

[引用格式] 梁霄, 陈聪, 刘殿勇, 等. 面向自杀式无人机饱和攻击的海空跨域无人协同反制策略 [J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(2): 228-236.

面向自杀式无人机饱和攻击的海空跨域 无人协同反制策略

梁霄^{1,2}, 陈聪^{1,2}, 刘殿勇^{1,2}, 于长东^{2,3}, 李巍^{2,4}

(1. 大连海事大学 船舶与海洋工程学院, 辽宁 大连, 116026; 2. 哈尔滨工程大学 智能海洋飞行器技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 150001; 3. 大连海事大学 人工智能学院, 辽宁 大连, 116026; 4. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连, 116026)

摘要: 针对海洋环境下反制自杀式无人机饱和攻击问题, 文中研究了目标数量远超我方情况下的海空跨域无人平台协同反制策略, 提出一种结合改进的遗传算法与联盟形成博弈的协同算法。首先根据海空跨域无人平台攻击特性与运动特性, 结合最大最小策略设计代价函数; 然后结合任务需求对遗传算法进行改进, 对交叉和变异过程进行引导和限制, 在提升遗传算法效率的基础上生成可行的反制方案; 最后设计联盟形成规则, 通过联盟之间的成员变动使各联盟达到纳什稳定状态, 在算子数量较多的情况下仍能使反制方案被持续稳定优化。仿真对比实验表明所提策略具有可行性和优越性, 能在目标遭受饱和攻击时提供合理高效的反制方案, 可为大规模跨域无人集群作战研究提供参考。

关键词: 海空跨域; 自杀式无人机; 遗传算法; 联盟形成博弈

中图分类号: TJ630

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2024)02-0228-09

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2024-0007

Cooperative Countermeasure Strategy of Sea-Air Cross-Domain Unmanned Platforms for Saturation Attack of Suicide UAVs

LIANG Xiao^{1,2}, CHEN Cong^{1,2}, LIU Dianyong^{1,2}, YU Changdong^{2,3}, LI Wei^{2,4}

(1. Naval Architecture and Ocean Engineering College, DaLian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. National Key Laboratory of Autonomous Marine Vehicle Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. College of Artificial Intelligence, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 4. College of Environmental Sciences and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In view of saturation attacks of anti-suicide unmanned aerial vehicles(UAVs) in the marine environment, this paper studied the cooperative countermeasure strategy of sea-air cross-domain unmanned platforms under the condition that the number of targets far exceeded ours and proposed a cooperative algorithm combining improved genetic algorithm and coalition formation game. Firstly, according to the attack and motion characteristics of the sea-air cross-domain unmanned platform, the cost function was designed by combining the maximum and minimum strategies. Then, the genetic algorithm was improved according to the task requirements, and the crossover and mutation processes were guided and restricted. A feasible countermeasure scheme was generated by improving the efficiency of the genetic algorithm. Finally, the coalition formation rules were designed, and the coalitions reached Nash stability via changing members between the coalitions. The countermeasure scheme could still be continuously and stably optimized for many operators. The simulation comparison

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-03-08.

基金项目: 智能海洋飞行器技术全国重点实验室支持项目(2024-HYHXQ-WDZC08); 国家自然科学基金资助项目(52271302); 国防基础科研项目(JCKY2022410C012); 辽宁省应用基础研究项目(2023JH2/101300198).

作者简介: 梁霄(1980-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为海上无人系统决策与控制技术.

OPEN ACCESS

experiments show that the proposed strategy is feasible and superior and can provide a reasonable and efficient countermeasure scheme when the target is subjected to a saturation attack. This can provide a reference for research on large-scale cross-domain unmanned swarm combat.

Keywords: sea-air cross-domain; suicide unmanned aerial vehicle; genetic algorithm; coalition formation game

0 引言

近年来,无人集群作战技术^[1-3]得到了快速的发展,无人装备的主要功能已由侦察保障逐渐演变为突袭进攻,无人集群作战已成为现代战争的重要组成部分。

无人机凭借其独特的优势在军事领域得到了广泛的应用。无人机对特定目标进行饱和攻击作为一种改变战场态势的新型战法,已在多次军事行动中起到了不可忽视的作用。在面对大规模来袭无人机集群对我方目标进行饱和攻击时,制定合理有效的反制方案,将来袭无人机高效分配给我方无人平台是反制无人机集群的关键问题。考虑到无人平台续航时间有限,良好性能的目标分配算法是完成反制任务的重要保障。随着无人技术的迅速发展,执行打击任务的无人机集群将具有更加庞大的规模,而单一种类的无人平台受限于机动性能与所能搭载的武器装备,难以很好地完成日益复杂的作战任务。无人机和无人艇所组成的跨域无人系统可以很好地解决上述问题。因此,研究一种面向自杀式无人机饱和攻击的海空跨域无人协同反制策略具有重要意义。

生成合理的目标分配方案是反制任务顺利完成的保障。目前众多学者在多智能体协同目标分配领域做出了一定贡献。文献[4]针对防空火力任务分配问题提出一种链式多种群遗传算法,通过运用链式多种群环、多样性保持、分层选择、去顶操作等策略提高全局搜索能力,以较高的概率快速地搜寻到最优任务分配方案;文献[5]重点解决了分配问题中的多目标特性,通过提出一种群智能优化算法,平衡了多个成本与约束条件,采用多层优化策略求取最优的目标分配方案;文献[6]针对多阶段武器目标分配问题设计了一种集成匈牙利和模拟退火的混合智能搜索算法,通过启发式算法和精确求解技术的结合,极大地减少了求解所需的计算时间,高效求解每个阶段武器和目

标的精确匹配方案;文献[7]针对不同复杂度下的多目标任务分配问题进行了研究,改进了多约束问题模型,综合考虑多个变量产生的影响,可以在多维空间中更有效地求解最优策略;文献[8]针对异构无人机集群协同多任务分配问题,提出了一种改进的多任务分配遗传算法,该算法通过多类型基因染色体编码策略生成可行染色体,以平衡无人机能力和任务约束,通过动态调整交叉和变异群体的数量,避免主观选择仿真参数,提升了算法的优化能力与收敛效果。

上述研究成果主要集中在复杂程度较低、涉及算子数量较少的任务场景,难以在算子数量较多的情况下生成合理的目标分配方案。此外,上述研究对象均为同一类型,没有考虑功能不同的智能体组成的异构集群。文中在充分分析现有研究成果的基础上,针对海空跨域无人平台协同反制自杀式无人机饱和攻击问题,提出一种结合改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)与联盟形成博弈(coalition formation game, CFG)的协同策略(简称 CFG-IGA 方法),通过分层优化,在最大程度上提升海空跨域无人平台的协同能力。首先,基于无人平台运动属性和攻击属性,结合最大最小策略设计代价值函数,更好地评估当前反制方案;随后,对遗传算法进行改进,为染色体交叉及变异提供引导并结合无人平台特性对交叉、变异结果进行限制,以提升算法收敛效率,避免收敛到局部最优解;最后,设计了一种基于移动玩家的搜索方法,在无人平台数量庞大的情况下,可以更加快速地形成稳定的联盟结构。仿真结果表明,所提算法在处理复杂的任务场景方面具有可行性和优越性。

1 问题描述

假定所有无人平台相关信息均能通过雷达等探测设施探测得到。由于自杀式无人机数量远超海空跨域无人平台,且其目的是对我方某一重要

设施进行饱和打击,因此,只有将目标进行合理有效的分配,才能使我方无人平台在合理时间内尽量消灭来袭目标。

上述海空跨域无人平台被考虑为由大型无人艇及察打一体无人机组成。其中,大型无人艇携带有数量有限的对空导弹,可以在任意位置完成对自杀式无人机的打击任务,可打击的自杀式无人机数量不能超过该大型无人艇的载弹量;察打一体无人机仅能在靠近自杀式无人机一定范围内才可以对该自杀式无人机进行攻击,且可打击的自杀式无人机数量为受搭载装备影响的定值。设 $OS = \{OS_1, OS_2, \dots, OS_I\}$ 为大型无人艇集合, I 为大型无人艇数量; $OA = \{OA_1, OA_2, \dots, OA_J\}$ 为察打一体无人机集合, J 为察打一体无人机数量; $T = \{T_1, T_2, \dots, T_K\}$ 为自杀式无人机集合, K 为自杀式无人机数量; 其中, $I+J < K$ 。设 $S = \{S_{mn}\} \in R^{(I+J) \times K}$ 是一个二进制决策矩阵, 其中, 如果第 m 个察打一体无人机分配到第 n 个目标, 则 S_{mn} 为 1, 否则为 0; 如果第 m 个大型无人艇分配到第 n 个目标, 则 $S_{(m+J)n}$ 为 1, 否则为 0。在任务过程中考虑 2 个约束, 如式(1)~(3)所示。

$$\sum_{n=1}^K S_{mn} > 0, m \leq I+J \quad (1)$$

式(1)表示每个我方无人平台最少负责 1 个自杀式无人机的打击任务。

$$\sum_{m=1}^M S_{mn} = 1, n \leq K \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{mn} = K \quad (3)$$

式(2)与式(3)表示每个目标无人平台只由 1 个我方无人平台负责打击, 且所有目标无人平台均被分配。

2 代价函数设计

代价函数的构建综合考虑了各平台机动性能差异、相对位置、各目标相对角度差异、打击能力及防御能力。构建多属性代价函数, 并以此为我方各无人平台分配打击目标。

2.1 由机动性能差异造成的代价

$V_O = \{V_{OA1}, V_{OA2}, \dots, V_{OAJ}\}$ 为察打一体无人机

机动性参数集合, $V_T = \{V_{T1}, V_{T2}, \dots, V_{TK}\}$ 为自杀式无人机机动性参数集合。所述机动性能包含无人平台最大速度及最大转向能力。由机动性能差异造成的代价定义为

$$f_{OA, athletic} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (V_{OSj} - V_{TK}) \cdot S_{jk} \quad (4)$$

2.2 由位置差异造成的代价

由于各无人平台在高度维度上的差异较小, 因此将环境简化为二维环境, 设第 i 个大型无人艇位置为 (x_{OAi}, y_{OAi}) , 第 j 个察打一体无人机位置为 (x_{OSj}, y_{OSj}) , 第 k 个自杀式无人机位置为 (x_{Tk}, y_{Tk}) 。对于大型无人艇来说, 相对位置造成的代价仅受相对距离影响, 即

$$f_{OS, position} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sqrt{(x_{OAi} - x_{Tk})^2 + (y_{OAi} - y_{Tk})^2} \cdot S_{(J+i)k} \quad (5)$$

对于察打一体无人机来说, 相对位置造成的代价由相对距离和相对角度两部分组成, 相对距离造成的代价定义为

$$f_{OA, position} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sqrt{(x_{OSj} - x_{Tk})^2 + (y_{OSj} - y_{Tk})^2} \cdot S_{jk} \quad (6)$$

相对角度造成的代价定义为

$$f_{OA, angle} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K |\theta_{jk} - \bar{\theta}_j| \cdot S_{jk} \quad (7)$$

式中: $\theta_{jk} = \arctan((y_{OSj} - y_{Tk}) / (x_{OSj} - x_{Tk}))$ 表示第 j 个察打一体无人机与第 k 个自杀式无人机的相对角度; $\bar{\theta}_j = \sum_{k=1}^K \theta_{jk} / \sum_{k=1}^K S_{jk}$ 表示第 j 个我方无人平台与该平台所有待打击目标相对角度的平均值。

2.3 由打击和防御能力差异造成的代价

$P_{OS} = \{P_{OS1}, P_{OS2}, \dots, P_{OSJ}\}$ 为察打一体无人机打击能力集合, $P_T = \{P_{T1}, P_{T2}, \dots, P_{TK}\}$ 为自杀式无人机防御能力集合。各无人平台均有受所搭载的武器装备类型影响的杀伤力数值, 且都有受平台类型影响的确定的生命点数值。目标被打击后, 生命点会根据武器杀伤力数值减少, 目标的生命点减为 0 时算作击毁。所述打击能力即无人平台搭载武器杀伤力数值, 所述目标防御能力即无人平台生命点数值。由于打击能力与目标防御能力

差异造成代价定义为

$$f_{OA, kill} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \frac{P_{Tk} \cdot S_{jk}}{P_{OSj}} \quad (8)$$

综上,代价函数 f 为

$$f = \omega_1 \cdot f_{OA, athletic} + \omega_2 \cdot f_{OS, position} + \omega_3 \cdot f_{OA, position} + \omega_4 \cdot f_{OA, angle} + \omega_5 \cdot f_{OA, kill} \quad (9)$$

3 CFG-IGA 方法

该问题的求解可以转化为具有多约束的多目标优化问题,为了解决这个问题,引入遗传算法,但随着场景中平台数量的增加,搜索空间的规模增大,遗传算法无法在合理的时间内求出最优解。因此,将 IGA 与 CFG 的思想相结合,并将最大最小策略应用于适应度函数的设计,提出一种 CFG-IGA 协同算法。该算法由 3 个核心部分组成: 1) 基于最大最小法设计适应度函数,避免了分配结果不均造成有限资源被浪费; 2) 对遗传算法进行改进,对染色体采用整数编码,为染色体交叉及变异提供引导,结合无人平台特性对交叉及变异结果进行限制,提升算法收敛效率,避免收敛到局部最优解; 3) 算法在迭代后生成初始反制方案,设计联盟形成规则,随后基于联盟形成博弈对初始方案进行优化,求取最优反制方案。

3.1 适应度函数设计

为了避免目标分配结果过于不均导致资源浪费的情况,设计基于最大最小代价值^[9-10]的适应度函数,将优化问题转化为求我方各无人平台最大代价值最小,但仅以我方各无人平台最大代价值最小为适应度函数无法求出最优解,因此,在此基础上增加总代价值影响,最终适应度函数为

$$F = \min(\max(f_j) + \omega_5 \cdot f) \quad (10)$$

式中, f_j 表示第 j 个察打一体无人机打击所分配自杀式无人机的代价值。

3.2 初始反制方案生成

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法^[11-12]。文中对遗传算法进行改进,以优化遗传算法在该问题下的求解效率。

对种群中个体染色体采用整数编码,每个个体中染色体个数与目标数量相同,种群中每个个体的染色体编码组合都是一组可行的反制方案。某

个体中第 i 个染色体编码为 j ,即代表我方第 j 个无人平台负责对第 i 个目标的打击任务。以 3 个我方无人平台与 10 个目标无人平台为例,若第 n 代种群中,第 x 个个体染色体编码组合为{1,3,2,2,3,1,1,3,2,2},该个体代表的反制方案为:我方第 1 个无人平台打击第 1、第 6 和第 7 个目标无人平台;我方第 2 个无人平台打击第 3、第 4、第 9 和第 10 个目标无人平台;我方第 3 个无人平台打击第 2、第 5 和第 8 个目标无人平台。种群中个体染色体的交叉和变异以及个体的进化和淘汰均由适应度函数计算得出的适应度值决定。每个个体染色体编码组合相关元素可以由二元组 $\{C, F\}$ 表示,其中 C 表示代表该反制方案的染色体编码组合, F 表示该反制方案下适应度值大小。

在个体染色体交叉过程中,文中使用双点交叉,交叉点 1 与交叉点 2 均为随机产生,如图 1 所示。不再设置交叉和变异概率,而是所有个体都需要经过交叉和变异过程。当交叉和变异所得到的子代染色体组合所代表的反制方案使得分配给某个大型无人艇的自杀式无人机数量超过该大型无人艇载弹量,或者使得分配给某个察打一体无人机的自杀式无人机数量超过其所能打击目标的最大数量时,该子代染色体适应度值为 0。当交叉和变异产生的子代适应度值高于父代时,则用子代染色体组合替换父代染色体组合,否则设置随迭代次数不断减小的自适应概率 $p = 1 - \omega_6 \cdot e$,式中: e 为当前迭代次数与最大迭代次数的比值;

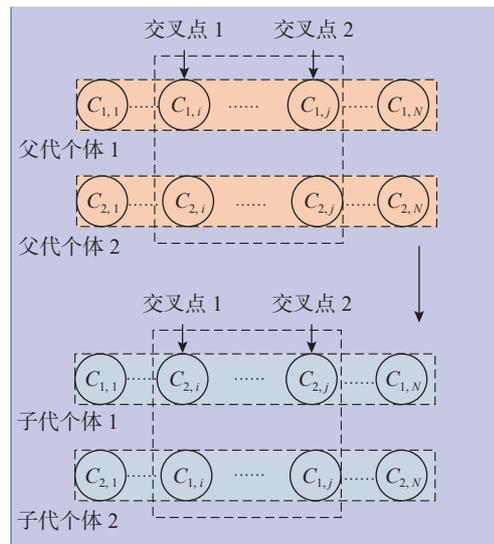


图 1 双点交叉

Fig. 1 Two-point crossing

ω_6 为0~1之间的比例系数。并生成一个0~1之间的随机数 r , 判断是否替换父代染色体组合, 当 $r < p$ 时, 用子代染色体组合替换父代染色体组合, 否则将保留父代染色体组合。

3.3 联盟形成博弈优化

由于遗传算法在面对复杂场景时, 无法在有限合理的时间内得到最优解, 因此, 将改进后遗传算法解得的反制方案作为输入, 构建联盟形成博弈模型, 对反制方案进行优化, 最终得到该问题的最优解。

以我方各无人平台为核心建立联盟, 各无人平台待打击目标作为联盟成员, 联盟形成示意图如图2所示^[13-15]。各联盟之间不重叠, 即1个无人平台只能参与1个联盟, 联盟的集合定义为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{I+J}\}$ 。其中, $S_k \cap S_{k'} = \emptyset, k \neq k'$ 。每个联盟的收益集合定义为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_{I+J}\}$ 。各联盟的收益定义为

$$R_{S_i} = -(J_i) - \omega_5 \cdot J \quad (11)$$

总收益定义为

$$F = \min_{i \in M} R \quad (12)$$

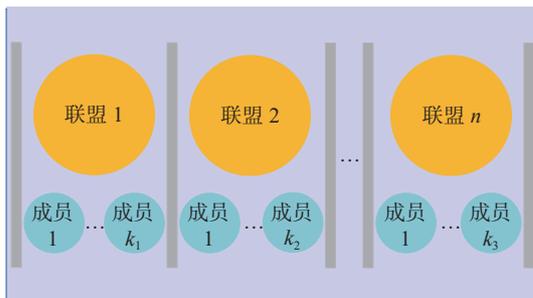


图2 联盟形成博弈

Fig. 2 Diagram of coalition formation games

在博弈过程中, 各联盟成员通过退出当前联盟加入其他联盟, 或与其他联盟成员互换联盟的方式实现任务总收益的最大化。

若满足

$$R + R_{\text{edge}} > R \quad (13)$$

式中, R_{edge} 表示第 j 个目标无人平台加入第 i 个联盟后为总收益带来的边际收益(第 j 个目标无人平台与第 j' 个目标无人平台分别加入对方的联盟后为总收益带来的边际收益)。

则第 j 个目标无人平台可以加入第 i 个联盟(第 j 个目标无人平台与第 j' 个目标无人平台可以

分别加入对方的联盟)。称第 j 个目标无人平台(第 j 个目标无人平台与第 j' 个目标无人平台)具有加入其他联盟的动机。

联盟划分中, 如果所有的无人平台都没有离开当前联盟加入其他联盟的动机, 则认为该划分是纳什稳定的。所得各联盟中成员分布为该反制问题最优解。图3描述了上述算法主要流程。

- Step 1) 参数初始化, 生成包含 X 个个体的初始种群, 为种群中每个个体生成 N 个染色体并随机编码;
- Step 2) 计算当代种群中每个个体的适应度值;
- Step 3) 按一定比例选取适应度值高的个体, 将其染色体组合储存起来;
- Step 4) 对种群中每个个体中的每个染色体分别进行交叉变异过程;
- Step 5) 计算种群中每个个体的适应度值;
- Step 6) 按一定比例选取适应度值高的个体, 将其染色体组合与储存起来的染色体组合进行比较;
- Step 7) 按一定比例综合选取适应度值高的染色体组合替换掉储存的染色体组合;
- Step 8) 按一定比例淘汰掉适应度值低的个体, 其染色体组合由储存的染色体组合替代, 产生新一代种群;
- Step 9) 判断是否达到最大迭代次数, 若没有则返回 Step 4), 否则进入 Step 10);
- Step 10) 以我方各无人平台为联盟核心建立联盟, 各无人平台待打击目标作为联盟成员;
- Step 11) 判断每个联盟中的每个成员是否具有加入其他联盟的动机;
- Step 12) 如果有动机则该成员加入该联盟并返回 Step 11), 否则进入 Step 13);
- Step 13) 判断任意 2 个联盟中的任意 2 个成员是否具有加入对方联盟的动机;
- Step 14) 如果有动机则两成员分别加入对方的联盟并返回 Step 13), 否则进入 Step 15);
- Step 15) 将联盟中成员分布作为结果返回。

图3 结合改进遗传算法与联盟形成博弈的协同反制方法流程

Fig. 3 Flow chart of CFG-IGA collaborative counter-measures method

4 仿真实验

4.1 场景设计

为了更充分地表明文中所提 CFG-IGA 方法的可行性与优越性, 设置了 3 种仿真任务场景, 各场景均包含 10 艘大型无人艇、20 架察打一体无人机及 120 架自杀式无人机。自杀式无人机集群采用从不同方向协同入侵, 具有提高打击效果、分散敌

方防御、增强作战灵活性等优势,且任务完成时间与自杀式无人机分布集中程度密切相关,因此,假设自杀式无人机对目标呈现包围态势,设置场景1~3中自杀式无人机所分布的环形区域环宽分别为1、3、5 n mile。

参考目前被广泛应用的低成本自杀式无人机类型,假设文中自杀式无人机搭载视觉传感器且具有较高的智能性,可以探测到距自身1 n mile范围内的察打一体无人机并采取逃逸策略。根据当前实际装备情况,假设察打一体无人机搭载机枪武器打击范围为0.25 n mile,最大打击目标数量为10个。假设大型无人艇搭载对空导弹数量为2~3枚。

考虑到场景中无人平台数量较多,同一类无人平台可能存在多种型号。假设自杀式无人机存在4种不同的型号,分别记为A型、B型、C型与D型;假设察打一体无人机存在2种不同的型号,分别记为E型与F型;假设大型无人艇存在2种不同的型号,分别记为G型与H型。需要说明的是,在仿真实验中,同一类无人平台总数是固定的,但同一类同一型号的无人平台数量并不固定。此

外,为了贴近实际使用情况,同一类同一型号的无人平台具有相同的参数,同一类不同型号的平台参数存在一定差异。仿真环境具体设置见表1。最大迭代次数设置为500,种群中个体数量设置为100。为了衡量所提出算法的效果,与改进的遗传算法进行比较。

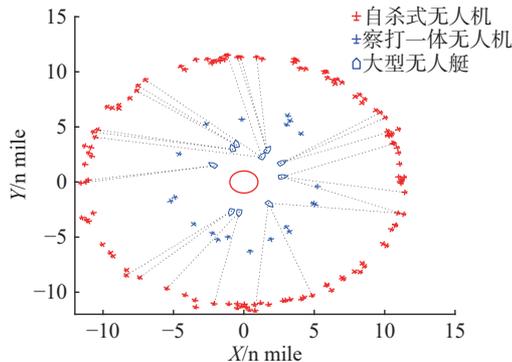
表1 仿真环境设置

Table 1 Simulation environment setting

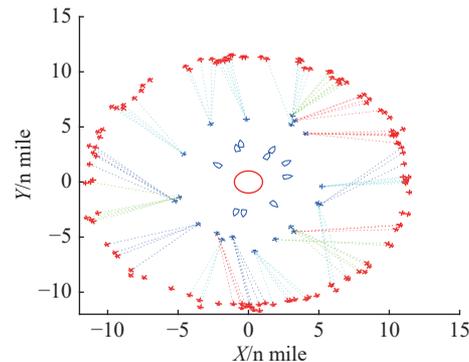
参数	数值
仿真区域	25 n mile×25 n mile
自杀式无人机 机动性能	1(A型)、1.2(B型)、1.4(C型)、1.6(D型)
自杀式无人机 防御能力	5(A型)、7(B型)、9(C型)、11(D型)
察打一体无人机 机动性能	3(E型)、4(F型)
察打一体无人机 攻击能力	2(E型)、4(F型)
大型无人艇载弹量	2(G型)、3(H型)

4.2 可行性验证

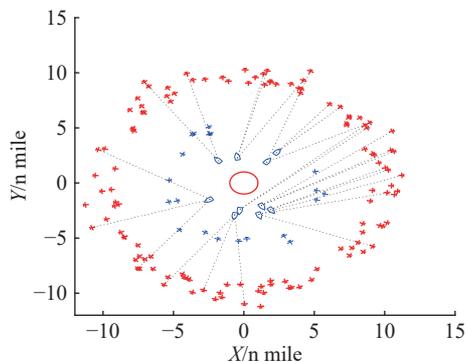
图4显示了3种任务场景的反制方案结果,由于场景中算子数量较多,为了实验结果更加清晰,将大型无人艇及察打一体无人机的反制方案分别



(a) 场景1



(b) 场景2



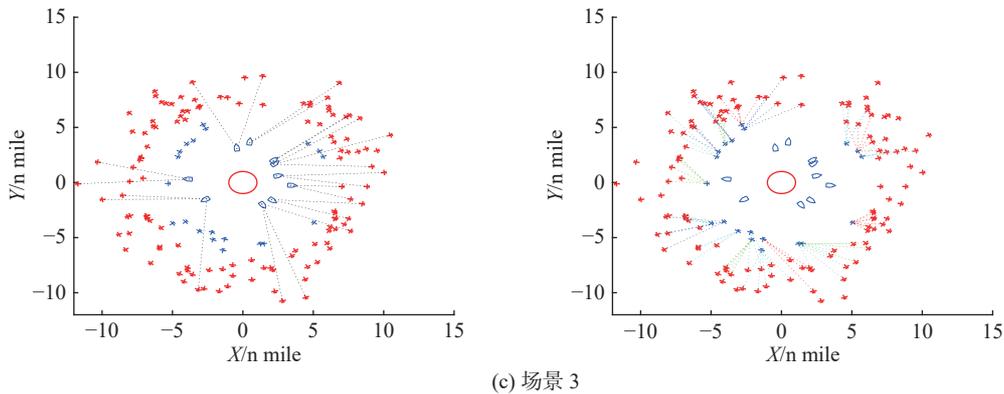


图4 各场景反制方案

Fig. 4 Countermeasures of each scene

表示。图中黑色虚线表示自杀式无人机与大型无人艇之间的分配关系；彩色虚线表示自杀式无人机与察打一体无人机之间的分配关系；红色圆表示被保护区域位置。

在每个场景中，所有来袭目标都被分配给了我方无人平台，所有大型无人艇均分配到了与其载弹量相匹配的目标数目。在场景1中，任务区域上半部分分布有7架察打一体无人机，但存在69架自杀式无人机从该方向入侵，属于防卫薄弱区域。在场景2中，任务区域右半部分分布有7架察打一体无人机，但存在65架自杀式无人机从该方向入侵，属于防卫薄弱区域。在场景3中，任务区域左半部分仅分布有6架察打一体无人机，但存在58架自杀式无人机从该方向入侵，属于防卫薄弱区域。反制方案显示，各场景中，防御薄弱区域分别有16架、18架、17架自杀式无人机被分配给了大型无人艇，分别占各场景中大型无人艇载弹量总数的64%、72%、73.9%。此外，各场景中防卫薄弱区域均存在数量不等的自杀式无人机被分配给了非防卫薄弱区域内的察打一体无人机。这表明，该分配方案很好地平衡了整个战场的任务耗时，使得海空异构无人平台在面对自杀式无人机饱和和攻击时具有较好的协同反制能力。综合考虑各无人平台特征参数和各无人平台分布情况，文中所提出的协同反制策略合理有效。

4.3 优越性验证

图5显示了2种算法在任务场景中代价值随算法运行时间的变化曲线。由图中可以看出，当场景中平台数量极大的情况下，文中算法在运算

效率上逐渐优于改进的遗传算法。

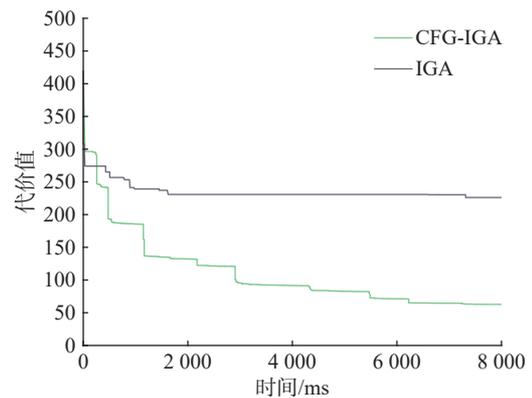


图5 代价值变化曲线

Fig. 5 Curves of value

图6显示了2种算法在任务场景中收敛时间对比。由图可以看出，CFG-IGA算法在收敛时间上明显优于IGA算法。因此，与IGA算法相比，CFG-IGA算法可以更快得到更优的反制策略。这是由于场景中包含算子数量极大，可选择的反制方案数量极为庞大，遗传算法很难从中收敛。即

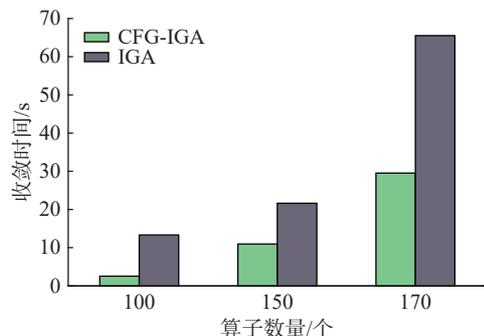


图6 收敛时间对比图

Fig. 6 Comparison of convergence time

使遗传算法最终收敛也极大可能收敛到局部最优解而非全局最优解。而 CFG-IGA 算法受益于联盟形成博弈的搜索方法,可以在保障决策时间的基础上,持续稳定地对反制方案进行优化。

图 7 显示了 CFG-IGA 算法所得反制方案在 3 种场景下的推演过程图。图中,自杀式无人机图标由红色变为黑色,代表该自杀式无人机被击毁而失去行动能力。在场景 1 中,大型无人艇完成打击任务时间为 66 s,察打一体无人机完成打击任务时间为 577 s;场景 2 中,大型无人艇完成打击任务时间为 64 s,察打一体无人机完成打击任务时间

为 592 s;场景 3 中,大型无人艇完成打击任务时间为 70 s,察打一体无人机完成打击任务时间为 616 s。在同样的运行时间下,相较于 IGA 算法,CFG-IGA 算法在各场景中完成反制任务时间分别提前了 445 s, 421 s, 389 s。由于自杀式无人机具有较高的智能性,距离目标区域越近的自杀式无人机威胁性越高。CFG-IGA 算法可以更快地完成反制任务也意味着自杀式无人机在距离目标区域更远的位置被击毁。因此,相较于 IGA 算法,CFG-IGA 算法可以更有效地适用于复杂场景中的反制问题。

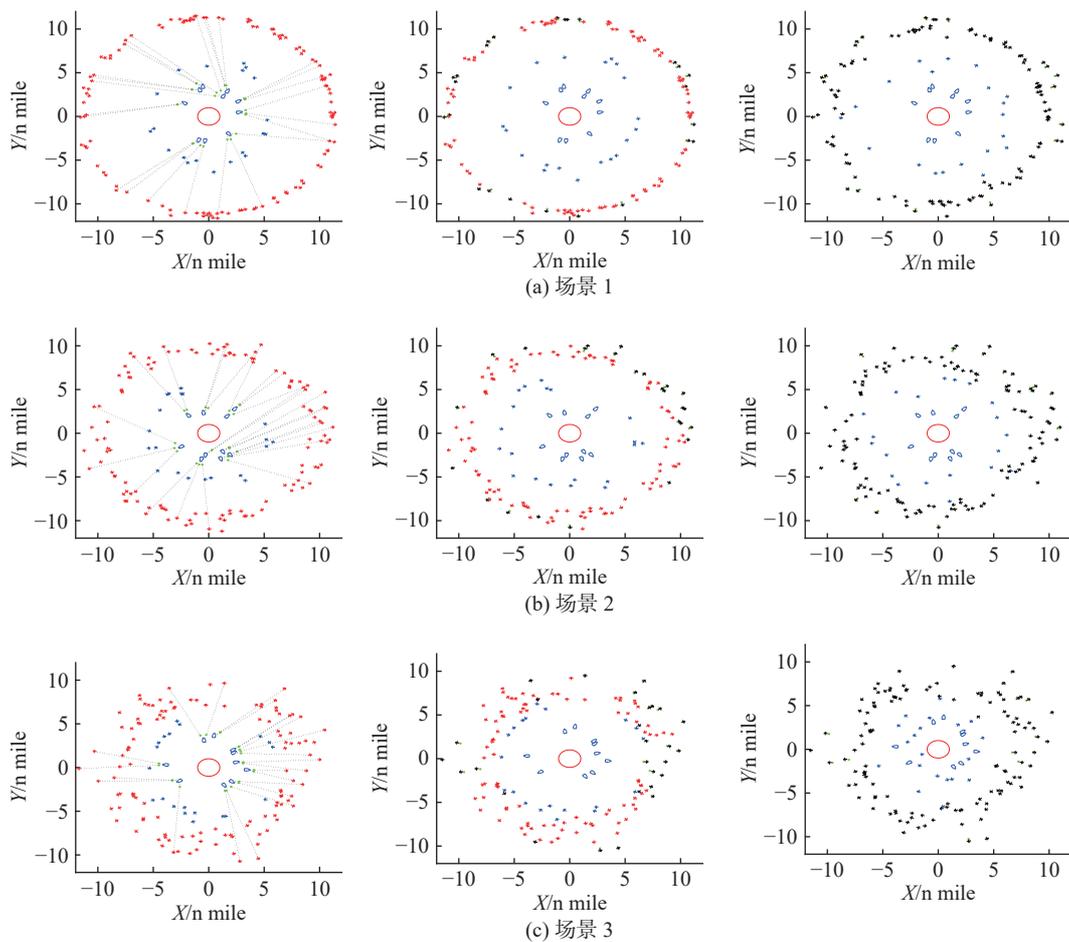


图 7 各场景推演过程图

Fig. 7 Deduction process of each scene

5 结束语

文中提出了一种面向自杀式无人机饱和攻击的海空跨域无人协同反制策略,用于解决面对自杀式无人机饱和打击情况下的反制问题。在面对水下无人系统学报 sxwrxtxb.xml-journal.net

大规模自杀式无人机饱和攻击时,场景中算子数量的增加导致现有算法很难在合理时间内得到最优反制方案。文中将改进后的遗传算法与联盟博弈相结合,实现了复杂场景中多目标多属性分层优化。该算法在缩短求解时间及优化运算结果上

具有优越性,可以很好地适用于复杂场景下海空异构无人飞行器反制自杀式无人机饱和和攻击问题,也能为其他大规模跨域作战提供参考。

虽然文中所提算法在一定程度上提升了生成反制方案的实时性,但随着算子数量的持续增加,可选择的反制方案数量呈指数增长,这将极大延长反制方案的生成时间。且包含敌我双方平台数量及分布情况的战场态势实时变化,因此保证生成反制方案的实时性更加满足实际情况下的需求,这也是下一阶段研究的重点。此外,文中研究的场景较为特殊,在实际应用中,需要根据无人平台类型与搭载的武器装备对算法进行适当调整。

参考文献:

- [1] 陈士涛,李大喜,孙鹏,等. 美军智能无人机集群作战样式及影响分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(11): 1113-1118.
Chen Shitao, Li Daxi, Sun Peng, et al. Analysis on the development and influence of intelligent unmanned aerial vehicle cluster in U.S. army[J]. Journal of CAEIT, 2021, 16(11): 1113-1118.
- [2] Jordan J. The future of unmanned combat aerial vehicles: An analysis using the three horizons framework[J]. Futures, 2021, 134: 102848.
- [3] Kiick D M. Unmanned vehicle mission-level autonomy applications to the littoral combat ship[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2012, 31(2): 175-178.
- [4] 唐俊林,张栋,王孟阳,等. 改进链式多种群遗传算法的防空火力任务分配[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(6): 19-27.
Tang Junlin, Zhang Dong, Wang Mengyang, et al. Air defense firepower task assignment based on improved chainlike multi-population genetic algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(6): 19-27.
- [5] Hua X, Wang Z, Yao H J, et al. Research on many-to-many target assignment for unmanned aerial vehicle swarm in three-dimensional scenarios[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021, 91: 107067.
- [6] 常雪凝,石建迈,陈超,等. 基于匈牙利-模拟退火算法的多阶段武器目标分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(11): 3516-3523.
Chang Xuening, Shi Jianmai, Chen Chao, et al. Multi-stage weapon target assignment method based on the integrating of Hungarian and simulated annealing algorithms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(11): 3516-3523.
- [7] Ramirez-Atencia C, Camacho D. Constrained multi-objective optimization for multi-UAV planning[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(6): 2467-2484.
- [8] Ye F, Chen J, Tian Y, et al. Cooperative task assignment of a heterogeneous multi-UAV system using an adaptive genetic algorithm[J]. Electronics, 2020, 9(4): 687.
- [9] Liao W, Wei X H, Lai J Z. Minmax fuzzy deterministic policy gradient for zero-sum differential game: Take pursuit-evasion problem as example[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 41(1): 1069-1082.
- [10] Tanuja L A, Kanth R J. Multi labeled imbalanced data classification based on advanced min-max machine learning[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 9(1): 1776-1778.
- [11] 马金慧,杨玉,李存华,等. 基于交叉熵-遗传算法的武器目标分配问题研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2021, 41(1): 68-74.
Ma Jinhui, Yang Yu, Li Cunhua, et al. Research on weapon target assignment problem based on cross entropy-genetic algorithm[J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering and Technology Edition), 2021, 41(1): 68-74.
- [12] 王庆贺,万刚,柴峥,等. 基于改进遗传算法的多机协同多目标分配方法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(9): 2597-2601.
Wang Qinghe, Wan Gang, Chai Zheng, et al. Multiple targets assignment of multiple UAVs' cooperation based on improved genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(9): 2597-2601.
- [13] 郑士源. 合作博弈理论的研究进展——联盟的形成机制及稳定性研究综述[J]. 上海海事大学学报, 2011, 32(4): 53-59.
Zheng Shiyuan. Advance study on cooperative game theory: Review on study of formation mechanism and stability of coalition[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2011, 32(4): 53-59.
- [14] 陈侠,赵明明,徐光延. 基于合作联盟的多无人机对地攻防对抗策略[J]. 兵工自动化, 2014, 33(1): 49-55.
Chen Xia, Zhao Mingming, Xu Guangyan. Multiple UAV operation strategy attack-defense confrontation to ground based on cooperative alliance[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(1): 49-55.
- [15] Yang X M, Luo H, Sun Y, et al. Coalitional game-based cooperative computation offloading in MEC for reusable tasks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(16): 12968-12982.

(责任编辑: 陈 曦)