密度高频变化的激波流场,产生气动光学效应,导致图像偏移、模糊、抖动、畸变,影响导引头输出目标视线角位置和角速度的精度,以及对目标的识别跟踪能力。并且头罩产生严重的气动加热现象,典型驻点温度可达 3 000 K 左右,侧壁表面热流可达 1 000 W/cm²量级,在成像器前形成热障。

与此同时,国外许多国家也相继开展了面向超/高超声速导弹的光电成像制导技术的研究工作,例如,美国的 X-51 计划(见图 3)、HyFly 计划,印度与俄



图 3 高超音速飞行器 X-51

Fig.3 Hypersonic aircraft X-51

罗斯合作研发的布拉莫斯超/高超声速巡航导弹等。从目前的资料来看,红外成像制导技术大多以对空、拦截弹为主要背景开展研究。因此,此类研究工作也从

侧面说明了红外成像制导技术在高超声速巡航导弹领域也有着良好的应用前景。表 4 列举出了国外部分应用红外成像制导的超声速/高超声速导弹的情况。

表 4 国外超声速/高超声速光电成像制导导弹

Tab.4 Foreign supersonic/hypersonic optical imaging-guided missiles

Name	Spectral
Terminal high-altitude area defense(THAAD)	MWIR
SM-2 BlockWA	IR
Exoatmospheric reentry-vehicle interception system(ERIS)	LWIR
Hi Endo defense interceptor(HEDI)	IR
Brilliant Pebbles(BP)	MWIR/LWIR

5 结束语

从 20 世纪 50 年代至今,军用红外成像系统历经快速发展,取得了卓越的成就,末段寻的制导方式有效的提高了导弹的打击精度及对目标选择和攻击的灵活性,成为现代战争中一种重要的信息侦查和打击手段。并且,红外成像制导技术又向着一个新的高度不断发展;探测技术向高灵敏度、高分辨率、大规格和多色成像发展,制导方式向着多模复合制导发展,以及红外成像导引头的低成本、小型化,研制生产的系列化、通用化、模块化等。

红外成像制导技术研究是一项迫切、艰巨而又富有挑战性的工作,不断涌现的新需求可以证明,该领域的研究方兴未艾,今后红外成像制导技术将长期处于高速发展阶段,研究工作将会不断取得突破,我国在此领域要紧跟国际前沿脚步,加强技术的深入研究,对提高我国红外成像制导技术具有十分重要而又深远的意义。

参考文献:

- [1] Florina Jitescu, Octavian Novac. Staring infrared focal plane arrays for thermal imaging technology [C]//6th Symposium on Optoelectronics, 1999.
- [2] Tidrow M Z, Dyer W R. Infrared sensors for ballistic missile defense[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42: 3-5.
- [3] Reine M B. Status of HgCdTe detector technology [C]//Proceedings of SPIE, 1983, 443: 2-11.
- [4] Vandersten A, Kelley B. LWIR advanced technology seeker (LATS) status[C]//1992 Aerospace Design Conference Feb, 1992.
- [5] Mcadoo J A. Review of concepts and applications for multispectral/hyperspectral Focal Plane Array (FPA) technology [C]//Proceedings of SPIE, Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere, 2001, 4151: 60-67
- [6] Meimei Z Tidrow, Walter R Dyer, Paul Le Van, et al. IRFPA development for ballistic missile defense needs [C]//Infrared Technology and Applications XXVIII, 2002.
- [7] Paiva Clifford A. Navy theater ballistic missile defense boost multispectral discrimination requirements for low-resolution detection classification and high-resolution aimpoint selection [C]//Applications and Science of Computational Intelligence, 1998.
- [8] Spencer J K. Ballistic missile defense: information on theater high altitude area defense (THAAD) system [R]. U. S. General Accounting Office, GAO, Washington, DC 20548 Report, 1994: 21.
- [9] Tidrow M Z. MDA IR sensor technology program and applications [C]//Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXIX, 2003, 5074: 39-43.
- [10] Nicholas T, Rossi R U S. Missile data book [Z]. US: U.S. Bata Search Associates, 2003.
- [11] David B Reiss. Spatial signal processing for infrared detection [C]//SPIE, 1994, 2235: 38.
- [12] Ohlmeyer E J, Pepitone T R, Miller B L. GPS -Aided navigation system requirements for smart munitions and guided missiles[R]. Naval Surface Warfare Center, 2002.
- [13] Seek Fai Cheak. Detecting near-Uv and near-IR wavelengths with the fovea image sensor [D]. Monteroy Naval Postgraduate School, 2004: 2-11.
- [14] Neshor O, Elkind S, Nevo I, et al. 480x384 element InSb detector with digital processor [C]//Proceedings of SPIE, Thermosense XXVI, 2004, 5406: 214-221.
- [15] Philip E Howard, John E Clarke, Adrian C Ionescu. DRS U6000 640 480 VOx uncooled IR focal plane [C]//SPIE, 2002, 4721: 48-55 .
- [16] Mao M. Infrared vision using uncooled thermo-optomechanical camera: design, microfabrication, and performance [C]//Proc IEEE MEMS Conf on Los Angeles, 1999, 1(17-21): 100-105.
- [17] Zhao Y. Optomechanical uncooled infrared imaging system [D]. Berkeley: Dissertation of UC, 2002.
- [18] White M E. Hypersonic cruise missiles for long-range precision strike [C]//1997 Precision Strike Technology Symp, Laurel, MD, 1997: 103-116.
- [19] Cabanski W, Breiter R, Mauk K-H, et al. Status of third generation focal plane array IR detection modules at AIM [C]//Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXIX, 2003, 5074: 201-209.
- [20] Tidrow M Z. New infrared sensors for ballistic missile defense [C]//Proceedings of SPIE, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices II, 2005, 5732: 217-224.