

光电成像末制导智能化技术研究与展望

于俊庭¹, 李少毅^{2*}, 张平³, 罗振宇¹

- (1. 93184 部队, 北京 100076;
2. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072;
3. 93129 部队, 北京 100036)

摘要: 人工智能技术是实现光电成像精确制导武器智能化、提升复杂作战环境作战性能的重要途径, 研究与总结国外成像末制导智能化技术发展现状和趋势对我国精确制导武器智能化技术发展具有重要的指导意义。介绍了光电成像精确制导武器在当前局部冲突中的重要性、多模复合成像末制导及智能化技术发展的必然性。概述了全球主流对海、对地、对空等精确制导武器的成像末制导发展现状, 分析总结了光电成像末制导不同阶段智能信息处理面临的关键问题、技术原理和智能化水平。总结了现役或在研的智能化武器装备所具有的智能化特征, 并依据现有的人工智能技术分析了其智能技术原理与武器智能化功能实现。从作战目标、作战环境、对抗模式、新型作战样式等方面分析了成像制导导弹所面临的未来复杂战场环境与作战需求, 以及对成像末制导智能化技术带来的挑战。依据人工智能与人脑视觉认知能力的对比, 提出了未来成像末制导技术智能化的六个能力特征, 以及将成像末制导智能化划分为功能级智能、系统级单体智能、体系级群体智能技术三个发展阶段, 并分析了相应的技术内涵、关键技术与实现功能。

关键词: 精确制导武器; 成像末制导; 人工智能; 复杂环境; 能力特征

中图分类号: V1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220725

0 引言

目前, 空空、空面、反舰、反坦克等导弹, 航空制导炸弹等精确制导武器已成为现在战争中不可或缺的主战装备, 已在历次局部战争中被广泛应用并发挥了重要作用。2011 年利比亚战争中, 以英美法为首的多国联军利用“战斧”巡航导弹、JDAM 制导炸弹等多种精确制导武器, 对叙利亚政府军的防空导弹、预警雷达及地面部队等目标进行了精确打击, 成功达成战术战役目标^[1]。2022 年俄乌冲突中, 俄罗斯动用了包括“伊斯坎德尔”陆基导弹系统、“口径”海基巡航导弹、“匕首”空射高超声速导弹等精确制导武器, 对乌克兰的军事指挥所、防空系统、军事基础设施、后勤补给基地等重要军事目标进行中远程精确打击, 为有效掌控制空/海权、支援地面作战发挥了重要作用^[2]。

表 1 列出了俄乌冲突中采用的主流精确制导武

器, 分析可知: (1) 红外、可见光成像等末制导成像体制成为此次俄乌冲突中使用精确制导武器的主流, 其优势已经在实战中获得检验, 取得了巨大成功; (2) 随着战场环境的日渐复杂以及目标对抗性能的不不断提高, 未来精确制导武器必将走向多模复合寻的末制导体制, 而以光电成像为基础的多模制导体制已经成为主流的末制导模式^[3]。

与此同时, 随着人工智能技术的发展与进步, 近年来, 各军事强国正积极将人工智能技术运用到精确制导武器中, 并取得了一定的技术突破, 如研制了 LRASM 反舰导弹^[4]、“海上破坏者”、“SPICE-250”精确制导炸弹^[5]等智能化武器装备, 以提升复杂战场环境的作战效能。在实现精确制导武器智能化的过程中, 复杂战场环境自主感知、自动目标截获 (ATA)、自动目标识别 (ATR) 以及自适应导引等成像末制导

收稿日期: 2022-10-13; 修订日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62273279)

作者简介: 于俊庭, 男, 工程师, 博士, 主要从事机载武器系统方面的研究。

通讯作者: 李少毅, 男, 副研究员, 博士, 主要从事光电探测、智能感知与一体化制导技术方面的研究。

表 1 俄乌冲突中参战精确制导武器技战术性能^[2]

Tab.1 Technical and tactical performance of precision guided weapons in the Russian-Ukrainian conflict ^[2]

Model	Guidance mode	Warhead	Range/km	Speed/Ma	Hit accuracy/m
3M-14 "Kalibr" cruise missile	Inertial navigation+Satellite navigation+Terrain matching+Active terminal radar guidance	400 kg high bursting disc warhead	Submarine-launched: 2 000; Ship-launched: 1 500	Max 0.8	5
Iskander-M (9M723)	Inertial navigation+Satellite navigation+Optical terminal guidance	400 kg Cluster/penetrating/anti-personnel explosive warhead	480	Max 6	5-10
Iskander-K (9M728)	Inertial navigation+Satellite navigation+Terrain matching+Active terminal radar guidance	400-500 kg high bursting disc warhead	490-500	0.68-0.76	3
Kh-101 air-launched cruise missile	Inertial navigation+Satellite navigation+Terrain matching+IR imaging terminal-guidance	400 kg high explosive penetration warhead	4 500	0.57-0.8	10
Kh-31P air launched anti-radiation missile	Inertial navigation+Passive terminal radar guidance	87 kg high rupture disc kill warhead	110 (High-altitude) 15 (Low-altitude)	2-2.9	-
Dagger hypersonic air launched missile	Inertial navigation+Terminal radar guidance	Nuclear warhead or conventional high explosive warhead	2 000	10	-
Kh-29 air-to-ground guided missile	TE: Television terminal guidance; L: Semiactive laser guidance	320 kg explosive penetration warhead	TE: 3-30; L: 3-10	0.8	-
"Redoubt" coast ship security complex	Inertial navigation+Active/Passive radar guidance	200 kg semi-armor piercing warhead	300	2-2.2	-
"Bal" coast ship security complex	Inertial navigation+Active radar guidance	145 kg semi-armor-piercing high bursting disc warhead L: 200 kg high explosive warhead	260	0.8	-
KAB-500L laser guided bomb	Semi-active laser	KL: 200 kg cluster warhead; LG: 195 kg high explosive warhead	9	-	L: 7 KL: - LG: -
KAB-500 Kr television guided bomb	Television guidance	Kr: 380 kg penetrate warhead; OD: 250 kg fuel air warhead; Kr-E: 80 kg penetrate warhead	9	-	Kr: 7 OD: 7 Kr-E: -
"305" Air-to-ground missile	Inertial navigation+Television guidance Inertial navigation+ Infrared image guidance	-	-	-	-
KUB-LBA loitering munition	Television/Infrared image guidance	3 kg	-	0.3	-
Javelin anti-tank missile	Infrared image guidance	Tandem armor-breaking warhead	2	-	-
Switchblade -300/600 loitering munition	Television/IR imaging dual mode guidance	-	9	0.3	-

注: 部分数据来自简氏

技术性能的大幅提升依赖于人工智能技术的深度融合应用。因此,进行成像末制导智能化技术与未来发展方向研究,对于紧跟制导模式发展趋势、实现武器作战性能的革命性提升具有重要参考意义。

1 光电成像末制导发展现状

1.1 对海成像末制导发展现状

国外典型对海作战武器主要包括空射、岸射、舰射等不同发射形式的反舰导弹,如“飞鱼”、“捕鲸

叉”、“花岗岩”等,大多采用雷达末制导,部分采用成像末制导作为辅助末制导方式。随着舰船隐身技术以及有源干扰、无源干扰等“软”杀伤技术的发展,使得对海精确制导武器面临着日益复杂的电磁环境,驱使新一代武器末制导方式由单一探测体制转向包含光电成像探测的多模复合末制导方式。

近年来,为了对海上目标进行精确打击,各国列装的、新研发的采用成像末制导的对海打击精确制导武器如表 2 所示。

表 2 对海精确制导武器相关性能

Tab.2 Performance related to sea precision guided weapons

Model	Nation	Guidance mode	Seeker structure	Imaging detector type	Detection capabilities	Tracking capabilities	Level of intelligence
AGM-84 harpoon anti-ship missile	USA	Active radar/IR imaging compound guidance	-	16-element mercury cadmium telluride detector array	Weak	Weak	Weak
LRASM anti-ship missile	USA	INS/GPS+Data chain+Multi-pattern composite guidance	-	256×256 element infrared gaze array	General	Strong	Strong
NSM anti-ship missile	NO	Inertial navigation+GPS+ Terrain matching+Dual band IR imaging terminal-guidance	-	Medium and long wave two-color infrared gaze array	Strong	General	General
Sea Breaker (Missile)	ISR	Inertial navigation+Terrain matching+IR imaging terminal-guidance	-	Mid-wave infrared gaze array	General	Strong	Strong

反舰导弹等对海作战武器在成像末制导阶段面临复杂的海背景环境与强电磁对抗环境,其作战目标类型主要为舰船等慢速运动目标。一般地,其成像末制导采用人在回路与智能信息处理融合的方式实现捕获、跟踪,智能信息处理可根据攻击任务和目标特性大致划分为三个阶段:(1) 远距目标截获阶段,主要面临海杂波、海亮带、鱼鳞光、海天线、海地线等复杂背景带来的目标检测问题;(2) 中近距目标跟踪阶段,主要面临海亮带、鱼鳞光、舰船倒影及尾浪、民用

船舶、岸岛背景、烟幕对抗等带来的疑似目标与多目标识别、目标遮挡、跟踪点漂移等抗遮挡、抗干扰跟踪问题;(3) 近距目标关键部位识别打击阶段,主要面临目标相对尺度变化、烟幕对抗、目标充满探测器视场等带来的局部关键部位识别、跟踪点选择等精确稳定跟踪问题。相应地,据此分析,传统典型成像末制导信息处理技术原理如图 1 所示。并在图 2、图 3 中分别展示了三种先进对海作战武器以及舰船目标在不同阶段的红外成像。

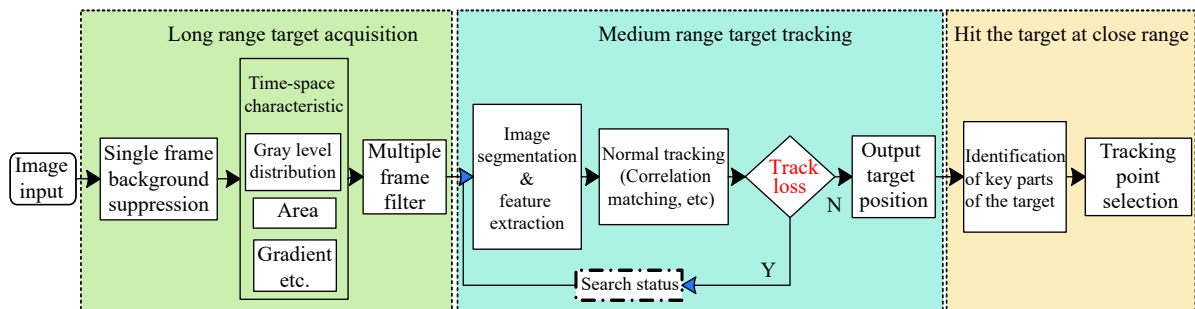


图 1 对海目标成像末制导智能信息处理原理框图

Fig.1 Block diagram of intelligent information processing for terminal guidance of imaging to sea targets

远距目标截获阶段,一般采用 Top-Hat 形态学滤波等单帧背景抑制方法、自适应阈值分割方法提取疑似目标,结合背景噪声、目标灰度分布、面积、梯度及其变化特性抑制背景噪声,同时融合能量累积、管道滤波、动态规划等多帧滤波方法进一步降低虚警。

中近距目标跟踪阶段,现役成像制导反舰导弹等,其成像末制导多采用模式匹配方法^[6]。早期采用基于特征相关匹配的自适应跟踪方法,使用目标的几何尺寸、外形轮廓、灰度、位置等简单特征与内存的目标特征模板进行相关处理,实现对目标的跟踪,并

依靠相关系数进行跟踪态与搜索态的转换。基于特征相关匹配方法计算速度快、消耗资源少,但是抗背景噪声与抗尺度变化能力鲁棒性比较差。后来,随着弹载计算机等硬件信息处理能力的提高,成像末制导开始使用基于图像模板匹配方法,需要预先存储目标模板,计算效率高,但抗光照、抗背景噪声能力差。随后,发展了基于相关滤波的匹配方法,包括 KCF^[7]、fDSST^[8]、ECO^[9]等,抗尺度变化、抗光照变化能力增强,跟踪精度与稳定性均有提升,且计算效率较高,但抗遮挡能力仍然不足。当前,随着深度学习的发展,

出现了基于深度学习与相关匹配融合的智能跟踪器,包括 SiamFC^[10]、SiamRPN^[11]、ATOM^[12]等方法,抗尺度变化、抗光照变化、抗背景噪声能力大幅增强,也具备了一定的抗遮挡能力,跟踪精度与稳定性均有大幅提升,但计算效率较低且硬件计算能力要求高,同时环境适应性有待提高。

近距离目标关键部位识别打击阶段,主要使用基于模型的目标识别来实现对于舰艇关键部位的精确打击^[6]。基于模型的目标识别是在统计模式识别的基础上引入模型假设,如垂发装置、指挥舰岛等局部相对于舰船整体的位置关系模型,将分割提取到的目标区域与位置关系模型进行相似性度量,从而最终实现对舰船关键部位的识别与跟踪。

同时,伴随着人工智能的发展,新一代的对海精确制导武器,如 LRASM 反舰导弹、NSM 反舰导弹等更多的采用智能化的多模导引头,通过采用自动目标识别 (ATR)、自主导航规划等技术,提升了反舰导弹的突防能力与作战效能,使其具备了智能化的雏形。值得一提的是,2011 年以色列的“拉斐尔先进防御系统”有限公司推出的第五代远程、自主、精确制导武器系统“海上破坏者”反舰导弹,支持对静止和运动目标的自动捕获 (ATA) 和识别 (ATR),使用经过训练的人工智能 (AI) 和机器学习 (ML) 处理搜索者获得的大数据资源,能够对各种高价值的海上和陆地目标,提供显著的攻击性能。

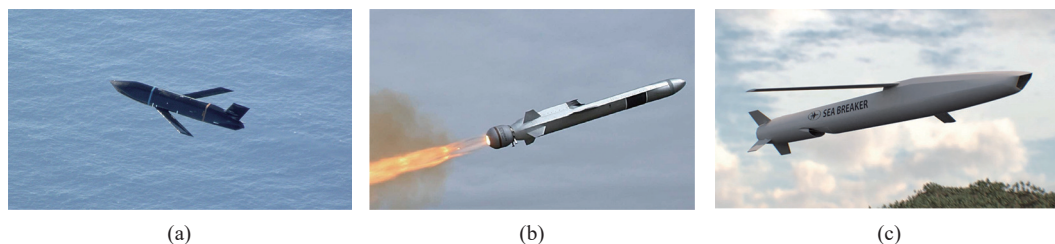


图 2 (a) LRASM 反舰导弹; (b) NSM 反舰导弹; (c) “海上破坏者”导弹武器系统

Fig.2 (a) LRASM anti-ship missiles; (b) NSM anti-ship missiles; (c) "Sea Braker" missile weapon system

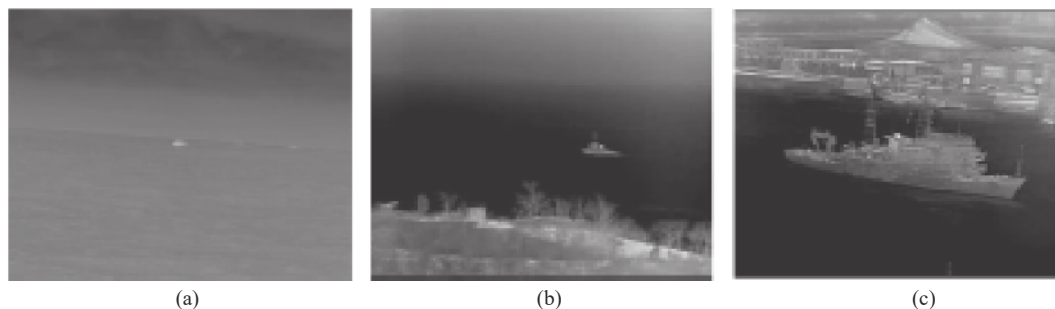


图 3 舰船目标不同阶段红外成像

Fig.3 Infrared imaging of ship targets at different stages

1.2 对地成像末制导发展现状

国外典型对地攻击武器主要包括空射、舰射、陆基等不同发射形式的空地导弹、巡航导弹、反坦克导弹等,如“小牛”空地导弹、“战斧”巡航导弹以及“标枪”反坦克导弹等,多采用电视、红外等成像制导作为末制导方式。同时,也发展了多型电视/红外、红外/雷达等多模复合末制导技术的对地武器。为了实现对地面目标的精确打击,各军事强国发展了各种各样的对地精确打击武器,主流的成像末制导对地武器如

表 3 所示。

空地导弹等对地打击武器在成像末制导阶段面临复杂地面背景环境与强电磁对抗环境,其作战目标类型包括装甲车等快速运动目标、阵地等固定工事。一般地,与反舰导弹类似,其成像末制导采用人在回路与智能信息处理融合的方式实现捕获、跟踪,智能信息处理可根据攻击任务和目标特性大致划分为三个阶段:(1) 远距离目标截获阶段,主要面临森林、沙漠、草地、城市、乡村、天地线等复杂地物背景带来

表 3 对地精确制导武器相关性能

Tab.3 Performance related to precision guided weapons to the ground

Model	Nation	Guidance mode	Seeker structure	Imaging detector type	Detection capabilities	Tracking capabilities	Level of intelligence
Maverick infrared guided air-to-ground missile	USA	GPS/IR imaging composite guidance type	-	16-element mercury cadmium telluride detector array	-	-	Weak
SLAM-ER air-to-ground guided missile	USA	INS/GPS+IR imaging terminal-guidance	-	256×256 element infrared gaze focal plane	-	-	General
KEPD-350 air-to-ground guided missile	GER SWE	INS/GPS+Terrain matching+IBN+IR imaging terminal-guidance	Semi-strapdown	256×256 element indium antimonide infrared focal plane	FOV: 12°	-	Weak
MMP anti-tank missile	Fr	TV/uncooled IR dual-mode imaging terminal guidance	-	-	-	-	General
Spike-LR	ISR	CCD/IR dual mode guidance+Fiber optic or RF data link	-	-	-	-	General
Tomahawk air-launched cruise missile	USA	IR terminal-guidance	-	-	-	-	-
JDAM IR guided bomb	USA	IR imaging guidance	Strapdown	-	-	-	Weak
SDB-II guided bomb	USA	Millimeter-wave/laser/IR imaging three-mode composite guidance	-	-	-	-	Strong
JASSM air-to-ground guided missile	USA	GPS/INS midcourse guidance+IR imaging terminal-guidance	-	256×256 element infrared gaze focal plane	FOV: 12°	-	General
SPICE-250 guided bomb	ISR	Television/IR dual-mode imaging terminal guidance	-	-	-	-	General

的目标检测问题；(2) 中近距离目标跟踪阶段，主要面临树林、建筑物、烟尘、民用车辆、伪装、烟幕与诱饵对抗等带来的疑似目标与多目标识别、目标遮挡、跟踪点漂移等抗遮挡、抗干扰跟踪问题；(3) 近距离目标关键部位识别打击阶段，主要面临目标相对尺度变化、烟

幕对抗、目标充满探测器视场等带来的局部关键部位识别、跟踪点选择等精确稳定跟踪问题。相应地，据此分析，传统典型成像末制导信息处理技术原理如图 4 所示。并在图 5、图 6 中分别展示了三种先进地对地打击武器以及坦克目标在不同阶段的红外成像。

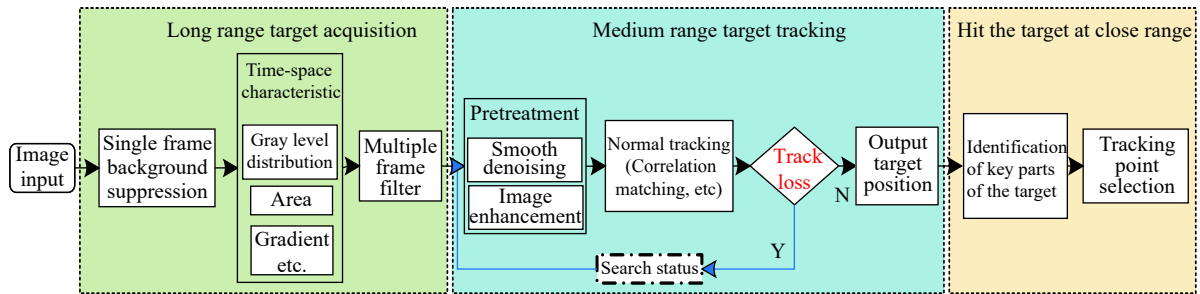


图 4 对地目标成像末制导智能信息处理原理框图

Fig.4 Block diagram of intelligent information processing for terminal guidance of imaging to ground targets

远距离目标截获阶段，一般采用背景抑制方法等提取疑似目标，结合背景噪声、目标灰度分布、面积、梯度及其变化特性抑制背景噪声，同时融合能量累积、管道滤波、动态规划等多帧滤波方法进一步降低虚警。

中近距离目标跟踪阶段，现役成像制导空地导弹、

巡航导弹等，与反舰导弹类似，其成像末制导多采用模式匹配方法^[6]。早期的模式匹配方法主要基于图像模板匹配方法^[13]，利用目标侦察和作战规划等战前保障手段获取目标区的测绘信息，利用坐标变换将目标转换为识别点处的前视图像信息，然后提取目标的边

缘结构或纹理特征等作为基准图特征,制作为目标模板数据并装订于弹载计算机,在攻击过程中通过对成像导引头获取的实时图像进行对应特征提取,并与预先装订的基准模板进行匹配识别,从而实现目标的识别定位。该方法计算效率高,但需要事先准备模板,对作战保障能力要求较高。随着 KCF 等基于相关滤波的匹配方法的发展,使得地面目标跟踪的跟踪精度与稳定性有了较大提升,且实时性较高,但复杂背景下的跟踪鲁棒性仍有较大的提升空间。当前,随着深度学习的发展,SiamFC 等基于深度学习的跟踪

算法利用神经网络来实现端对端的相关匹配跟踪,对于复杂地面背景环境、目标尺度剧烈变化等具有较高的鲁棒性,并具备一定的抗遮挡能力,但对硬件计算能力要求较高,且泛化能力有待提升。

近距离目标关键部位识别打击阶段,主要使用基于模型的目标识别实现对于关键部位的精确攻击^[6]。基于模型的目标识别是在统计模式识别的基础上引入模型假设,将分割提取到的目标区域与位置关系模型进行相似性度量,从而最终实现对关键部位的识别与跟踪。

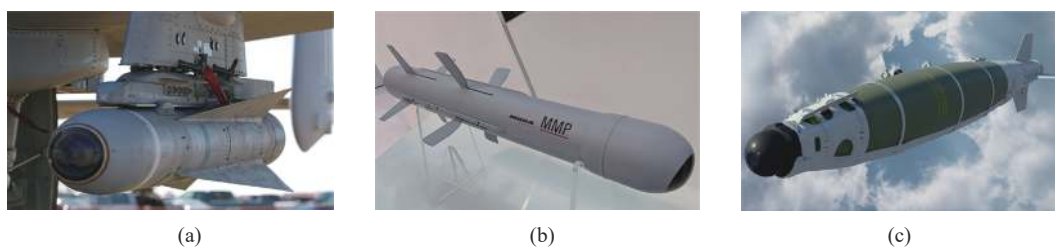


图 5 (a) 小牛空地导弹; (b) MMP 反坦克导弹; (c) JDAM 红外制导炸弹

Fig.5 (a) Maverick air-to-ground missile; (b) MMP anti-tank missile; (c) JDAM infrared guided bomb

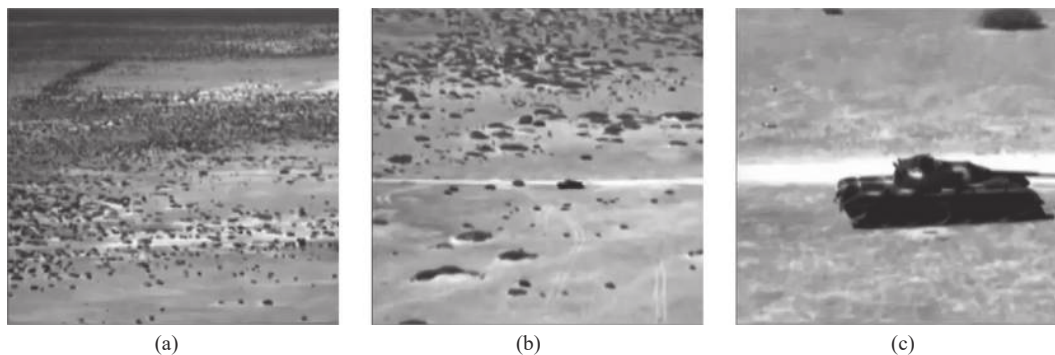


图 6 坦克目标不同阶段红外成像

Fig.6 Infrared imaging of tank target at different stages

1.3 对空成像末制导发展现状

国外典型对空目标作战武器主要包括空空、舰空、地空等不同发射形式的空空导弹、防空导弹等,如“AIM-9X”空空导弹、“标准”系列防空导弹等,中近距格斗弹多采用红外成像制导作为末制导方式,中远程空空、防空导弹多采用雷达制导方式。同时,为有效应对空中目标的威胁,各军事强国积极发展了红外双/多波段、红外/雷达等末制导体制的新型空空、防空导弹等精确制导武器,现役主流对空精确制导武器如表 4 所示。

空空导弹等对空目标作战武器在成像末制导阶段面临复杂的背景环境与强电磁对抗环境,其作战目标类型包括战斗机、轰炸机、导弹等高速、超高速运动目标。一般地,其成像末制导采用智能信息处理方式实现自主捕获、自动识别与跟踪,智能信息处理可根据攻击任务和目标特性大致划分为三个阶段:(1) 远距目标截获阶段,主要面临亮云、海亮带、鱼鳞光、海天线、沙漠、天地线等上视或下视复杂背景带来的目标检测问题;(2) 中近距离跟踪阶段,主要面临亮云、海亮带、鱼鳞光、红外点源/面源诱饵对抗等带来

表 4 对空精确制导武器相关性能

Tab.4 Performance related to precision guided weapons against air

Model	Nation	Guidance mode	Seeker structure	Imaging detector type	Detection capabilities	Tracking capabilities	Level of intelligence
AIM-9X air-to-air missile	USA	IR imaging guidance	Semi-strapdown	128×128 element medium wave gaze focal plane	Detection range: 10-12 km FOV: ±90°	Off-axis angle:±90° Angle tracking velocity: 1 600 (°)/s	Weak
IRIS-T air-to-air missile	GER	IR imaging guidance	Strapdown	128×4 element medium wave line scan	Detection range: 25 km FOV: ±90°	Off-axis angle:±90° Angle tracking velocity: 1 800 (°)/s	Weak
ASRAAM air-to-air missile	UK	IR imaging guidance	Strapdown	128×128 element medium wave gaze focal plane	Detection range: 25 km FOV: ±90°	Off-axis angle: ±90°	Weak
Python-5 air-to-air missile	ISR	IR dual-band composite guidance	-	320×240 element dual-band focal plane	Detection range: 20 km	Off-axis angle: ±100°	Weak
"SM-3" anti-missile interceptor	USA	IR dual-band composite guidance	-	512×512 element long-wave dual-band infrared focal plane	-	-	Weak
Stunner air-defense missile	ISR	Photoelectric/IR+ Millimeter wave radar dual-mode composite guidance	-	CCD/320×240 element dual-band focal plane	-	-	Weak

的多疑似目标识别、干扰严重遮挡、跟踪点漂移等抗遮挡、抗干扰跟踪问题; (3) 近距离目标关键部位识别打击阶段, 主要面临目标相对尺度急剧变化、诱饵对抗、目标充满探测器视场等带来的局部关键部位识

别、跟踪点选择等精确稳定跟踪问题。相应地, 据此分析, 传统典型成像末制导信息处理技术原理如图 7 所示。并在图 8、图 9 中分别展示了三种先进对空目标作战武器以及空中目标在不同阶段的红外成像。

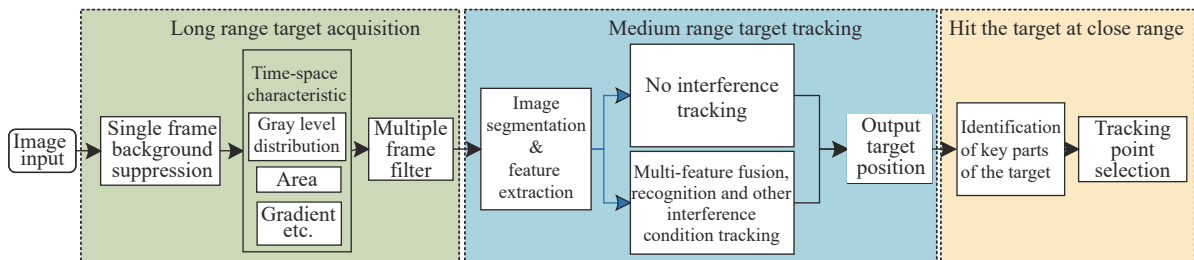


图 7 对空目标成像末制导智能信息处理原理框图

Fig.7 Block diagram of intelligent information processing for terminal guidance of imaging to air targets

空中目标与地面以及海面等目标打击任务相比, 天空背景与地面、海面等背景相比较为简单, 但作战目标具有更高的速度与机动性, 对成像末制导系统提出更高的实时性要求。

远距目标截获阶段, 一般采用 Top-Hat 形态学滤波等单帧背景抑制方法、自适应阈值分割方法提取疑似目标, 结合背景噪声、目标灰度分布、面积、梯度及其变化特性抑制背景噪声, 同时融合能量累积、管道滤波、动态规划等多帧滤波方法进一步降低虚警。

中近距离目标跟踪阶段, 现役成像制导空空导弹以

及防空反导拦截弹等, 其成像末制导多采用统计模式识别算法^[6]。此类算法在目标场景进行分割的基础上, 提取图像中每一目标区域的独立可鉴特征, 并采取一定的方式进行融合来获得一组最为有效的特征向量; 然后利用目标的先验特征, 通过空间区分和时间累积实现对空中目标的实时识别与跟踪。早期利用统计模式识别算法, 使用灰度均值、最高灰度、面积、长宽比等简单特征, 利用最小距离分类准则等简单的判定准则对空中目标进行识别跟踪, 算法鲁棒性较差, 智能识别水平比较弱。同时, 随着弹载计算机

处理能力的提升以及机器学习的发展,对空精确制导武器使用了信息熵、角二阶矩、傅里叶描述子等复杂特征,并使用 SVM、贝叶斯等传统机器学习方法作为分类器,实现对干扰条件下的空中目标进行识别,提升了目标识别性能以及智能化水平。当前,随着深度学习的发展,SSD^[14]、YOLO^[15]等目标检测算法为空中目标的识别跟踪提供了基于数据驱动的端到端的方法,经过初步验证可以获得更高的识别性能,同时具有更好的目标分类能力,使得智能目标识别水平获

得了较大提升,但面对日益复杂的空中战场环境,仍然有相当多的问题需要克服。

近距目标关键部位识别打击阶段,早期主要采用角点、质心、形心等几何关键点融合确定跟踪点,跟踪点不稳定且抖动较大。目前,随着基于深度学习的关键点检测算法的深入研究,利用深度学习方法可获得以目标局部部位的识别能力以及更精确的跟踪点,将大大提升精确制导武器的命中精度。



图 8 (a) AIM-9X 空空导弹; (b) Python-5 空空导弹; (c) “标准-3”反导拦截弹

Fig.8 (a) AIM-9X air-to-air missile; (b) Python-5 air-to-air missile; (c) "SM-3" anti-missile interceptor

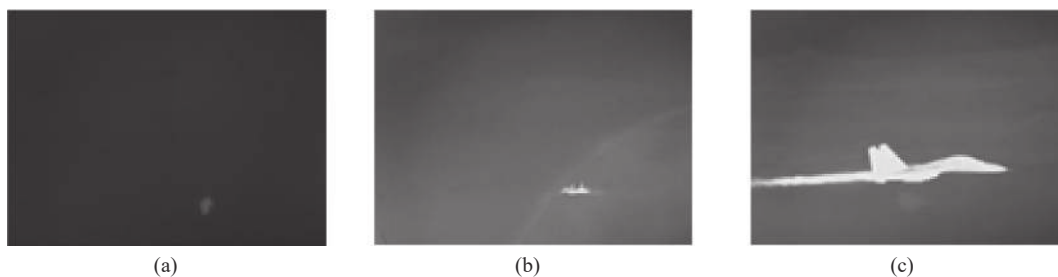


图 9 空中目标不同阶段红外成像

Fig.9 Infrared imaging of aerial targets at different stages

综上,国外各军事强国为应对不断出现的高性能目标、日益复杂的对抗环境,为确保精确制导武器的命中精度和作战效能,对于成像末制导的发展方向主要包括以下几个方面:

(1) 不断提高单模成像制导的战场环境适应性与抗干扰能力。通过不断提升电视 CCD、红外焦平面阵列等成像元件的空间分辨率、灵敏度等性能,为成像末制导系统提供更多的目标信息,使得精确制导武器可以更为有效地应对复杂背景及强干扰环境。

(2) 发展多模复合制导方式,获取更多维度的信息。一方面,发展双色/多模复合成像制导,在弥补单模成像制导不足的同时,发挥不同成像元件在不同波段和光谱,对不同背景、目标和干扰的选择性探测和抑制的优势,在能量信息、空间信息的基础上引入光

谱信息,提升识别探测能力;另一方面,发展成像/雷达复合制导,充分发挥成像制导与雷达制导的优点,弥合二者的缺陷,提升精确制导武器的全天候全天时适应能力以及复杂战场抗干扰性能。

(3) 积极将人工智能技术引入成像末制导,提升巨量战场信息的处理与应对能力。随着人工智能的发展,将目标检测、航迹规划等深度学习算法应用到成像末制导中,充分利用海量的战场信息,发挥自主学习与自主推理能力,打破现有的人工设计准则与已知规律的统计处理模式,使得精确制导武器的作战效能获得大幅提升。

2 光电成像末制导智能化技术研究现状

近年来,随着人工智能技术的发展与应用,已经

在很大程度上改变了原有的运作模式,甚至带来了颠覆性效应。以美国为首的各军事强国在新一代武器装备中积极引入人工智能技术,并且随着基于人工智能的成像末制导技术研究成果的涌现,使得精确制导武器智能化程度越来越高。

2.1 美国成像末制导技术智能化发展现状

美国新一代反舰导弹 AGM-158C(LRASM) 末端制导采用多模复合制导(红外成像+被动雷达)。LRASM 突破了多传感器信息探测与融合、弹载高性能信息处理、自动目标识别等技术,具有多融合制导、自主航线规划与危险规避、末端自主目标筛选与识别和关键部位打击等智能化特征。凭借自身的多维信息探测、融合以及处理技术,使得 LRASM 一方面可以进行远距离舰船目标的自主识别与捕获,并能够通过人工智能技术在众多舰艇中剔除虚假目标;另一方面,使其能够在无任何中继制导信息的支持下,进行完全自主导航和攻击。面对电子对抗日益激烈的战场环境,

LRASM 利用被动雷达进行电子频谱的检测定位,能够在岛岸背景下确定威胁位置与区域,并根据威胁程度和目标编队状态,自主进行航迹规划,实现高效突防;在距离目标较近时,依靠宽视场、全天候的凝视红外成像导引头,通过实时红外图片与预存基准图片进行相关匹配,识别出目标的关键部位进行打击。

如图 10(a) 所示,美国雷声公司研制的 SDB-II 小直径炸弹(GBU-53) 采用了世界上首款三模导引头,具备恶劣自然环境下全天时、全天候攻击地面目标的能力。SDB-II 的三模导引头包括半主动激光传感器、非制冷红外成像传感器和毫米波雷达。该三模导引头结合了激光制导的高命中精度、红外成像的高目标识别率、毫米波雷达的高穿透性等优点,为弹药智能化提供了优异的传感器,并结合智能信息处理技术,使得 SDB-II 可以在复杂地物背景下对坦克、装甲车辆等目标进行快速自主分类、识别和跟踪,进而实现全天时全天候条件下对地面固定或移动目标的打击。

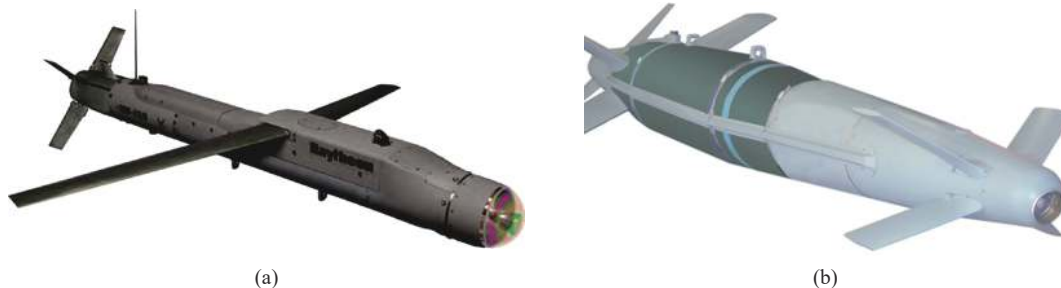


图 10 (a) SDB-II 小直径炸弹; (b) SPICE-250 制导炸弹

Fig.10 (a) SDB-II small diameter bomb; (b) SPICE-250 guided bomb

2.2 以色列成像末制导技术智能化发展现状

以色列拉斐尔先进防务系统公司研制的“海上破坏者”第五代导弹武器系统具备人工智能、场景匹配、自动目标识别等独特功能。“海上破坏者”配备有先进红外成像导引头,能够通过弹载计算机利用深度学习,实现场景匹配,使其可以在卫星导航拒止区域正常执行打击任务;并通过基于人工智能的自动目标识别技术,从攻击航线上出现的众多相似目标中准确识别真实目标,并对目标关键部位实现精确打击。此外,该导弹配备有先进的数据链,支持“人在回路”的实时决策和任务规划,具有多向、同步攻击能力。

如图 10(b) 所示,以色列拉斐尔公司研制的 SPICE-250 制导炸弹采用电视/红外双模成像末制导,利用光

电场景匹配技术、目标自动识别技术(ATA) 以及深度学习等技术,实现对地面固定和移动目标的精确打击。SPICE-250 将获取的地形数据与实时光电图像相结合,利用光电场景匹配技术,在 GPS 拒止环境下实现自主导航;SPICE-250 利用人工智能和深度学习技术,能够在复杂地面背景中自动识别出地面机动目标,实现对其的精确打击^[5]。

2.3 其他国家成像末制导技术智能化发展现状

挪威康斯伯格海事公司研制的 NSM 反舰导弹^[16] 可以通过 NSM 武器系统任务规划软件,基于战场态势/场景数据和人员的战术要求自动生成任务规划方案,并可存储 200 个航路点的自行数据,相较于捕鲸叉 Block II 的八个航路点有了质的飞跃^[17]。NSM 采

用先进双波段 (3~5 μm 和 8~12 μm) 宽视场智能型红外成像 (I³R) 导引头, 该导引头能够获取远距离目标的高解析度双频红外图像, 并通过基于模板数据库的自动目标识别 (ATR) 技术, 能够实现复杂背景下的预定目标的分选和跟踪, 并能够按照发射前选定的瞄准点打击目标的关键部位。该导引头还内置有诱饵参数识别技术, 能够从机理上提升对抗舰载红外电源干扰、箔条干扰等性能。

目前, 国内外还未出现过真正意义上的完全智能化的精确制导武器。LRASM 反舰导弹、“海上破坏者”导弹系统等新一代精确制导武器, 通过应用传统

机器学习、深度学习、强化学习等人工智能技术, 在自动目标识别、航迹规划等方面呈现出一定的智能化特征。

(1) 基于传统机器学习实现的智能化功能

传统机器学习利用一些训练样本来进行学习, 用于获取无法通过原理分析获得的规律, 实现对未来数据行为或趋势的准确预测。传统机器学习主要包括支持向量机 (SVM)、贝叶斯方法、决策树等, 有效平衡了学习结果的有效性以及模型的可解释性, 为有限样本下的自动目标识别提供了有效的方法。图 11 中给出了基于传统机器学习的目标识别算法的基本流程。

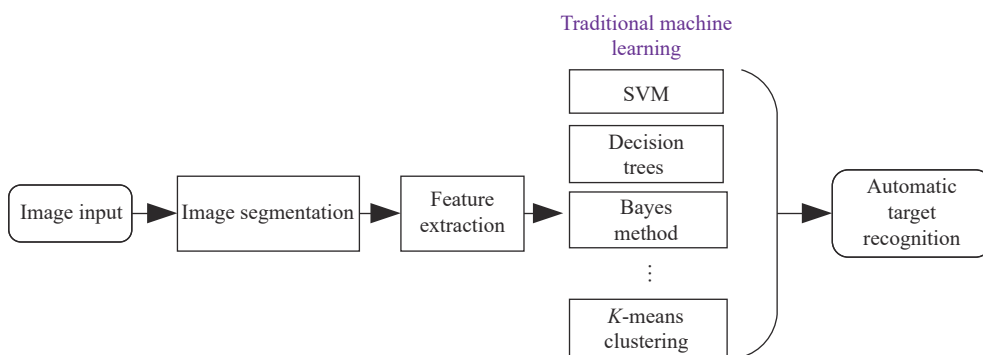


图 11 基于传统机器学习的自动目标识别算法

Fig.11 Automatic target recognition based on traditional deep learning

(2) 基于深度学习实现的智能化功能

深度学习技术是实现精确制导武器智能化的重要途径之一。它的本质就是模拟人脑的结构以及作

用机理, 通过大量数据训练, 利用端到端的方法来完成高度抽象特征的人工智能任务。如图 12 所示, 深度学习神经网络主要包含卷积神经网络 (CNN)、递

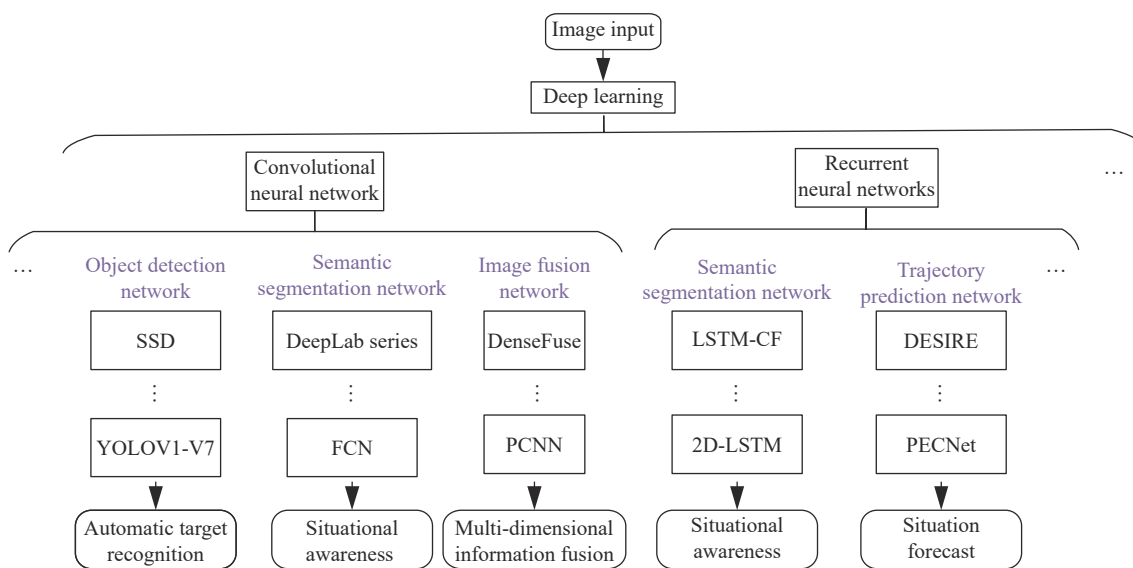


图 12 基于深度学习的智能化功能实现

Fig.12 Intelligent feature implementation based on deep learning

归神经网络 (RNN) 等, 尤其是基于卷积神经网络的相关图像算法的发展, 为成像末制导的智能化提供了强有力的工具: 深度学习图像融合方法为多波段/多光谱、多模导引头提供像素级、特征级以及决策级的信息融合方法; 深度学习目标检测算法为自动目标识别 (ATR) 提供基于数据驱动的目标识别方法; 深度学习语义分割为战场态势感知与理解提供了有效途径; 深度学习关键点检测帮助实现目标的关键部位打击。

(3) 基于强化学习实现的智能化功能

强化学习是实现人工智能的关键步骤。如图 13 所示, 强化学习的基本思想是智能体 (Agent) 在环境的不断交互中, 根据环境反馈得到的奖励, 不断调整自己的策略, 实现从环境获取奖励的最大化^[18]。因此, 强化学习非常适合用来解决设计决策优化以及空间搜索的问题, 为精确制导武器实现自主导航、航迹规划、危险规避提供最优决策。

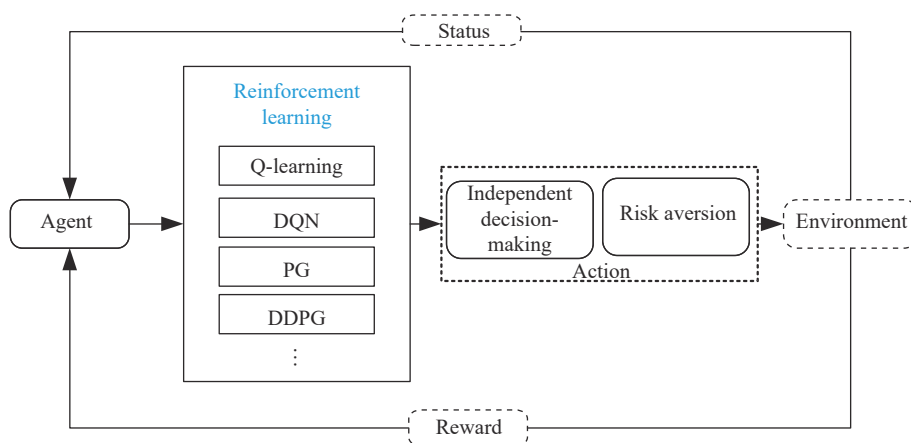


图 13 基于强化学习的智能化功能实现

Fig.13 Realization of intelligent features based on reinforcement learning

3 未来复杂战场环境作战需求分析

随着新军事技术的不断变革和作战理念的不断推陈出新, 精确制导武器所面临的作战目标、环境、任务发生了巨大变化: 高速、高机动、多频谱隐身的高性能目标不断涌现; 有源干扰、无源干扰等先进干扰手段大量使用, 电磁环境日趋复杂; 先进反导防御系统、有人机-无人机联合作战等的应用, 使得精确制导武器的作战环境日趋复杂严苛。这就对精确制导

武器的精准探测、精确打击、可靠突防等提出了较高要求, 主要表现在以下几个方面。

3.1 目标生存能力大幅提升

随着隐身、伪装^[19]等军事技术的发展, 军事目标的生存性大幅提高, 同时对精确制导武器的成像末制导提出了更高要求。如图 14 所示, 新一代战机 F-22 利用外形隐身技术大幅减少红外辐射, 并配备有先进的推力矢量控制发动机, 对空空导弹的目标截获与快速稳定跟踪提出了更高要求。德国 MEKO 型护卫

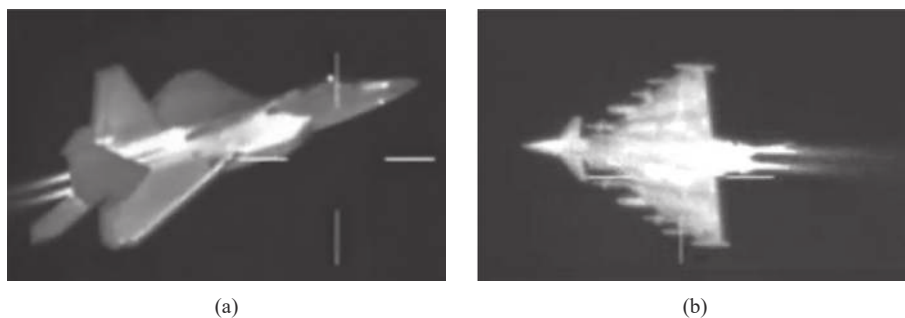


图 14 (a) F-22 红外特征; (b) EF-2000 红外特征

Fig.14 (a) Infrared signature of F-22; (b) Infrared signature of EF-2000

舰舰体使用了大量复合材料,并通过冷却废气、屏蔽散热装置等措施,达到了较好的红外隐身性能,这就为反舰导弹红外末制导的目标探测与识别带来了更大的挑战。迷彩技术、遮蔽技术的使用,使得地面目标在光电探测方面呈现出低可探测性,而利用示假技术仿造的假目标,与真实目标具有相同的光电特性,对空地导弹、反坦克导弹等的成像探测与目标识别提出了严峻挑战。

3.2 任务环境日趋复杂多变

在传统作战任务中,反舰导弹的主要目标是海面舰船目标,巡航导弹主要用来对地面固定目标等进行精确打击,空空导弹的主要任务是打击空中高速飞行器目标,各类精确制导武器都有其专职的任务目标和作战环境。而未来复杂多变的实战环境则对精确制导武器的通用性提出了更高的要求。例如,反舰导弹将由传统的反舰任务扩展为对近岸地面目标等的精确打击;巡航导弹由单一的对地目标打击,扩展到对水面舰船目标的精确打击;空空导弹将由传统的对飞机目标打击拓展为对巡航导弹、面空导弹等的拦截。这就使得原有的专一化的精确制导武器面临着更为复杂的多域作战目标与战场环境,对精确制导武器成像末制导的目标截获和抗背景干扰提出了更高的要求。

3.3 对抗环境愈加剧烈

如图 15 所示,随着各类对抗技术的应用于发展,随着各类对抗技术的发展,使得精确制导武器成像末制导的对抗日趋激烈,主要表现在:

(1) 光电告警技术与设备的广泛使用。F-35 配备了量身定制的分布式孔径感知系统 (EO DAS), 利用

“智能化威胁数据库识别系统”,通过深度学习自主分析海量的态势感知数据,自主判断识别目标类型,辅助预测分析或预警,大幅提升了目标全向感知能力与防御对抗能力。苏-35 配备了先进战斗机光电传感器综合系统及机载“决斗系统”人工智能辅助作战系统,大幅增强了导弹全向告警能力,将飞机上雷达、IRST、导航系统等获得的数据进行综合分析和处理,计算出最佳的飞行和作战方案,提交给飞行员决策,更是大幅强化了干扰自主对抗效能。

(2) 各类无源、有源干扰设备广泛使用。常用的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向多方向投放来提高干扰效果;面源型红外诱饵、烟幕装置等可为飞机、舰船、装甲车辆等目标提供视场遮蔽;伴飞诱饵或拖曳式诱饵可模拟飞机的运动轨迹;新型诱饵在多光谱特性、能量特性、形状特性和运动特性上更加逼近目标,对抗过程中,对目标形成大面积、长时间的遮蔽,分离后又形成目标与诱饵的混淆;新型的多光谱烟幕装置可以为舰船、坦克等提供可见光和多波段红外遮蔽;上述“软”杀伤手段对精确制导武器的自动目标识别技术提出了严峻考验。

(3) 激光定向能干扰装置、近程武器防御系统等“硬”杀伤武器的大量应用。激光定向能干扰装置能够在探测到来袭导弹时向导弹发出高能量激光,使成像导引头致盲或致眩,从而破坏精确制导武器对目标的稳定跟踪造成脱靶;近程武器防御系统能够对来袭导弹等直接实施硬杀伤,给精确制导武器的突防能力带来了更高的挑战。



图 15 (a) F-35 的 EO DAS 实时探测结果; (b) 坦克烟幕投放; (c) SYLENA 诱饵发射装置

Fig.15 (a) Real-time detection of EO DAS of the F-35; (b) Tank smoke drops; (c) SYLENA decoy launching device

3.4 新型作战概念和作战样式不断涌现

2015 年,美国 DARPA 发起的“体系集成技术与试验”(SoSITE: System of System Integration and Exper-

imentation) 项目提出了分布式空战概念,说明未来空战随着信息系统、主战平台和空战兵器不断发展,将以分布式为最主要的特点,其核心思想是不再由当

前的高价值多用途平台独立完成作战任务,而是将能力分散部署到多个平台上,这一体系将由少量的有人平台和大量的无人平台构成。基于此,也要求新一代导弹具备超强的全向攻击、射后截获、精确打击和协同攻击能力。因此,射后自主截获时,极有可能导致导引头视场内多目标态势出现,如何自主截获并自动攻击其中的高价值、高威胁等级目标成为一项重要挑战。并且,分布式网络化对导弹的多目标识别与任务分配、协同攻击提出了严峻的挑战,从而对导弹从单体智能向群体智能发展提出了新的需求。

4 光电成像末制导智能化关键技术能力分析

面对未来“环境高复杂、博弈强对抗、响应高实时、信息不完整、边界不确定”的战争挑战,成像末制导技术的智能化能力特征需求如下:

(1) 分布式/异构自主协同探测能力

精确制导打击群(多个/多种精确打击武器组成)的每个成员作为探测感知节点对目标进行协同探测,根据不同探测体制传感器在不同任务环境下的效用,自主进行各探测节点在目标打击过程中的任务分配、调度优化以及组合使用,在极大拓展目标探测时空感知范围的同时,提高探测感知的可靠性。

(2) 多维度信息智能融合处理能力

对不同探测体制传感器、不同平台传感器等获取的多维度、多层次信息进行自主数据配准、数据关联和数据融合,并对目标信息进行甄别和强化,为成像末制导提供高品质的有用信息,增强成像末制导系统的容错能力与环境适应性^[20]。

(3) 战场环境感知与态势理解能力

在通过协同探测以及优异的信息融合处理能力获取目标以及环境的多维度融合信息的同时,能够依据该信息,在复杂多变的战场环境中准确、快速、全面地了解当前的战场态势和变化趋势,为自主决策等提供战场环境信息支持。

(4) 探测制导一体化与自主决策能力

在对战场态势感知与态势理解的基础上,能够按照现有态势,以实现打击效能最大化为目的,自主决策打击群中每个成员的作战方案,并能够根据实时探测信息,实时调整方案细节,确保在有效规避威胁的

同时,顺利完成打击任务。

(5) 自学习自进化自推理能力

精确制导武器在战场中,时时刻刻获取海量信息,在对信息进行融合、理解的同时,能够基于战场信息,自主对战场态势、决策结果等进行推理;并可以依赖自主决策、自主行动以及战场的实时反馈进行自主学习,在不断地学习实践中实现自我进化。

(6) 协同识别与协同抗干扰能力

依靠协同探测能力,通过将不同装备自行组网,使得各节点在获取多维信息的同时,在某些节点因“软”、“硬”杀伤干扰导致探测性能下降甚至失效时,可通过其他节点获取探测信息,保证打击任务的继续执行。

依靠战场环境感知与态势理解能力,实时动态调整协同网络的拓扑结构,使得各节点之间保持最佳的探测、通信与抗干扰性能。在某些节点遭受多种干扰对抗甚至丢失时,能够凭借自主决策能力,重新对网络进行划分,形成多个独立网络,使得集群可以在有效应对多维度多方向干扰的同时,具备多任务并行处理能力。

综上所述,精确制导武器走向智能化、成像末制导智能化均是技术发展的必然,综合精确制导武器未来作战环境、人工智能未来发展趋势、人脑认知与思维特点,围绕精确制导武器的应用,提出将成像末制导的智能化划分为三个阶段:功能级智能技术、系统级单体智能技术、体系级群体智能技术。

(1) 功能级智能技术

以弹载应用为出发点,以成像末制导过程为突破点,立足智能化技术在自动目标识别、自主导航、多模态信息融合等方向的研究,提升精确制导武器在战场感知、目标识别、自主导航、干扰对抗与自主突防以及自主决策方面的智能化水平。针对当前的多波段、多模复合导引头,推进多模态及多波段智能探测与融合技术、探测与制导一体化信息处理技术、深度神经网络轻量化技术等工程化应用。开展基于场景与态势感知的自适应智能复合/融合技术,智能网络重构与信息处理架构动态重组、智能目标识别、云端人工智能等技术的研究,使得成像末制导具备人类视觉的部分认知功能,达到功能级智能化水平,为实现系统级单体智能技术奠定良好的基础。

(2) 系统级单体智能技术

精确制导武器作为作战体系中独立自主的一员,对于作战支撑体系不再仅仅是依属关系,而是能够自主发现目标、识别目标、攻击目标。成像末制导具备个体对某单一/多个目标的探知、感知、认知处理的视觉脑启发信息处理流程与特征,完全具备人类视觉的全部认知功能。开展关键特征、关键思维模式等的自学习网络、自进化网络、自迁移网络、自推理网络技术,记忆与经验模式网络技术,个体视觉与运动关联网络技术,专用类脑信息处理架构与处理器等技术研究。

(3) 体系级群体智能技术

精确制导武器发展到最后,能够明白作战意图,并为实现作战目的,能够在作战集群中自主完成各作战成员的任务分配与合作,完全具备人类的社会化分工能力。成像末制导具备群体对某单一/多个目标的探知、感知、认知处理的视觉脑启发信息处理流程与特征,主要是开展群体关键特征、群体关键思维模式等的协同自学习网络、自进化网络、自迁移网络、自推理网络技术,群体记忆与经验模式网络技术,群体视觉与运动关联网络技术,专用类脑协同信息处理架构与处理器等技术研究。

5 结 论

文中分析总结了国外对海、对地、对空目标作战成像精确制导武器的末制导技术发展现状、面临的关键难点与智能信息处理技术原理、智能化水平,以及当前国外成像末制导智能化技术发展现状与趋势。分析了未来高性能目标、复杂对抗环境、多任务需求以及新的作战模式对成像末制导技术智能化带来的挑战。参考人工智能技术与人脑智能的对应关系,提出了实现成像末制导智能化的六个能力特征需求以及三个发展阶段。通过国外成像末制导智能化技术的发展分析,为我国光电成像末制导武器智能化技术发展提供借鉴。

参考文献:

[1] 朱爱平, 蒋琪, 杨磊, 等. 从利比亚战争看精确制导武器在不对称战争中的应用[J]. *飞航导弹*, 2011(4): 1-5.
 [2] 海鹰资讯. 【热点聚焦】俄乌冲突中俄精确打击武器运用研究 [EB/OL]. [2022-11-10]. [https://mp.weixin.qq.com/s/LEX6Ab-](https://mp.weixin.qq.com/s/LEX6Ab-6r5CidXhWoEYW5vw)

6r5CidXhWoEYW5vw.
 [3] Chen Xianzhi, Ren Gang, Luo Zhenbao, et al. Research on application technology of advanced photoelectric seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210531. (in Chinese)
 [4] 杨宁, 吴艳梅. 智能化的新型反舰导弹LRASM综述[J]. *军事文摘*, 2020(23): 39-43.
 [5] 兰顺正. 第三条道路产物: SPICE精确制导炸弹[J]. *太空探索*, 2022(4): 68-71.
 [6] Chen Xianzhi, Luo Zhenbao, Li Yiqiang, et al. Application of automatic target recognition in image terminal guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20220391. (in Chinese)
 [7] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 37(3): 583-596.
 [8] Danelljan M, Häger G, Khan F S, et al. Discriminative scale space tracking [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 39(8): 1561-1575.
 [9] Danelljan M, Bhat G, Shahbaz Khan F, et al. Eco: Efficient convolution operators for tracking [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 6638-6646.
 [10] Bertinetto L, Valmadre J, Henriques J F, et al. Fully-convolutional siamese networks for object tracking [C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision, 2016: 850-865.
 [11] Li B, Yan J, Wu W, et al. High performance visual tracking with siamese region proposal network [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 8971-8980.
 [12] Danelljan M, Bhat G, Khan F S, et al. Atom: Accurate tracking by overlap maximization [C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 4660-4669.
 [13] Liu Yunfeng, Yang Xiaogang, Qi Naixin, et al. Forward-looking ATR model based on template matching [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2016, 35(7): 4-6. (in Chinese)
 [14] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. Ssd: Single shot multibox detector [C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision, 2016: 21-37.
 [15] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection [C]//Proceedings of the IEEE

- Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 779-788.
- [16] 彭绍荣, 许江湖, 胡生亮, 等. NSM反舰导弹反导对抗方法探析[J]. *飞航导弹*, 2021(11): 58-63.
- [17] 侯学隆, 王宗杰, 谢宇鹏. NSM反舰导弹技术性能与作战能力研究[J]. *飞航导弹*, 2020(5): 26-33.
- [18] Ma Chengqian, Xie Wei, Sun Weijie. Research on reinforcement learning technology: A Review [J]. *Command Control & Simulation*, 2018, 40(6): 68-72. (in Chinese)
- [19] Zheng Wanli, Yang Ping, Yan Shaoqiang, et al. Analysis on the research status and development trend of military camouflage technology [J]. *Modern Defence Technology*, 2022, 50(1): 81-86. (in Chinese)
- [20] Pan Quan, Wang Zengfu, Liang Yan, et al. Basic methods and progress of information fusion (II) [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1233-1244. (in Chinese)

Research and prospect of intelligent technology of optoelectronic imaging terminal guidance

Yu Junting¹, Li Shaoyi^{2*}, Zhang Ping³, Luo Zhenyu¹

(1. 93184 PLA Troops, Beijing 100076, China;

2. School of Astronautics, Northwest University of Technology, Xi'an 710072, China;

3. 93129 PLA Troops, Beijing 100036, China)

Abstract:

Significance In recent years, various military powers are actively applying AI technology to precision-guided weapons, and have made certain technological breakthroughs, such as the development of LRASM anti-ship missiles, "maritime destroyers", "SPICE-250" precision-guided bombs and other intelligent weapons and equipment to improve the operational effectiveness of complex battlefield environments. In the process of realizing the intelligence of precision-guided weapons, the significant improvement of the performance of imaging terminal guidance technologies such as autonomous perception of complex battlefield environment, automatic target acquisition (ATA), automatic target recognition (ATR), adaptive guidance and so on depends on the deep fusion application of artificial intelligence technology. Therefore, the research on the intelligent technology of imaging terminal guidance and its future development direction has important reference significance for following the development trend of guidance mode and realizing the revolutionary improvement of weapon operational performance.

Progress Firstly, the development status of typical photoelectric imaging terminal guidance equipment for sea-to-sea, ground-to-ground and air-to-air, the different complex interference environments and target characteristics faced by the terminal guidance process are analyzed. The typical terminal guidance intelligent information processing principles such as small target detection in the long-range target interception stage, identification, tracking and anti-interference in the medium-close target tracking stage, and identification of key parts at the end of the close range in three scenarios are analyzed.

Secondly, the development status and intelligent equipment achievements of intelligent technology of terminal-guided weapons in the United States, Israel, Norway and other foreign countries are summarized, and the intelligent technology principles in automatic target recognition, track planning and other aspects are analyzed, as well as the combat requirements of intelligent weapons in the future complex combat mode, including the significant improvement of target survivability, the increasingly complex and changeable task environment, and the increasingly fierce confrontation environment.

Finally, this paper proposes several key technologies for the intelligent requirements of future electro-optical imaging terminal guidance weapons: distributed/heterogeneous autonomous collaborative detection capabilities, multi-dimensional information intelligent fusion processing capabilities, battlefield environment awareness and situation understanding capabilities, detection and guidance integration and autonomous decision-making capabilities, self-learning self-evolution self-reasoning capabilities, collaborative identification and collaborative anti-interference capabilities. At the same time, it is proposed to divide the intelligence of imaging terminal guidance into three stages: functional intelligent technology, system-level single intelligent technology, and system-level group intelligent technology.

Conclusion and Prospects This paper analyzes the challenges brought by future high-performance targets, complex confrontation environments, multi-task requirements, and new combat modes to the intelligence of imaging terminal guidance technology. Starting from artificial intelligence technology and future combat requirements, six capability feature requirements and three development stages for realizing intelligent imaging terminal guidance are proposed. Through the development analysis of foreign imaging terminal guidance intelligent technology, it provides reference for the development of intelligent technology of photoelectric imaging terminal guidance weapons in China.

Key words: precision-guided weapon; imaging terminal guidance; artificial intelligence; complex environments; ability characteristics

Funding projects: General Program, National Natural Science Foundation of China (62273279)