

无人旋翼机载激光武器反蜂群作战概念研究

周水亮 金新 李远青 曾元松

Research on concept of anti-swarm combat of unmanned rotorcraft airborne laser weapon

ZHOU Shuiliang, JIN Xin, LI Yuanqing, ZENG Yuansong

引用本文:

周水亮, 金新, 李远青, 等. 无人旋翼机载激光武器反蜂群作战概念研究[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 495–506. DOI: 10.5768/JAO202445.0310002

ZHOU Shuiliang, JIN Xin, LI Yuanqing, et al. Research on concept of anti-swarm combat of unmanned rotorcraft airborne laser weapon[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 495–506. DOI: 10.5768/JAO202445.0310002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高能激光武器目标打击的多物理场系统仿真

Multiple physical fields system simulation for high energy laser weapon target attacking

应用光学. 2017, 38(4): 526–532 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401002>

高能高功率激光参数测量技术研究

Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser

应用光学. 2020, 41(4): 645–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409001>

无人机光电对抗技术研究

Research on UAV photoelectric countermeasure technology

应用光学. 2021, 42(3): 377–382 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301001>

一种反激光窃听预警系统的窃听源定位研究

Research on eavesdropping source localization of anti-laser eavesdropping early warning system

应用光学. 2018, 39(3): 429–435 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0307001>

高能激光远场辐照度分布测量技术及其进展

High energy laser far-field irradiance distribution measurement technology and its developments

应用光学. 2020, 41(4): 675–680 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409004>

光学图像伪装效果评估研究现状及关键问题

Research status and key issues of optical image camouflage effectiveness evaluation

应用光学. 2019, 40(6): 1050–1058 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0602002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0495-12

无人旋翼机载激光武器反蜂群作战概念研究

周水亮, 金 新, 李远青, 曾元松

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘 要: 鉴于传统防空手段难以有效应对无人机蜂群的问题, 提出了搭载高能激光器的旋翼飞行平台反蜂群概念。首先, 通过研究了解典型蜂群的作战特点, 分析了无人机蜂群可能的运用模式; 其次, 通过分析现有防空拦截系统的特性, 引出旋翼飞行平台搭载高能激光武器用于打击蜂群的运用方法; 最后, 分析研究了旋翼机载高能激光武器的可能运用场景、杀伤模式和打击流程。旋翼飞行平台搭载高能激光武器的光速攻击、点面杀伤、全天候打击等特点极其适用于蜂群来袭的运用场景, 能够更高效拦截来袭蜂群, 可靠保证重要设施的安全。

关键词: 高能激光; 反蜂群; 防空; 决策规划; 评估

中图分类号: TN248; V19; TJ85

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0310002

Research on concept of anti-swarm combat of unmanned rotorcraft airborne laser weapon

ZHOU Shuiliang, JIN Xin, LI Yuanqing, ZENG Yuansong

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: In view of the difficulty of traditional air defense means to effectively deal with the problem of unmanned aerial vehicle (UAV) swarm, the concept of anti-swarm of rotorcraft flight platform equipped with high-energy laser was proposed. Firstly, through the study of the combat characteristics of typical swarms, the possible application modes of UAV swarms were analyzed. Secondly, by analyzing the characteristics of the existing air defense interception system, the application method of the rotorcraft flight platform equipped with high-energy laser weapons to combat the swarm was introduced. Finally, the possible application scenarios, killing modes and strike processes of rotorcraft airborne high-energy laser weapons were analyzed and studied. The characteristics of the light speed attack, point and surface killing, and all-weather strike of the high-energy laser weapon equipped on the rotorcraft flight platform were extremely suitable for the application scenarios of the swarm attack, which could more efficiently intercept the incoming swarm and reliably ensure the safety of important facilities.

Key words: high power laser; anti-swarm; air defense; decision planning; evaluation

引言

无人机蜂群是以仿生学为基础, 同时投入大量携带相同或不同任务载荷的小规模搭载平台, 基于战场数据链、无线电和中继网络等多种方式进行通信交互及群组协同, 发挥蜂群协同打击的集群优势, 凭借强大的信息优势、决策优势和行动优势, 全面提升态势感知、突防打击、干扰压制、毁

伤评估等攻防能力^[1-10], 实现对指定区域的可靠投送和对目标的有效毁伤。

考虑到无人机快速的机动能力、良好的隐身性能以及饱和式攻击的毁伤范围^[11], 一旦面对无人机蜂群的一体化多域空袭威胁时, 传统防空拦截装备受到自身设计性能限制, 难以应对众多数量的来袭目标, 也不能及早发现目标, 使得有效拦截

收稿日期: 2024-02-22; 修回日期: 2024-04-13

作者简介: 周水亮 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事光电技术研究。E-mail: zhoushuiiangPaper@126.com

时间急剧减少,来袭目标拦截概率极大降低。因此,如何有效拦截来袭蜂群目标,就成为当前世界各国研究的热点问题。

1 蜂群应用研究

1.1 蜂群运用特点

目前对外公开的典型无人机蜂群研究主要有美国的“灰山鹑”项目、“郊狼”项目、“小精灵”项目、“小猫”项目等^[12-13],其中部分通过试验进行验证,若干重要项目即将或已经进入实地试验测试阶段,其项目系统图如图 1~图 3 所示。这类蜂群多是由中小微型无人机组成^[14],批量制造单机成本极低^[15],大约在几百美元到几十万美元不等;体积较小^[16],雷达反射面积小,光电红外特征弱,可探测性低,便于隐蔽打击和突防使用;重量较轻,载重有限,功能相对单一^[17],易于大规模投放;具备一定的自主协同能力,能够自适应修正、编队、机动、组网以及规划决策打击等^[18];能够根据任务类型灵活搭载多种探测感知设备和打击装备,可用于执行自主监控、情报侦察、态势感知、侦察搜索、通信保障、电子攻防、火力突击等多类型任务需求^[19-24]。



(a) DARPA“小精灵”无人机



(b) “小精灵”无人机回收实验

图 1 DARPA“小精灵”无人机蜂群系统图

Fig. 1 Images of DARPA Gremlins UAV swarm system



(a) DARPA“灰山鹑”无人机



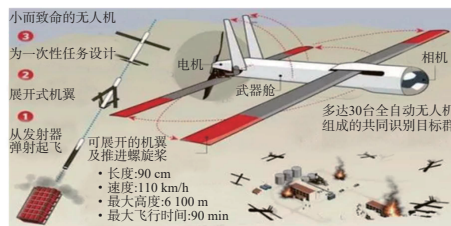
(b) 103架“灰山鹑”编队飞行

图 2 Perdix“灰山鹑”无人机蜂群系统图

Fig. 2 Images of Perdix mini UAV swarm system



(a)“郊狼”无人机



(b)“郊狼”无人机工作模式

图 3 “LOCUST”项目“郊狼”无人机蜂群系统图

Fig. 3 Images of LOCUST Coyote UAV swarm system

1.2 蜂群运用样式

单一型号同构无人机组成蜂群^[25],蜂群成体系化生存,不依赖单机个体存在,不依赖个别节点运行。因此在打击过程中,小部分无人机被摧毁或功能丧失,蜂群整体功能相对减弱,但仍可保持相对完备;而当蜂群被摧毁数量达到一定时,其整体功能才可能遭到大幅度削弱。

混合型号异构无人机搭配组成蜂群^[26-27],借助种类和数量优势,能够灵活组合成具有多种载荷、多种能力于一体的分布式蜂群,可以实现且不局限于预警探测、广域监视、目标识别/定位/跟踪、前沿侦察、情报收集、通讯组网、电子对抗、电磁干扰、精准袭杀、定点打击、饱和攻击、毁伤评估、伪装诱骗、掩护突防、主动防御、网络战等众多战术应用。

1.3 激光作用机理

高能激光武器在锁定来袭蜂群目标后,能够实施光速打击,达到摧毁目标的目的。激光武器对无人机蜂群目标的毁伤机理主要通过向目标发射出高能激光束,激光束与目标机体发生复杂的物

理和化学反应,进而使得目标的材料性质变化和结构发生变形等表征,具体如氧化、膨胀、升温、汽化、击穿等现象,对目标产生极大杀伤作用,其具体毁伤作用主要包括热毁伤效应、力学毁伤效应、辐射毁伤效应。

热毁伤效应主要分为加热、熔化、汽化等3个过程:在加热过程中,飞机目标在受到高能激光辐照时机体材料被加热,目标材料受到高温影响,各强度数值降低,材料产生不均匀应力;在熔化过程中,当机身材料持续受到激光的高能辐照,局部材料会因高温达到熔化阈值而发生熔化,进而导致机身结构的破坏;在汽化过程中,机身材料在高能激光进一步照射下,当能量超过材料的汽化阈值,会使材料汽化产生烧蚀现象。

力学毁伤效应是指当机身材料遭受激光的热效应影响时,其张强度属性会发生改变,且在目标高速飞行状态下会受到动力载荷影响。这两个因素相结合会导致材料承受的力分布变得不均匀,并最终会引起机体受力结构的破坏。通过激光热效应和动力载荷联合产生的力学毁伤效应,有效地对来袭的机群造成毁伤。

辐射毁伤效应是指高能激光照射目标时,引起的材料表面高温汽化,进而电离形成等离子体云,伴随产生的紫外线和X射线等高能辐射,对目标造成包括致盲、曝光、质变、电解、光解在内的多重损伤,最终导致目标材料的脱落或结构破损,实现对目标的有效毁伤。

2 反蜂群技术

2.1 基于平台

按照平台不同,微波装备可以搭载在陆基、海基、空基和天基各类不同的平台上^[28-29],如空间飞

行器、无人机、旋翼机、舰船、坦克及其他运输工具。

陆基平台一般有两种搭载方式,车载式和固定塔台式。车载式即是将防空装置搭载在车辆上,同时配备雷达、光电、红外探测系统、敌我识别器、通信电台等设备,构成车载防空系统;固定塔台式是将防空装置固定在塔台等之类基座上,一般部署在关键位置用以保护关键设施或目标。陆基平台受限于地理、天气、地球曲率等影响,只能进行区域范围内的定点拦截和被动防御,不具备实时动态的快速打击能力。

海基平台类似于陆基车载式,不过将防空装备搭载在水面舰艇上,能够在广泛的海洋或者湖泊上进行自由巡航和分散部署,在一定海域内实现对来袭目标的拦截打击,但受限于水域的范围,仅适用于海洋战场等。

空基平台主要是指将装备搭载在飞机上,具体又可分为两种情况:一是固定翼搭载;二是旋翼机搭载。固定翼空基考虑到自身结构和机动性能等条件,其飞行速度相对过快,机动性较高,起降场地受限,运用灵活性差,主要适用于高空侦察、对地打击、快速突防、空战协同等中空高空场景;旋翼机则通过旋转翼面获得升力,通过调整转速改变升力及前进动力,其特有的升力方式使得旋翼机转向方便,灵活性好,可随意起降,能快速投入战斗,在短时间内对敌实施快速攻击,对固定机场依赖程度小,野战生存能力强,适用于中低空、超低空场景。

2.2 基于武器

按照平台所搭载的武器不同,目前旋翼机平台可搭载电子干扰武器、机炮和导弹等硬杀伤武器、高能激光武器和高功率微波武器等^[30-36]。不同方式的具体介绍和特点如表1所示。

表1 主流无人机蜂群反制方法

Table 1 Mainstream countermeasures of UAV swarm

拦截方式	工作机理	打击效果	作战特点
高炮及导弹等硬杀伤	利用雷达等告警设备探测目标,通过发射物理弹药进行直接打击	击伤、击毁 来袭空中目标	探测难度高、拦截概率及稳定性较低,反应延迟高,成本效益低,射速受限,易受干扰。
激光武器	使用高能激光照射目标,造成热效应和结构破坏	击伤、击毁 来袭空中目标	抗干扰能力强,命中精度高,作战灵活,但受环境条件限制,适合中近程防空和对抗低速、小型目标。
电磁干扰阻断技术	发射定向射频信号,干扰目标电子系统,导致其失效	干扰来袭空中目标	技术门槛相对较低,部署灵活,成本较低,但干扰范围和数量有限,作战效能评估困难。
电磁武器 微波波束武器 (高功率微波)	利用微波的场效应和热效应,通过高增益天线发射高功率微波,对目标造成损伤	远距干扰、中距失能、 近距毁伤来袭空中目标	具有全天候作战能力,快速响应,高可靠性,适合对抗大量小型、慢速无人机,但效果可能受热晕、衍射和散射影响。

电子干扰武器^[37-39]主要通过目标定向发射大功率干扰射频信号,致其定位、导航、通讯等功能失效或产生错误控制指令,使其无法协同组网执行任务。

机炮及导弹等硬杀伤武器^[40]依赖雷达、光电及红外等设备探测感知来袭目标的信息,通过炮弹或导弹进行物理性的硬杀伤。

高能激光武器^[4, 41-42]是一种以大功率辐射能量毁伤目标的定向能武器,主要通过能量聚集产生爆炸、碎裂、热损等效果,从而实现击伤、击毁来袭空中目标。

高功率微波^[30, 43-44]武器是指峰值功率超过 100 MW,中心频率在 300 MHz~300 GHz 的强电磁脉冲,又称为电磁脉冲武器,是集软硬杀伤和多种杀伤功能于一身的新概念电子武器系统,主要运用微波的场效应和热效应,依据功率和频率的不同,具有多种工作模式。按运行方式分为单次使用的微波炸弹(又称电磁脉冲弹)和重复使用的高功率微波定向发射系统两种^[45-46]。

综上所述,在应对数量多、体积小、速度慢的无人机蜂群目标来袭时,采用旋翼机搭载高能激光武器,可以依据打击距离选择不同杀伤模式,具有近中远距、点面杀伤的高效打击能力,能够实现对中低空飞行蜂群目标的远距干扰、中距致盲、近距毁伤的多维一体杀伤效果。因此,研究基于旋翼机的空基高能激光武器应对来自无人机蜂群的空天威胁,将有效提升防空体系的打击能力,满足未来防空拦截需求,具有极高的研究价值和现实意义。

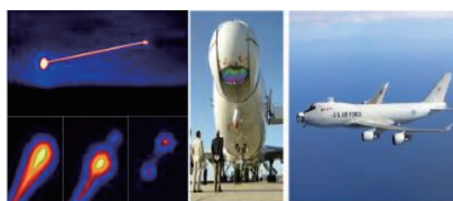
3 激光武器发展及运用

激光武器是一种以大功率辐射能量毁伤目标的定向能武器,是通过发射高能激光束辐照在目标表面,以产生复杂的物理化学反应,使其结构状态和材料特性发生诸如温升、氧化、膨胀、熔融、汽化、击穿、破裂等变化,以及激光辐照导致的电子元件失效,从而对目标造成不同程度的毁伤作用。激光器性能的主要参数是激光输出功率和光束质量。此外,激光武器的关键技术还包括光束控制技术、大气传输及其补偿技术、系统集成小型化技术以及激光毁伤机理。由于激光本身所具有的光速、单色性、相干性、方向性及高功率密度等特性,决定了激光武器具有打击精确、反应快速、

抗干扰、软硬杀伤兼备等优异的作战潜力。激光武器作为一种新概念武器,研究其技术发展、运用场景、杀伤模式和打击流程等对于推动激光武器装备的应用和现代战争模式的发展至关重要。

3.1 激光武器发展分析

相比于国内,欧美等国对机载激光武器的研究相对较早,而美国作为全世界各国最早研究机载激光武器的国家,具有领先于全世界的机载激光相关技术。机载激光武器最初是用于拦截来袭的战略导弹。上世纪 70 年代,美国率先提出了机载激光实验室(airborne laser laboratory, ALL)计划,该计划于 1983 年进行了试验验证,并成功摧毁了 5 枚响尾蛇空空导弹和 1 枚模拟巡航导弹,在一定程度上证明了机载激光武器具有对战略导弹进行打击摧毁的能力。后续又启动了机载激光(airborne laser, ABL)计划,该计划于 2007~2010 年间进行了多次试验,对机载激光器的毁伤能力系统性能进行了验证,测试示意图如图 4(a)所示。此外,2001 年美国基于 ABL 技术研发了一种效费比更高的小型机载激光武器系统即先进战术激光武器(advanced tactical laser, ATL),并于 2006~2008 年间完成搭机试飞和发射打靶试验。ABL 计划下马后,美国导弹防御局(missile defense agency, MDA)提出了“机载激光 2.0”构想,旨在发展高空、长航程的无人机型激光武器,去拦截助推段弹道导弹。2015 年,美国空军首先启动自我保护的高能激光演示器(self-protect high-energy laser demonstrator, SHIELD)项目,用于支撑研发更紧凑的中功率激光武器吊舱,并将其与战斗机兼容,用于保护战斗机免遭敌方导弹的攻击。该项目于 2019 年进行了地面测试,验证了激光武器可作为战斗机反导力量应用的可能性,其概念图如图 4(c)所示。此外,美国国防高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)于 2017 年提出高效超紧凑激光集成设备(efficient ultra-compact laser integrated device, EUCLID),用于研发紧凑光纤激光二极管模块,以实现在各型有人/无人作战飞机和战术地面车辆上配装紧凑型激光武器。



(a) ABL 武器系统测试示意图



(b) 2017年美军于AH-64上试验激光武器吊舱



(c) 美军F35战斗机载外挂激光武器系统概念图



(d) 美军直升机机载激光武器概念图

图4 激光武器相关进展

Fig. 4 Related advancements of laser weapons

除空中平台外,世界各国也陆续发展自己的多类型不同载体的激光武器系统。美国 HELWS-MRZR 移动式高能激光武器系统,全重不超过 700 kg,车载供能设备可支持连续发射 30 次,可直接伴随空降兵空投至前线作战。美国“利爪”紧凑型激光武器系统,是一种紧凑型、小型模块化武器系统,质量约 270 kg,功率范围为 2 kW~10 kW,可以集成在作战车辆上,也可安装在支架上使用,拆卸后可由 4 个行李箱大小的容器收纳。美国“长矛”紧凑型激光武器,代表了迄今为止交付的最紧凑、最强大的激光武器技术,输出功率大概 60 kW 左右,可由 F-16 战斗机吊舱携带。该吊舱位于机腹的中心线挂点,是目前同等功率等级中最小、最轻的一款高能激光器。洛克希德·马丁公司强调,其体积仅有 2017 年公司为美国陆军生产的激光器的六分之一,据推测质量不超过 800 kg。美国“高能液体激光区域防御系统”是一种 150 kW 的激光武器系统,其尺寸和质量仅为目前相似功率激光器的十分之一。最终目标是演示一种质量功率比小于 5 kg/kW(要求质量小于 750 kg、体积

不超过 2 m³)、输出功率达 150 kW 的激光武器系统。中国“沉默猎手”LASS 激光器标准输出功率为 30 kW,最大射程 4000 m。该激光器主要用于拦截大批低空无人机,其激光器威力据称可在 800 m 距离烧穿 5 层 2 mm 厚的钢板,1000 m 距离可烧穿 5 mm 厚钢板,重量低于 907 kg。俄罗斯在积极拓展“佩列斯韦特”等型号的激光武器的研制以及反无人机集群的实战应用。在俄乌冲突中,俄罗斯于 2022 年 5 月对外公布正在使用新研制的激光武器“扎迪拉”来对抗乌克兰无人机。除美俄等军事强国外,其他国家也在竞相发展激光武器反无人机集群技术。如以色列拉斐尔公司研制的“铁束”激光武器、“塞斯纳”机载高能激光武器,德国莱茵金属公司开发的“陆基欧瑞康激光武器”以及我国的低空卫士激光武器系统等。

3.2 工程可行性分析

截至目前,世界各国有关无人旋翼直升机开展了多方面的研究。如:MQ-8 系列火力侦察兵无人直升机,由美国设计和制造,现已发展出 A、B、C 三种型号。MQ-8C 是 MQ-8 系列无人机里最新的改进型号,也是性能最为先进的型号,它的机长 12.6 m,机高 3.3 m,旋翼直径 10.7 m,尾桨直径 1.65 m,最大起飞质量约为 2 700 kg,机内最大有效载重 227 kg,最大外挂载荷 1 220 kg,最大飞行速度 250 km/h,实用升限 4 880 m,最大航程 2 270 km,续航时间 12 h。Picador 无人直升机,由以色列国防军开发,长度 6.58 m,宽度 2.00 m,高度 2.58 m,主转子直径 7.22 m,空重 180 kg,最大起飞重量 720 kg,最大速度 203 km/h,飞行半径 200 km,升限高度 3 657 m。VSR 700 无人直升机,最大起飞质量约为 700 kg,有效载荷约为 250 kg,配备涡轮增压重型燃油发动机,最大输出功率为 155 马力,最高速度可达 187 km/h,最大飞行高度 6 000 m。TD10 的重型共轴无人直升机,由北京中航智研制,机身长约 15 m,旋翼直径约 17 m,最大起飞质量达 15 t,实用升限 6 600 m,续航时间大于 5.5 h,航程 1 200 km,任务半径 500 km。“旋戈”-500 系列无人直升机,由中国航空工业直升机所研制,采用模块化设计,可根据不同的用户需求搭载各种任务载荷,最大任务载荷可达 180 kg,该平台长 7.3 m,高 2.42 m,宽 1.6 m,最大起飞质量 450 kg,最大平飞速度 170 km/h,最大巡航速度 160 km/h,续航时间可达 6 h~7 h。AR2000 型舰载大型无人直升机,最大起飞质量达到了 2 000 kg,有效载荷能力为 800 kg,最大任务载荷 450 kg,最大续航时间可达 8 h,最大飞行高度超

过 5 000 m, 最大飞行速度为 240 km/h, 最大航程为 1 500 km。

通过对现有世界各国有关无人旋翼直升机的技术发展进行汇总, 结合前文有关激光武器的发展现状, 综合分析可知, 无人旋翼直升机能够承载起激光武器的载荷, 随着高新技术的快速发展, 激光武器更新换代步伐逐渐加快, 激光武器系统正在向小型化、集成化的方向发展, 载体平台也开始由陆基和海基平台向空基平台延伸, 这也意味着未来战争中, 空基激光武器的列装应用参战已成必然趋势。

3.3 运用场景分析

1) 同构蜂群 同构蜂群主要由同一型号、同一任务、相同能力的无人机组成, 其任务目标一般是单一的区域侦察、情报监视、通信组网、对地打击等, 完全不具备应对拦截的反击能力。在针对这些执行单一任务的来袭蜂群时, 防御方需要针对来袭蜂群的编队队形、可能航迹等进行任务的动态规划, 决定是否采取单机或多机的定点拦截、机动打击、交叉覆盖等多种杀伤策略。

2) 异构蜂群 异构蜂群主要由不同型号、不同任务、不同能力的无人机组成, 其任务目标一般是多功能的对地打击、对空防御、区域侦察、情报监视、通信组网等, 可能具备一定的应对拦截的反击能力。针对这类蜂群时, 在同构蜂群的拦截基础上, 防御方还需要考虑到蜂群中对拦截机具备威胁的目标以及对防守阵地具备重大威胁的目标, 首先应对来袭蜂群目标进行目标识别判断以及威胁评估, 甄别高价值、高威胁目标, 对此类目标须着重打击, 再基于战场动态环境进行实时的决策规划, 以最小代价完成最大拦截效果。

3.4 杀伤模式讨论

激光武器能够依据使用功率、工作波长和输出方式等的不同, 具有多种工作模式, 杀伤模式示意图如图 5 所示。激光能量越强, 功率越高, 孔径越大, 杀伤力越大, 作用距离越远, 因此能够实现不同距离下干扰、击伤、击毁来袭空中目标的不同杀伤效果。

在远距离阶段, 拦截战机对蜂群目标进行持续地定位跟踪, 并采用高能激光束以光速精准辐照目标。考虑到激光能量在大气传播过程中的传递衰减, 尤其是在远距离激光传输过程中能量损失较大, 因此其激光能量较弱, 仅能对目标的光电感

知系统实现简单的干扰作用。

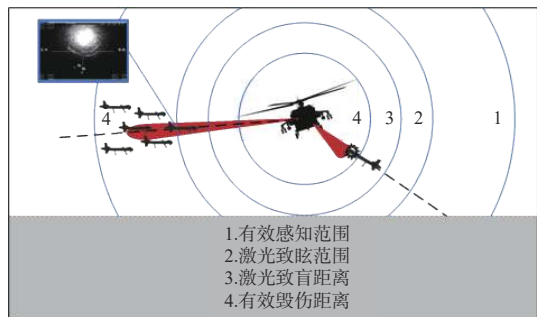


图 5 杀伤模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of combat mode

在中距离阶段, 随着蜂群的继续靠近, 进入中距杀伤阶段, 拦截战机对蜂群目标进行持续地定位跟踪, 并采用高能激光束以光速精准辐照目标。此时激光能量相对较高, 一定程度上能够对蜂群无人机的光电感知系统造成致盲效果, 使得无人机的部分功能丧失, 达到失能或致盲效果。

在近距离阶段, 随着蜂群越来越靠近, 进入近距杀伤阶段, 拦截战机继续对蜂群目标进行持续地定位跟踪, 并采用高能激光束以光速精准辐照目标, 能够对蜂群无人机的机体结构、电子硬件等产生不可逆损伤。如通过毁伤导引头等关键部位, 或穿透飞行物壳体将其击落, 引爆战斗部燃料使其空中爆炸等, 造成无人机的功能丧失乃至坠毁, 达到毁伤效果。

在交战过程中, 由于来袭蜂群目标速度、数量、位置、距离、编队等信息的动态变化, 因此拦截方的打击方式也是动态变换的, 在远距干扰、中距致盲、近距杀伤三种方式之间进行动态迭代、相互切换, 杀伤距离示意图如图 6 所示。

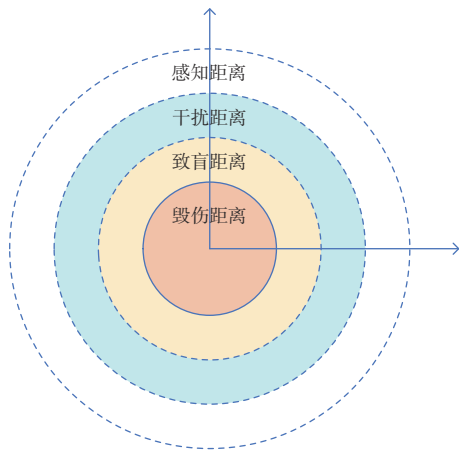


图 6 杀伤距离示意图

Fig. 6 Schematic diagram of lethal range

此外,在无人机蜂群拦截打击任务中,还需考虑到激光武器的点面杀伤特点和叠加效应,决定采用单机拦截目标或是多机协同拦截目标,从而合理进行火力分配,选择最佳的打击策略,提高运用灵活性,增强杀伤效能。

3.5 打击流程研究

依据时间推进的方式,结合决策周期环对打击流程进行梳理,打击流程示意图如图7所示,具体流程如下。

1) 目标探测阶段 卫星、侦察机和地面雷达等探测设备远距离探测到有蜂群来袭,开始对蜂群进行持续的发现定位和跟踪,同时传递信息给反蜂群旋翼机编队。旋翼机编队通过机载感知系统进行定位和跟踪,并近距离侦察跟踪低空目标,编队成员间互相传递各自发现的目标信息,同时可深入复杂地形处,搜索那些企图利用地形地物隐蔽躲藏的目标。

2) 信息处理阶段 机载计算机系统对所感知的蜂群信息(类别、速度、数量、距离、队形等)以及周边环境信息(地貌、天气、海拔等)等进行调整、关联、计算、融合等处理,为后续的认可评估等提供可靠参考依据。

3) 识别评估阶段 该阶段主要是基于前端感知设备所得到的处理后的信息,对来袭蜂群目标进行型号的识别判断以及威胁等级的评估。对来袭蜂群目标进行型号等的识别可以通过对无人机的外形图像参数(如体积、机长、翼展、长宽比等)、电磁特征等信息进行融合,判断出无人机的型号,即可推知无人机的载弹种类和数量等信息,并据此判断无人机的威胁等级,甄别高价值高威胁目标,为打击决策提供参考。

4) 火控解算和决策打击阶段 当拦截编队在完成前端的态势感知过程后,进入火控解算流程,完成对来袭蜂群目标的跟踪瞄准、攻击排布、打击诸元等的计算,并同时完成武器的射前检查、充能等,然后依据初始感知信息实现决策打击的任务预规划。同时考虑到来袭蜂群目标速度、数量、位置、距离、编队等信息的动态变化,因此决策打击还需要根据周边态势的动态变化进行任务的动态规划,保证拦截打击方案最优。

5) 毁伤评估阶段 该阶段主要是对战场周边动态变化的环境以及敌我双方对抗过程中的编队相关信息进行感知,实时判断对比来袭蜂群的毁伤数量,实现对外来目标的毁伤评估。

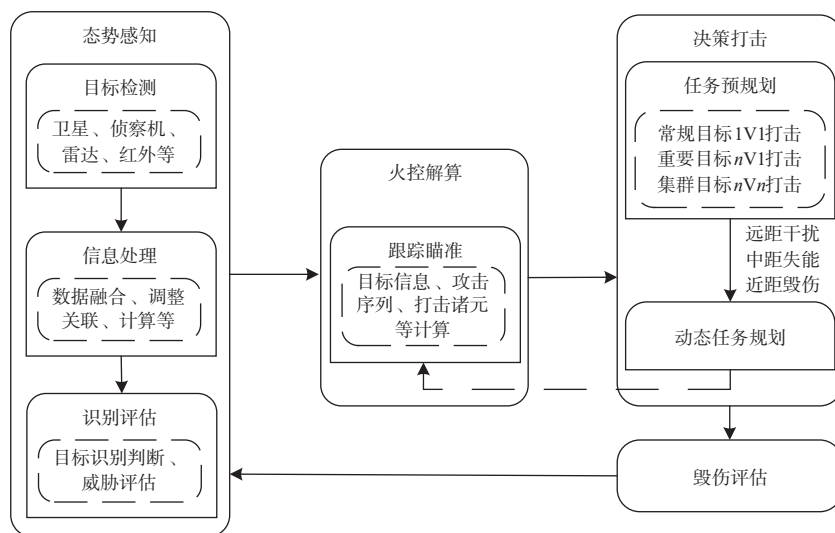


图7 打击流程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of strike process

3.6 机载激光打击蜂群杀伤链

杀伤链理论是一种将战争杀伤作用的过程分解为若干个阶段,以此为基础进行军事力量的设计、作战计划的制定和评估的理论。该理论认为将作战的杀伤效应分解为不同的阶段,能够使指

挥官更加科学地进行作战决策,从而提高战争的胜利概率。其主要贡献在于提供了一种新的方法,将复杂的战争过程分解为几个简单的环节,并可以在每个环节上集中资源,提高效率和准确性,机载激光打击蜂群杀伤链的示意图如图8所示。

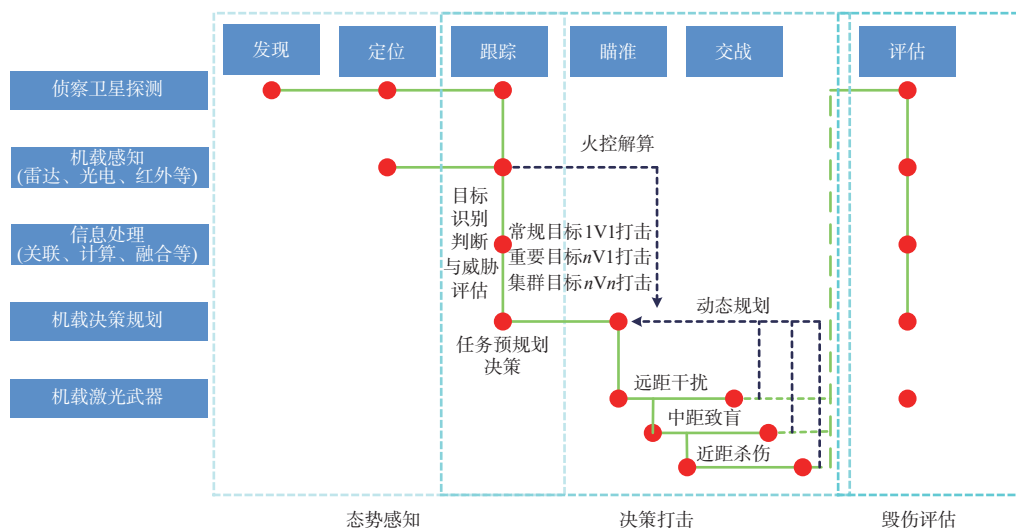


图 8 杀伤链示意图

Fig. 8 Schematic diagram of killing chain

首先,天基侦察卫星远距离探测到有蜂群来袭,开始对蜂群进行持续地发现定位和跟踪,同时传递信息给我方反蜂群战机,我方战机通过机载感知系统进行定位和跟踪,并对信息进行处理,及时做出打击决策,通过机载高能激光武器进行远距离的干扰拒止;随着蜂群的继续靠近,进入中距作战阶段,我方战机对蜂群目标进行持续地定位跟踪,以及通过机载高能激光武器进行中距离的致盲失能;随着蜂群越来越近,进入近距作战阶段,我方战机继续对蜂群目标进行持续地定位跟踪,并通过机载高能激光武器进行近距离的硬杀伤。

在远中近距离三个不同阶段作战过程中,我方对来袭蜂群的发现定位跟踪是持续存在的,因此在杀伤链中这部分可以看作是一体的,此外该过程完成了来袭目标信息的识别判断和威胁评估,即态势感知。跟踪瞄准和交战是在态势感知的基础上进行的,该过程实现了对来袭目标的火控解算和打击规划决策等,即决策打击。评估即对战场的敌我双方有效作战力量等进行评估,即毁伤评估。

在跟踪瞄准交战(决策打击)过程中,考虑到来袭蜂群目标速度、数量、位置、距离、编队等信息的动态变化,因此我方的打击方式也是动态变换的,在远距干扰、中距致盲、近距杀伤三种方式之间进行动态迭代、相互切换。

4 总结与展望

无人机蜂群战术是未来军事行动的必然趋势,

虽然目前蜂群内的高度智能化协同依然存在一定的难度,但技术一旦成熟,必然颠覆现有战场作战模式。本文通过分析国外反无人机蜂群技术现状及难点,提出反蜂群作战构想,探索反蜂群技术发展趋势,对推动反蜂群装备研制和战法研究具有重要意义。

本文中,我们主要通过总结分析现有典型蜂群应用的特点和模式,以及分析现有防空拦截装备的缺点和不足,提出了搭载高能激光武器的旋翼机反蜂群作战概念,并对其运用场景、模式以及流程进行分析讨论。通过分析表明:高能激光武器的光速攻击、点面杀伤、全天候打击等特点极其适用于蜂群来袭的应用场景,对于提升防空体系打击能力和满足未来防空拦截需求具有显著的现实意义。值得注意的是,为了发挥高能激光武器的最大杀伤效能,必须在战术战法上进行创新,此外还注意以下4个方面关键技术问题。

1) 小型化和紧凑化 由于空中平台的尺寸和重量等限制,因此从装备系统设计角度就需要考虑到武器尺寸会受到战术需求、技术条件、结构复杂性等多方面的制约,尽可能在满足战术需求的前提下对激光武器进行小型化设计,以保证其能够应用于多种平台搭载使用。

2) 载机散热问题 激光武器是利用光、热、电、化学能或原子核等外部能量激励物质使其受激辐射而产生高能激光束直接打击毁伤目标,其产生过程会释放大量的热量,容易对自身或友方平台的电子设备或人员造成破坏。因此,在研发

激光武器的时,应当考虑到热屏蔽或散热结构的相关设计。

3) 机载高能激光武器杀伤区域数学模型 目前有关高能激光武器的研究主要集中在激光的传播特性、能源驱动、激光合成、激光防护、效能评估等方面的研究,缺乏对激光武器杀伤机制的定量分析,没有形成有效的空基激光武器空间杀伤包线机理研究,从而导致装备的杀伤能力分析较为空泛且缺乏有效说服力。

4) 多机协同决策打击问题 考虑到激光武器的点面杀伤特性,在探测感知到来袭蜂群目标后,如何在保证拦截编队安全的前提下实现打击效率最高和花费代价最小等是指控人员最应该考虑的问题,这方面主要包括多机激光武器毁伤叠加效应,多机打击的任务目标分配、航迹规划、编队协同等技术。

参考文献:

- [1] 钮伟, 黄佳沁, 缪礼锋. 无人机蜂群对海作战概念与关键技术研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2018, 40(1): 20-27.
NIU Wei, HUANG Jiaqin, MIAO Lifeng. Research on the concept and key technologies of unmanned aerial vehicle swarm concerning naval attack[J]. *Command Control & Simulation*, 2018, 40(1): 20-27.
- [2] 魏金钟, 王光耀, 顾涌芬. 无人作战飞机对地攻击效费比分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(6): 709-713.
WEI Jinzhong, WANG Guangyao, GU Songfen. Cost efficiency analysis of attack UCAV[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(6): 709-713.
- [3] 杨中英, 王毓龙, 赖传龙. 无人机蜂群作战发展现状及趋势研究[J]. *飞航导弹*, 2019(5): 34-38.
YANG Zhongying, WANG Yulong, LAI Chuanlong. Research on the development status and trend of UAV bee colony operation[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(5): 34-38.
- [4] 周新人, 卢盈齐, 刘学亮, 等. 国外定向能防空武器抗击无人机蜂群研究现状分析及思考[J]. *飞航导弹*, 2021(7): 91-95.
ZHOU Xinren, LU Yingqi, LIU Xueliang, et al. Analysis and thinking on the research status of directed energy air defense weapons against drone bee colony abroad[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(7): 91-95.
- [5] 马子玉, 何明, 刘祖均, 等. 无人机协同控制研究综述[J]. *计算机应用*, 2021, 41(5): 1477-1483.
MA Ziyu, HE Ming, LIU Zujun, et al. Survey of unmanned aerial vehicle cooperative control[J]. *Journal of Computer Applications*, 2021, 41(5): 1477-1483.
- [6] 樊邦奎, 张瑞雨. 无人机系统与人工智能[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(11): 1523-1529.
FAN Bangkui, ZHANG Ruiyu. Unmanned aircraft system and artificial intelligence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1523-1529.
- [7] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. *航空学报*, 2020, 41(4): 023732.
WANG Xiangke, LIU Zhihong, CONG Yirui, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: review and outlook[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(4): 023732.
- [8] 吕震华, 高亢. 美国无人集群城市作战应用发展综述[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2020, 15(8): 738-745.
LYU Zhenhua, GAO Kang. Review of the development of drone swarm urban combat applications in the USA[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2020, 15(8): 738-745.
- [9] 姜进晶, 汪民乐, 姜斌. 无人机作战运用研究[J]. *飞航导弹*, 2019(1): 41-44.
JIANG Jinjing, WANG Minle, JIANG Bin. Research on operational application of UAV[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(1): 41-44.
- [10] 张耀中, 许佳林, 姚康佳, 等. 基于DDPG算法的无人机集群追击任务[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 324000.
ZHANG Yaozhong, XU Jialin, YAO Kangjia, et al. Pursuit missions for UAV swarms based on DDPG algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 324000.
- [11] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. *航空学报*, 2020, 41(增刊1): 4-14.
JIA Yongnan, TIAN Siying, LI Qing. Review on research progress of UAV cluster[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S1): 4-14.
- [12] 袁成, 董晓琳, 朱超磊. 2020年国外先进军用无人机技术发展综述[J]. *飞航导弹*, 2021(1): 17-24.
YUAN Cheng, DONG Xiaolin, ZHU Chaolei. Review on the development of advanced military UAV technology abroad in 2020[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(1): 17-24.

- [13] 陈镜. 无人机蜂群作战特点 and 对抗体系设想[J]. *无线电工程*, 2020, 50(7): 586-591.
CHEN Jing. The operational characteristics of drone swarm and the conception of countermeasure system[J]. *Radio Engineering*, 2020, 50(7): 586-591.
- [14] 杨健, 程程, 谢旭, 等. 无人机蜂群对面攻击任务规划能力需求研究[C]//第九届中国指挥控制大会论文集. 北京: 中国指挥与控制学会, 2021: 7.
YANG Jian, CHENG Cheng, XIE Xu, et al. Research on the capability requirements of UAV swarm face-to-face attack mission planning[C]//Proceedings of the 9th China Command and Control Conference. Beijing: Chinese Command and Control Society, 2021: 7.
- [15] 于力, 魏平, 马振利, 等. 外军反蜂群无人机技术发展分析[J]. *飞航导弹*, 2017(12): 26-30.
YU Li, WEI Ping, MA Zhenli, et al. Analysis on the development of foreign military anti-bee colony UAV technology[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2017(12): 26-30.
- [16] 杨晨, 张少卿, 孟光磊. 多无人机协同任务规划研究[J]. *指挥与控制学报*, 2018, 4(3): 234-248.
YANG Chen, ZHANG Shaoqing, MENG Guanglei. Multi-UAV cooperative mission planning[J]. *Journal of Command and Control*, 2018, 4(3): 234-248.
- [17] 韩亮, 任章, 董希旺, 等. 多无人机协同控制方法及应用研究[J]. *导航定位与授时*, 2018, 5(4): 1-7.
HAN Liang, REN Zhang, DONG Xiwang, et al. Research on cooperative control method and application for multiple unmanned aerial vehicles[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, 5(4): 1-7.
- [18] 黄汉桥, 白俊强, 周欢, 等. 智能空战体系下无人协同作战发展现状及关键技术[J]. *导航与控制*, 2019, 18(1): 10-18.
HUANG Hanqiao, BAI Junqiang, ZHOU Huan, et al. Present situation and key technologies of unmanned cooperative operation under intelligent air combat system[J]. *Navigation and Control*, 2019, 18(1): 10-18.
- [19] 郭海洋. 基于蜂群算法的无人机群协同飞行策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
GUO Haiyang. Research on coordinated flight strategy for multi-UAV based on bee colony algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [20] MURATORE M, SILVESTRI R T, CHUNG T H. Simulation analysis of UAV and ground teams for surveillance and interdiction[J]. *The Journal of Defense Model-*
ing and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2014, 11(2): 125-135.
- [21] LUO Y X, SONG J, ZHAO K, et al. UAV-cooperative penetration dynamic-tracking interceptor method based on DDPG[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1618.
- [22] XING D J, ZHEN Z Y, GONG H J. Offense-defense confrontation decision making for dynamic UAV swarm versus UAV swarm[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 233(15): 5689-5702.
- [23] CHEN X, LIU Y T, YIN L Y, et al. Cooperative task assignment and track planning for multi-UAV attack mobile targets[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 100(3): 1383-1400.
- [24] 金钰, 谷全祥. 2023年国外军用无人机装备技术发展综述[J]. *战术导弹技术*, 2024(1): 33-47.
JIN Yu, GU Quanyang. Overview of foreign military UAV equipment technology development in 2023[J]. *Tactical Missile Technology*, 2024(1): 33-47.
- [25] 冯滔. 基于共识的同构无人机集群分组问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
FENG Tao. Research on consensus-based grouping for homogeneous UAV swarm[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [26] 丁臻极, 王从庆, 丛楚滢, 等. 城市环境下的异构多无人机层次化任务分配[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(增刊1): 302-306.
DING Zhenji, WANG Congqing, CONG Chuying, et al. Hierarchical task assignment of heterogeneous multi-UAVs in urban environment[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(S1): 302-306.
- [27] CHEN J C, LING F Y, ZHANG Y, et al. Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022, 69: 101005.
- [28] 宣源, 汪卫华, 程德胜, 等. 机载高功率微波武器研究现状与发展趋势[J]. *飞航导弹*, 2008(6): 32-34.
XUAN Yuan, WANG Weihua, CHENG Desheng, et al. Research status and development trend of airborne high-power Weibo weapons[J]. *Winged Missiles Journal*, 2008(6): 32-34.
- [29] 刘丽, 魏雁飞, 张宇涵. 美军反无人机技术装备发展解析[J]. *航天电子对抗*, 2017, 33(1): 60-64.
LIU Li, WEI Yanfei, ZHANG Yuhan. The development

- of anti-UAV technical equipment of the U. S. armed forces[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2017, 33(1): 60-64.
- [30] 张颜颜, 陈宏, 鄢振麟, 等. 高功率微波反无人机技术[J]. *电子信息对抗技术*, 2020, 35(4): 39-43.
ZHANG Yanyan, CHEN Hong, YAN Zhenlin, et al. The technology of high-power microwave anti-bee swarm drone[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2020, 35(4): 39-43.
- [31] 韩宝瑞, 刘涛, 赵小勇. 美国近程防空武器发展及趋势分析[J]. *飞航导弹*, 2018(4): 12-16.
HAN Baorui, LIU Tao, ZHAO Xiaoyong. Development and trend analysis of short-range air defense weapons in the United States[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2018(4): 12-16.
- [32] 杨扬, 武蔚琦, 刘晓昕, 等. 反无人机系统研究发展分析[C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会2020年学术年会论文集. 北京: 中国航天电子技术研究院科学技术委员会, 2020: 8.
YANG Yang, WU Yuqi, LIU Xiaoxin, et al. Analysis on research and development of anti-UAV system[C]//Proceedings of the 2020 Annual Conference of Science and Technology Committee of China Academy of Aerospace Electronics Technology. Beijing: Science and Technology Committee of China Academy of Aerospace Electronics Technology, 2020: 8.
- [33] 孙海文, 于邵祯, 孟祥尧, 等. 海上无人机及蜂群作战指挥控制系统发展[J]. *指挥控制与仿真*, 2022, 44(5): 19-23.
SUN Haiwen, YU Shaozhen, MENG Xiangyao, et al. Development of command and control system for unmanned aerial vehicles and swarm combat[J]. *Command, Control and Simulation*, 2022, 44(5): 19-23.
- [34] 唐永福. 高功率微波对抗技术分析[J]. *电子技术与软件工程*, 2016(5): 105-108.
TANG Yongfu. Analysis of high power microwave countermeasure technology[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2016(5): 105-108.
- [35] 王明东, 王天祥. 新概念武器的现状与发展趋势[J]. *四川兵工学报*, 2014, 35(6): 1-5.
WANG Mingdong, WANG Tianxiang. Actuality and development trend of new concept weapons[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(6): 1-5.
- [36] POPESCU L R. The existing technologies on anti-drone systems[J]. *International Conference Knowledge-based Organization*, 2021, 27(3): 83-91.
- [37] 都元松, 董文锋, 黎波涛, 等. 对无人机光电系统机载干扰模式仿真分析[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(9): 162-168.
DU Yuansong, DONG Wenfeng, LI Botao, et al. Simulation and analysis of airborne jamming mode for UAV optoelectronic system[J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(9): 162-168.
- [38] 焦博, 丛佃伟. 导航干扰技术在无人机防御中的应用展望[J]. *无线电工程*, 2021, 51(10): 1019-1024.
JIAO Bo, CONG Dianwei. Application prospect of navigation jamming in UAV defense[J]. *Radio Engineering*, 2021, 51(10): 1019-1024.
- [39] SEMENENKO O, KHOMCHAK R, KIRSANOV S, et al. A mathematical model for describing the operation of airborne Gun-laying radars in conditions of active counteraction to enemy interference and military-economic assessment of the feasibility of its implementation[J]. *INCAS Bulletin*, 2021, 13: 193-208.
- [40] 王凤山, 杨志宏. 弹炮结合防空武器系统防空效能评估研究[J]. *军事运筹与系统工程*, 2021, 35(4): 34-41.
WANG Fengshan, YANG Zhihong. A study on effectiveness evaluation of Gun-missile hybrid air defense weapon system[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2021, 35(4): 34-41.
- [41] 李朝龙, 林德群, 赵寒. 构建反制激光红外制导武器的陆域防御体系思考[J]. *激光与红外*, 2021, 51(10): 1279-1285.
LI Chaolong, LIN Dequn, ZHAO Han. Land defense system based on anti laser infrared guided weapon[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(10): 1279-1285.
- [42] AFFAN AHMED S, MOHSIN M, ZUBAIR ALI S M. Survey and technological analysis of laser and its defense applications[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(2): 583-592.
- [43] 赵博, 李焱, 赵强, 等. 舰载高功率微波武器协同防空的目标威胁评估[J]. *指挥控制与仿真*, 2022, 44(4): 53-59.
ZHAO Bo, LI Ye, ZHAO Qiang, et al. Target threat assessment of shipborne high power microwave weapon in the cooperative air defense[J]. *Command Control & Simulation*, 2022, 44(4): 53-59.
- [44] MIN S H, JUNG H, KWON O, et al. Analysis of electromagnetic pulse effects under high-power microwave sources[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 136775-136791.
- [45] 匿名. 杀敌于无形的波武器(一): 可重复使用的高功率

- 微波武器[J]. 大众科学, 2021(1): 32-33.
- Anon. Invisible wave weapons (I): reusable high power microwave weapons[J]. China Public Science, 2021(1): 32-33.
- [46] 陶建义, 陈越. 外军高功率微波武器发展综述[J]. [中国电子科学研究院学报](#), 2011, 6(2): 111-116.
- TAO Jianyi, CHEN Yue. Development of HPM weapon for foreign military[J]. [Journal of China Academy of Electronics and Information Technology](#), 2011, 6(2): 111-116.