

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.021

# 无人化协同干扰技术研究现状解析

裴立冠, 刘经东, 马春波

(中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 针对无人化协同干扰技术平台属性复杂、战场电磁环境多变和理论方法选取困难问题, 提出对无人化协同干扰技术研究进行分析。通过从干扰效果评估和协同干扰资源规划 2 个维度, 对国内外发展现状进行梳理并对当前研究的主要薄弱点进行总结, 确定以单平台干扰问题研究为基础, 结合智能化思想和干扰实际特点, 建立无人化协同干扰任务规划模型是进行无人化协同干扰技术研究, 并用于实际战场干扰态势构建的未来趋势。结果表明: 无人平台协同干扰技术能够在空间位置和资源配置上很好地克服单干扰平台的缺点, 有效提升系统的整体干扰效果, 以该技术应用于实际战场和武器试验的干扰态势构建中, 将成为无人化协同干扰技术发展趋势。

**关键词:** 无人化; 协同干扰; 干扰效果评估; 干扰资源规划

**中图分类号:** TN95 **文献标志码:** A

## Analysis of Current Research Status of Unmanned Cooperative Jamming Technology

Pei Liguan, Liu Jingdong, Ma Chunbo

(No. 91550 Unit of PLA, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of complex platform attributes, changeable battlefield electromagnetic environment and difficult selection of theory and method of unmanned cooperative jamming technology, the research on unmanned cooperative jamming technology is analyzed. From the two dimensions of jamming effect evaluation and cooperative jamming resource planning, the development status at home and abroad is sorted out and the main weaknesses of current research are summarized, and it is determined that based on the research of single platform jamming problem, combined with the intelligent idea and the actual characteristics of jamming, the unmanned cooperative jamming mission planning model is established. It is also used in the future trend of jamming situation construction in the actual battlefield. The results show that the cooperative jamming technology of unmanned platform can overcome the shortcomings of single jamming platform in space position and resource allocation, and effectively improve the overall jamming effect of the system. Applying this technology to the jamming situation construction of actual battlefield and weapon test will become the development trend of unmanned cooperative jamming technology.

**Keywords:** unmanned; cooperative jamming; jamming effect evaluation; jamming resource planning

### 0 引言

当前动目标显示技术、边搜索边跟踪技术等多种雷达新型技术不断应用于导弹雷达制导系统, 使得传统大功率单干扰装备在对其实施干扰时, 尤其是同时应对多个威胁目标过程中, 暴露出干扰识别能力弱、干扰资源分散、干扰效率低、毁伤率高以及易被“反跟踪”等缺点, 由此导致导弹命中率不断增大。为有效应对上述问题, 无人平台协同干扰技术应运而生, 该技术采用多个独立无人平台协同合作方式对目标进行电子干扰, 借助无人平台零伤亡率、高灵活性的特点, 能够在空间位置和资源配置上很好地克服单干扰平台的缺点, 有效提升系统的整体干扰效果, 必将成为当前和未来很长一段时间内海上干扰态势构建的重要方式。

### 1 无人化协同干扰特点分析

无人平台协同干扰是一个横跨实证论、方法论和价值论多个层次的综合性问题, 未来随着认知电子战的快速发展, 为适应复杂电磁环境迅速提升的高智能自适应感知要求, 该干扰系统整体涉及平台数量将越来越多, 此类“多对多”复杂对抗态势也将成为战场常态。若没有科学的智能协同理论进行有效规划, 很容易造成自身平台在空间和任务执行上发生冲突, 甚至出现碰撞毁伤情况, 完全背离海上无人平台协同干扰的初衷。由于该研究自身的复杂性, 导致其并没有像协同侦察、协同火力打击等类似技术一样得到快速发展, 目前仍处于起步阶段, 具体原因主要包括以下 3 方面:

1) 系统平台属性复杂。协同干扰效果是无人平

收稿日期: 2024-09-11; 修回日期: 2024-10-20

第一作者: 裴立冠(1990—), 男, 山西人, 博士。

台、干扰平台和威胁目标共同作用的结果,这3类对象自身属性特征多样,如无人平台所包含的无人机、无人艇等在运动特征、空间特征上均有较大差异,干扰机干扰方式包含干扰样式、干扰频率、干扰空间等要素,而导弹在速度、高度、威胁度等方面也各有不同,以上这些均导致协同干扰规划初期存在一个高维属性数据,分析难度很大。

2) 战场电磁环境多变。对于协同干扰规划系统中的3类对象,我方无人平台、干扰平台的特征均已知,但导弹雷达制导信息需通过前期侦察获取,由于敌方一系列反干扰手段导致的电磁环境复杂性,使得可获取的导弹方雷达信息有限,同时战场环境的多变性又导致该平台属性特征需实时更新,对干扰规划的速率、可行性等均提出了很高要求。

3) 方法选取困难。无人平台协同干扰系统中,自身平台属性的复杂性以及追求高效干扰和低度损耗的目标特性使得枚举法等传统规划方法无法满足需要,同时无人平台协同干扰作为未来认知电子战场重要的作战模式,为满足自主化、智能化的战争需求,尝试将前沿的仿生智能算法、认知行为理论等先进方法应用于协同干扰技术中是一条必然路径,但这些方法均发展时间较短,在实际使用时需要将理论方法与现实环境进行良好融合,给协同分配方案的提出带来了较大困难。

## 2 国内外研究现状

综合当前国内外关于无人化干扰资源规划技术公开发表的文献来看,该问题的基本研究思路是以雷达干扰效果评估为基础,借助数学建模方法和多目标优化理论,求取优质的协同干扰方案。为此,从干扰效果评估技术和协同干扰资源规划方法2方面对当前国内外研究现状进行阐述。

### 2.1 干扰效果评估技术研究现状

由于雷达干扰效果评估中涉及的平台对象在干扰样式、雷达功能等方面存在较大的差异性,且应用领域具有很强的军事保密性质;因此,目前该技术尚没有形成统一的评估方法和准则。当前少量的公开成果表明,对雷达干扰效果进行评估的基本流程为:基于干扰平台的具体干扰样式,明确相应的评估准则,并采取合适的评估方法对干扰效果进行定量化计算。

在干扰样式方面,雷达有源干扰包括压制式干扰和欺骗式干扰,两者又包含瞄准式压制、阻塞式

压制、距离欺骗、速度欺骗等多种具体样式<sup>[1]</sup>。而在评估准则方面,目前常用的包括信息准则、功率准则和效率准则<sup>[2]</sup>。其中,信息准则通过比较干扰前后回波信息的下降程度来评估干扰效果;如,文献[3]采用概率密度函数计算分析了单脉冲雷达在干扰前后角度信息的变化,达到量化两点源相干干扰方式干扰效果的目的;文献[4]借助对称交互熵理念计算了回波信息的下降情况,以比较几种典型干扰样式的干扰效果。功率准则,也叫干信比准则,通过比较干扰前后的功率比来评估干扰效果;如,文献[5]采用探测距离作为有源噪声干扰效果评估指标;文献[6]引入发现概率损失、发现距离损失等功率性指标量化遮盖性干扰的干扰效果。效率准则通过被干扰目标在干扰前后的作战能力变化情况来评估干扰效果;如,文献[7]采用自适应雷达检测器的工作性能变化程度作为该型雷达干扰效果的评估指标。

随着数学计算方法的不断进步,研究者基于雷达干扰样式和干扰准则,提出了一系列干扰效果评估方法。按照发展时间顺序,大致可以分为评估因子法、模糊综合评估法和智能评估法3大类。评估因子法基于现有的评估准则,选取代表性的影响因子直接用于干扰效果评估中;如,功率因子和有效概率因子分别常被应用于压制性干扰和欺骗性干扰的干扰效果评估<sup>[8]</sup>。模糊综合评估法借鉴模糊数学思想,通过模糊算子定义干扰影响因子之间的关系,并定量化评估效果<sup>[9]</sup>。智能评估法是在智能算法基础上发展起来的,旨在通过机器学习方式建立基础干扰评估数据与干扰效果之间的非线性关系,当前常用的是神经网络算法和支持向量机算法,如文献[10]将信号功率、信号复杂性等作为评估指标,采用模糊神经网络方法训练数据得到干扰效果评估结果;文献[11]将初始评估数据看作小样本数据,采用支持向量机方法进行干扰效果定量化评估。

### 2.2 协同干扰资源规划方法研究现状

当前在无人平台协同干扰规划的优化方法研究方面,与一般的无人平台协同控制问题采取的分析思路大致相同,先对问题对象进行任务分配数学建模,然后采用合适的优化方法进行最优化求解。因此,笔者对协同干扰规划优化方法研究现状的总结,不再拘泥于干扰问题本身,而是从协同控制问题总体出发,分任务分配数学建模和多目标优化方法2方面讨论。

### 1) 任务分配建模研究现状。

对任务分配问题进行数学建模是无人机协同控制领域研究的基础,目前,国外已经开展了大量研究,如美国的 MICA 自治编队混合主动控制项目、欧洲 COMETS 项目等<sup>[12-13]</sup>,涉及的任务类型主要包括侦察、搜索、监视等<sup>[14-18]</sup>。文献[19]均将协同侦察问题提取为多旅行商数学问题模型,确定无人机存活性为优化目标,侦察时间和续航时间为基本约束条件,并分别尝试采用搜索算法、粒子群算法等对模型进行解答。文献[20]建立的无人机多任务规划模型与混合整数线性规划问题 MILP 模型较为相近,该模型中每架无人机需执行确认、攻击和毁伤评估 3 种任务,且任务间存在时序约束、同时间段可执行任务约束和航线飞行约束,以最短飞行时间作为优化目标,尝试采用遗传算法对模型进行求解,且通过仿真实验证明了该模型的有效性。文献[21]针对无人机协同侦察规划问题进行了研究,将侦察目标最大化和侦察时间最小化作为目标优化函数,同时为研究方便,初期假设无人机等速飞行,最终采用遗传算法对问题模型进行求解。在国内关于无人平台协同控制任务模型的研究起步较晚,直到 2005 年才有相关成果出现。文献[22]通过提取任务模型的 4 个约束条件,尝试增加“虚拟”代表用于任务规划决策。文献[23]以无人机协同攻击多地面目标为背景,构建决策函数和效能函数,建立了面向地面攻击任务的规划模型。

### 2) 优化方法研究现状。

以协同干扰为代表的无人平台协同控制问题是典型的离散组合优化问题,为有效解决此类问题,发展出一系列优化算法。早期的如动态规划算法<sup>[24]</sup>、0-1 规划法<sup>[25]</sup>等,主要用于解决小规模一对一规划问题,但当规划对象逐渐增大时,计算难度呈指数型增长,此时传统算法不再适用。近年来研究者受自然现象和生物行为的启发,提出了大量人工智能算法,如蚁群算法<sup>[26]</sup>、粒子群算法<sup>[27]</sup>、人工免疫算法<sup>[28]</sup>等,并尝试应用于协同控制资源调度优化过程中。如,文献[29]借助禁忌搜索算法独特的记忆、搜索和寻优特征解决无人机多位置规划问题;文献[30]通过遗传算法对无人机任务规划模型进行分析,同时借鉴染色体结构特征,制定了深度、广度优先准则;文献[31]以应急资源调度问题为出发点,综合考虑需求、供应等要素,引入精英策略,改进了蚁群算法;文献[32]根据复杂多目标问题特

性,将初始种群进行细分,并根据种群特点分配不同的差分进化方法,从而提出了一种基于多策略差分进化算法和分解机制的动态调整多目标进化算法,同时对算法的有效性进行了检验。总体而言,此类人工智能算法较传统算法优化过程更为稳定,搜索时间更为合理,优质解搜索效率更高。

## 2.3 研究现状评述

通过对国内外关于无人化干扰资源规划技术的研究进行系统化分析发现,当前在干扰效果评估与规划方法研究方面虽然已取得了一定成果,但依然存在以下问题亟需解决。

1) 协同干扰任务属性考虑尚有欠缺。当前无人化协同干扰技术的研究主要集中于无人机方向,无人艇由于应用时间较短、应用场景较为局限,鲜少见相关报道。实际上,无人机、无人艇由于本身适用空间不同,其协同干扰能够更好地模拟海上编队防御态势,构建逼真的海上干扰威胁环境,且目前国内外已经开展了尝试性应用。在干扰目标上,对导弹末制导雷达实施有效干扰是实际战场环境中的一项重要内容,其与常规雷达相比,在空间、运动特性等方面具有更大的复杂性;因此,亟需开展包含无人机和无人艇在内的无人平台协同干扰导弹末制导雷达研究。

2) 干扰效果评估指标提取不够全面。当前用于干扰效果评估的基础指标主要是以干扰方为切入点,基于干扰样式和干扰准则进行提取,如欺骗干扰样式多采用功率因子、压制干扰样式多采用有效概率因子,但此类方法仅适用于单一固定干扰样式的干扰机效果评估,同时由于所提取的指标针对性较强,彼此之间无法进行量化比较,进一步导致无人平台协同干扰效果无法客观评估。另外,协同干扰效果是无人干扰平台和导弹双方共同作用的结果,当前仅考虑干扰机方的思路不够全面客观,应同时挖掘威胁目标方对干扰效果造成影响的评估指标,综合敌对双方因素量化干扰效果。

3) 协同控制优化方法仍需改进。当前研究已将进化算法、种群优化算法等应用于协同控制问题求解中,但依然有以下 2 方面需要加强:一方面,目前研究更多地立足于对原有智能优化方法的改进,但受限于单一算法本身固有弊端,提升空间有限,因此后续还需要探索多种优化算法融合的思路,取长补短、相互借鉴,当前这方面的研究还处于起步阶段;另一方面,目前使用的智能优化算法大多采

用启发式随机搜索,使定量结果具有较大的不确定性,因此仍需将基础理论和应用计算相结合,科学设定算法性能界限。

4) 动态实时规划研究尚不充分。当前少数关于协同干扰的研究成果中,主要集中于对情报信息依赖较大的预先任务规划上,即在平台实施干扰之前,综合考虑已有人平台雷达目标特性,制定任务规划。实际战场环境复杂多变,干扰态势构建过程中,存在干扰平台失效或干扰目标增加等多种突发状况,若仅仅依靠预先任务规划已无法满足实际需求,必须根据战场的真实动态变化实时调整平台任务规划;因此,后续需要开展动态协同干扰任务规划研究,以提高模型在战场环境中的适用性。

### 3 结束语

上述4方面的问题一定程度上限制了干扰资源在协同干扰任务中的应用,未来以单无人平台有源干扰问题研究为基础,结合智能化思想和干扰实际特点,建立无人化协同干扰任务规划模型,以应用于实际战场和武器试验的干扰态势构建中,将成为无人化协同干扰技术发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 高泽鉴,曹菲,何川,等. 基于半监督学习网络的雷达有源干扰识别[J]. 探测与控制学报, 2022, 56(7): 93-101.
- [2] 耿凯迪. 雷达干扰效果在线评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [3] PLESSIS W P. Limiting apparent target position in skin-return influenced cross-eye jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(3): 2097-2101.
- [4] SHI J J, XUE L, BI D P. Evaluation method of jamming effect on ISAR based on symmetry cross entropy[C]// 2009 Conference on Image Analysis and Signal Processing. CHINA: Taizhou, 2009: 402-405.
- [5] 孙凤荣,冷东方,崔永久. 搜索雷达抗有源噪声干扰效果定量评估方法[J]. 航天电子对抗, 2000(3): 20-23.
- [6] 黄高明,刘勤,苏国庆,等. 雷达遮盖性干扰效果评估定量方法研究[J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 10-13.
- [7] BACHMANN D J, EVANS R J. Game theoretic analysis of adaptive radar jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1081-2000.
- [8] 宋玉珍,刘炼. 基于模糊处理的雷达干扰效果评估[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(6): 95-99.
- [9] 刘普寅,吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998: 194-200.
- [10] YANG L P, XIONG J J. Method of optimal deployment for radar netting based on detection probability[C]//2009 Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, CHINA: Wuhan, 2009: 1-5.
- [11] 员志超. 基于 RBF 神经网络的雷达干扰效能评估方法[J]. 软件导刊, 2015, 14(6): 51-53.
- [12] 王伟,杨俊安,崔琳,等. 基于支持向量机的通信干扰效果在线评估算法[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(2): 51-57.
- [13] CHRISTOPHER L J. Inverting the control ratio: human control of large autonomous teams[C]. Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Melbourne, Australia, 2003: 43-56.
- [14] 李其虎,王颖,商开栓. 多机有源无源协同探测及精度分析[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(2): 43-46.
- [15] 袁博,冯晓容,常琨. 基于智能化技术的协同作战方式[J]. 国防科技, 2019, 40(5): 127-132.
- [16] OWNBY M. Mixed initiative control of automa-teams(mica)-a progress report[C]. AIAA 3rd' Unmanned Unlimited' Technical conference. Chicago, Illinois, 2004: 101-113.
- [17] MAHMUD I, CHO Y Z. Detection avoidance and priority-aware target tracking for uav group reconnaissance operations[J]. Journal of intelligent & robotic systems: Theory & applications, 2018, 92: 81-92.
- [18] FAN D D, THEODOROU E A, REEDER J. Model-based stochastic search for large scale optimization of multi-agent UAV swarms[C]//2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). IEEE, 2018: 59-67.
- [19] ORTIZ-PENA H J, KARWAN M, SUDIT M, et al. A multi-perspective optimization approach to UAV resource management for littoral surveillance[C]//2Information Fusion (FUSION), 2013 16th International Conference on. IEEE, 2013: 978-983.
- [20] OBERMEYER K J. Visibility problems for sensor networks and unmanned air vehicles[M]. University of California at Santa Barbara, 2010: 213.
- [21] KOCER B B, TJAHJOWIDODO T, LEE SEET G G. UAV push recovery operation by symmetrical control and estimation in receding horizon[C]//15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). IEEE, 2018: 978-983.
- [22] 曾松林,王文挥,丁大春. 基于动态博弈的目标分配方法研究[J]. 电光与控制, 2011, 8(2): 15-17.
- [23] 陈华东,王树宗,王航宇. 基于混合粒子群算法的多平台多武器火力分配研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 880-883.
- [24] 唐传林,杜海文,吴文超,等. 基于博弈论的多UCAV对地攻击目标分配[J]. 电光与控制, 2011, 18(10): 28-31.

- [25] 沈阳, 陈永光, 李修和. 基于 0-1 规划的雷达干扰资源优化分配研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(5): 528-532.
- [26] DUAN X K. An improved artificial bee colony algorithm with MaxTF heuristic rule for two-sided assembly line balancing problem[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(2): 241-253.
- [27] BONYADI M R. A theoretical guideline for designing an effective adaptive particle swarm[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2019: 57-68.
- [28] JIANG H, ZHANG Y, XU H. Optimal allocation of cooperative jamming resource based on hybrid quantum-behaved particle swarm optimisation and genetic algorithm[J]. Iet Radar Sonar Navigation, 2016, 17(6): 111-115.
- [29] 陈晋鹏, 王红军, 阮星智, 等. 基于人工免疫算法的编队压制干扰资源分配[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(5): 46-49.
- [30] LI Y, DONG Y. Weapon-target assignment based on simulated annealing and discrete particle swarm optimization in cooperative air combat[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 626-631.
- [31] WEN R, ZHONG S, YUAN H, et al. Emergency resource multi-objective optimization scheduling model and multi-colony ant optimization algorithm[J]. Journal of Computer Research & Development, 2013, 50(7): 1464-1472.
- [32] 王亚辉, 吴金妹, 贾晨辉. 基于动态种群多策略差分进化模型的多目标进化算法[J]. 电子学报, 2016, 44(6): 1472-1480.
- \*\*\*\*\*
- (上接第 74 页)
- [9] 李冠龙, 许华龙, 廖英. 导弹姿态控制系统动态测试研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2001(2): 19-23.
- [10] 刘建涛. 飞行器试验评估与鉴定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] 王雨萧. 制导控制系统性能评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [12] 史海龙, 王晶晶, 杜伟. 高炮射击诸元离线式试验方法[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(1): 168-171.
- \*\*\*\*\*
- (上接第 87 页)
- [3] 勒秋硕. 基于系统识别的直升机飞行动力学建模方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [4] 唐宏清. 基于 Simulink 的直升机飞行动力学模型配平方法[J]. 中国科技信息, 2021, 2(12): 55-60.
- [5] HOFFMAN J A, DREIER M E. User's manual for the Modular Stability Derivative Program High Frequency Version(MOSTAB), PPI-530-1, Paragon Pacific, Inc[M]. Ei Segundo, CA, 1997: 70-80.
- [6] PITT D M, PETER D A. Theoretical Evaluation of Dynamic Inflow Derivatives[J]. Vertica, 1980, 5(1): 21-34.
- [7] ANDERSON W D, CONNER F, KRETSINGER P, et al. REXOR Rotorcraft Simulation Mode[R]. Lockheed, Burbank, CA, 1976: 1-303.
- [8] HEFFLEY R K, MNICH M A. Minimum-Complexity Helicopter Simulation Math Model[R]. NASA, 1988: 1-102.
- [9] GAVRILETS V, METTLER B. Dynamic model for a miniature aerobatic helicopter[R]. MIT-LIDS-P-2579, 2003: 6-8.
- [10] EREIER M E. Introduction to helicopter and tiltrotor flight simulation[M]. AmiercanInstitute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2007: 187-188.
- \*\*\*\*\*
- (上接第 93 页)
- [30] 罗远林. 无人机集群编队控制与任务分配算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [31] 成浩浩, 齐晓慧, 杨森, 等. 一种基于一致性的四旋翼无人机编队避障方法[J]. 飞行力学, 2019, 37(2): 51-55.
- [32] 熊超, 解武杰, 董文瀚. 基于碰撞锥改进人工势场的无人机避障路径规划[J]. 计算机工程, 2018, 44(9): 314-320.
- [33] 杨秀霞, 周砣砣, 张毅. 基于速度障碍圆弧法的 UAV 自主避障规划研究[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(1): 168-176.
- [34] 张宏宏, 甘旭升, 李昂, 等. 基于速度障碍法的无人机避障与航迹恢复策略[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(8): 1759-1767.
- [35] 王宏伟, 甘旭升, 韦刚, 等. 针对动态障碍物的无人机最优避撞策略[J]. 电光与控制, 2022, 29(3): 33-37.
- [36] 丁应和, 沈凯, 朱毅晓, 等. 仿雁群多固定翼无人机时变编队一致性控制方法[J]. 战术导弹技术, 2022(4): 132-138.
- [37] 赵锋, 杨伟, 杨朝旭. 无人机紧密编队飞行控制仿真研究[J]. 航空科学技术, 2012, 137(5): 14-17.
- [38] 陈春东, 魏瑞轩, 董志, 等. 无人机紧密编队协同控制设计与仿真[J]. 电光与控制, 2012, 19(7): 18-22, 27.