

面向无人机集群攻击的防空武器防御部署

郭 亮¹, 杨辉跃¹, 李 明¹, 余樱乔²

(1. 联勤保障部队工程大学, 重庆 401331; 2. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072)

摘要: 针对要地反无人机集群攻击的防空武器部署问题, 建立分层非线性优化模型, 给出防空武器部署解决方案。首先, 考虑无人机航路捷径、防空武器防御边界, 对无人机集群威胁程度进行建模; 其次, 依据防空武器最大拦截距离、保护目标相对位置和无人机集群航路边界, 划分武器部署区域, 进而建立部署优化模型的目标函数与约束条件; 最后, 设计遗传算法求解优化模型, 示例分析显示了优化模型和算法以及部署方案的有效性, 该算法相较于一般遗传算法在求解效率上有一定优势。

关键词: 要地防空; 无人机集群; 优化模型; 遗传算法; 防空武器部署

中图分类号: TP18; E926.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-0673(2026)01-0042-06

Defensive Deployment of Air Defense Weapons for UAV Swarm Attacks

GUO Liang¹, YANG Huiyue¹, LI Ming¹, YU Yingqiao²

(1. Joint Logistics Support Force University of Engineering, Chongqing 401331, China;

2. Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China)

Abstract: Aiming at the problem of air defense weapons deployment of anti-unmanned aerial vehicle (UAV) swarm attacks in strategic areas, a hierarchical nonlinear optimization model is established to provide the solution of air defense weapons deployment. Firstly, considering the UAV route shortcuts and the defensive boundaries of air defense weapons, the threat level of the UAV swarm is modeled. Secondly, based on the maximum interception distance of air defense weapons, the relative position of the protected targets, and the boundaries of the UAV swarm routes, the weapons deployment zones are divided. Subsequently, the objective function and constraints of the deployment optimization model are established. Finally, a genetic algorithm is designed to solve the optimization model. The example analysis demonstrates the effectiveness of the optimization model, algorithm, and deployment scheme. Compared with the general genetic algorithm, the proposed algorithm has some advantages in solving efficiency.

Key words: strategic areas air defense; UAV swarm; optimization model; genetic algorithm; air defense weapons deployment

无人机集群作战凭借其低成本、大规模和高自主协同等特性, 已构成现代防空作战的严峻挑战。这一挑战在远海岛礁等要地中尤为突出。此类要地面积狭小、防御纵深浅, 导致对来袭无人机集群的发现距离近、预警时间短, 极大地增加了反制难度^[1-3]。因此, 研究适用于要地反无人机集

群技术手段具有紧迫的现实意义。

要地反无人机集群的技术手段可分为软杀伤与硬杀伤两类^[4-5]。硬杀伤手段作为末端防御的关键环节, 包括密集火力打击、蜂群对抗及摧毁“蜂巢”等战术。密集火力打击常依托高能微波、高能激光、近防速射炮等防空武器构成火力网^[6]。在此

背景下,如何针对要地特点,优化配置与部署多类异构防空武器,构建一套能够密切协同、高效拦截的火力体系,成为提升要地反无人机集群作战效能的核心问题之一^[7]。该问题本质上是一个典型的多主体、高维度、强约束的非线性优化问题^[8]。

围绕此问题,国内外学者开展了富有成效的探索。现有研究大致归纳为两个方向。1)基于优化算法的部署模型构建。例如:文献[9]针对要地面积狭小、兵力有限的特点,分析火力杀伤纵深与正面掩护宽度,建立了火力单元配置距离计算模型;文献[10]应用排队论分析防空导弹系统拦截低慢小目标的效能。2)多目标约束下的效能评估与优化。例如:文献[11]提出环形、扇形与线形相结合的混合部署策略,实现多层次拦截;文献[12]利用嵌套粒子群算法,以威胁指数最小化为目标求解部署方案;文献[13]结合遗传算法与威胁函数量化防护效能以优化配置。

然而,多数模型在应对要地反无人机集群作战的极端复杂性时仍存在不足,它们往往侧重于单一维度优化,未能系统性整合来袭敌群的多元威胁评估、要地保卫目标差异化的防护需求、异构防空武器平台的性能差异,以及复杂地形条件的空间制约等多重关键因素,限制了部署方案在真实战场环境下的适应性与鲁棒性。鉴于此,立足要地防空的真实约束条件,旨在构建一个能够同时权衡来袭威胁、武器效能与地形限制的优化模型,为提升要地防空体系的反集群作战能力提供更贴近实战、更具系统性的理论支撑与解决方案。

1 要地反无人机集群防御场景

要地反无人机集群作战,需应用多类防空武器,构建多维防卫体系^[14]。为使本文研究具有普适性,调研国内外典型的要地防御作战场景,构设如图1所示的要地反无人机集群防御场景。

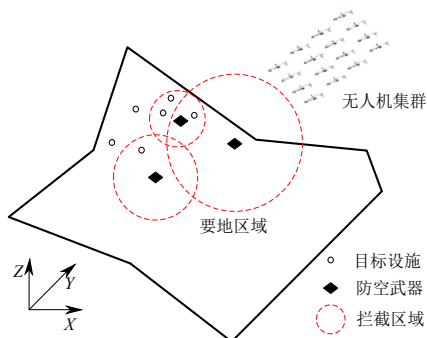


图1 要地反无人机集群防御场景

图1中,在一定距离外投放小型无人机蜂群,对随机分布的要地多个目标发动突袭。使用不规则图形对要地区域进行描述,用于限制防空武器的部署范围。要地反无人机集群的防御场景,需根据要地地形、目标设施数量、防空武器类型和数量,以及无人机集群来袭方向,以尽最大能力保护目标设施为目的,对要地防空武器进行部署,形成有效防御圈,如图1中叠加显示的红色虚线圈。

2 防御部署模型建立

2.1 问题分析

根据要地反无人机集群防御场景,采取梯次部署、重点防卫、尽远拦截的策略展开研究,将多个目标设施、资源受限、部署位置约束的防空武器部署问题转化为分层非线性优化问题。

要地反无人机集群防御场景下,假设有 N 个目标设施, L 类防空武器, M 个来袭方向的无人机集群。在该优化问题中,决策变量为防空武器的部署位置,要地防卫地形是约束条件,优化目标是使要地目标设施损失最小化。考虑要地目标设施损失与无人机集群威胁程度有关,将目标损失表示问题转化为无人机威胁评估,利用单架无人机毁伤时间和有效拦截时间窗口,建立威胁评估模型。考虑要地限制约束,以不同类型防空武器性能参数和来袭无人机的威胁程度为依据划分区域,建立强约束条件,增强模型的适应性。

2.2 无人机集群威胁评估

文献[11]基于攻击路线和攻击距离对无人机威胁进行描述。基于此,进一步量化无人机集群航路捷径、无人机集群到防空武器攻击区远界的时间这两个因素,构建无人机集群威胁评估模型。

1)无人机集群航路捷径影响因子。无人机集群航路捷径指要点目标设施或防空武器到无人机集群航路水平投影的垂直距离,如图2所示。

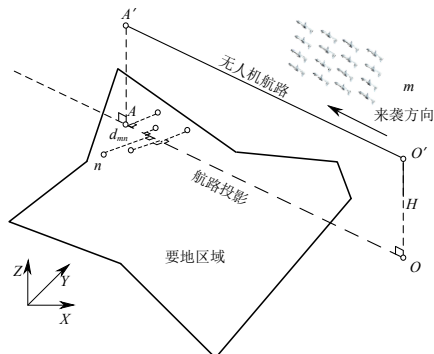


图2 无人机航路捷径

假设无人机群飞行高度为 H , 将无人机航路 $O'A'$ 投影到要地平面, 得到航路投影 OA , 设第 m 个无人机编组对第 n 个要地目标设施的航路捷径为 d_{mn} (其中: $m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$), 则取第 m 个无人机编组的航路捷径为

$$D_m = \sum_{n=1}^N d_{mn} \quad (1)$$

无人机集群威胁与航路捷径呈负相关, 航路捷径越小, 则威胁越大, 采用负指数形式表示无人机集群 m 的航路捷径影响因子:

$$\mu_m = e^{-k_1 D_m^2} \quad (2)$$

式中, k_1 为调节系数, $k_1 \in [0, 1]$ 。

2) 无人机集群到防空武器攻击区远界的时间影响因子。假设无人机飞行速度固定, 可将无人机集群到防空武器攻击区远界的时间计算, 转换为计算无人机群到要地目标的距离与防空武器攻击半径之差。该值与防空武器部署位置有关, 可依据航路捷径点分成两段计算。

武器防空区如图 3 所示。设第 l 类防空武器部署位置为 (x_l, y_l) , $1 \leq l \leq L$; 第 n 个要地目标设施的坐标为 (x_n, y_n) , $1 \leq n \leq N$ 。利用三角函数关系, 可推出防空武器攻击区远界到要地防卫目标的距离, 然后根据无人机飞行速度 v , 得到防空武器攻击区远界的时间。

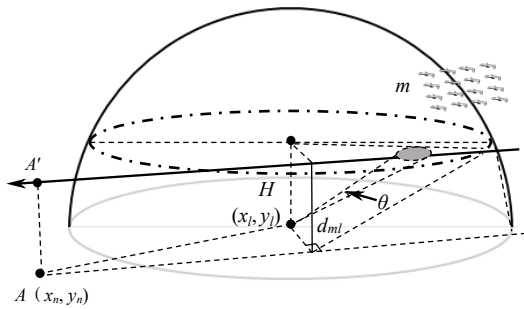


图3 武器防空区

第 m 组无人机集群到第 l 类防空武器攻击区远界的时间为

$$T_m^l = \frac{1}{v} \left(\sqrt{(x_l - x_n)^2 + (y_l - y_n)^2 - (d_{ml})^2} + \sqrt{(R^l)^2 - H^2 - (d_{ml})^2} \right) \quad (3)$$

式中: d_{ml} 为第 m 个无人机编组到第 l 类防空武器的航路捷径; R^l 为第 l 类防空武器的拦截半径; H 为无人机集群飞行高度。

无人机集群到防空武器攻击区远界的时间越长, 则要地防空准备时间越充分, 无人机集群的威胁程度越小。因此, 无人机集群 m 到防空武器攻击区远界的时间影响因子可表示为负指数函数:

$$\gamma_m = e^{-k_2 T_m^2} \quad (4)$$

式中: $T_m = \min \{T_m^l, 1 \leq l \leq L\}$; k_2 为调节系数, $k_2 \in [0, 1]$ 。

综合无人机集群航路捷径、无人机集群到防空武器攻击区远界的时间两个影响因子, 得到无人机集群 m 的威胁评估:

$$\eta_m = e^{-k_1 D_m^2} \times e^{-k_2 T_m^2} \quad (5)$$

2.3 模型约束

防空武器部署区域划分如图 4 所示。在敌来袭方向上, 考虑各类防空武器拦截距离, 分为远中近 3 类防空武器, 分别用 I、II、III 表示。然后, 将要地防御纵深由远及近分为 3 段, 依次为远距离防空武器部署区域 S_1 、中距离防空武器部署区域 S_2 、近距离防空武器部署区域 S_3 , 进而形成防空武器部署位置的强约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} (x_i^I, y_i^I) \in \{S_1\}; \\ (x_j^{II}, y_j^{II}) \in \{S_2\}; \\ (x_k^{III}, y_k^{III}) \in \{S_3\}. \end{cases}$$

其中, (x_i^I, y_i^I) 、 (x_j^{II}, y_j^{II}) 、 (x_k^{III}, y_k^{III}) 分别表示 I 类第 i 个防空武器、II 类第 j 个防空武器、III 类第 k 个防空武器的位置坐标。

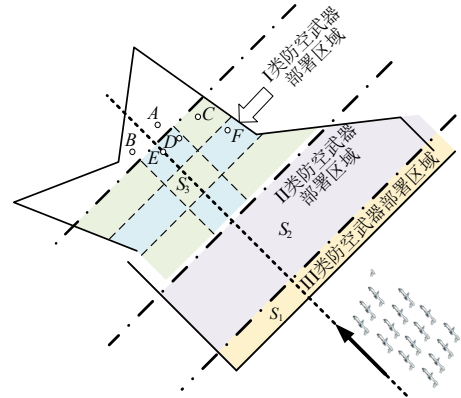


图4 防空武器部署区域划分

综上, 防空武器部署优化模型如下。

目标函数为 $\min \{e^{-k_1 D_m^2} \times e^{-k_2 T_m^2}\}$ 。

$$\text{约束条件为} \begin{cases} (x_i^I, y_i^I) \in \{S_1\}, i = 1, 2, \dots, L_1; \\ (x_j^{II}, y_j^{II}) \in \{S_2\}, j = 1, 2, \dots, L_2; \\ (x_k^{III}, y_k^{III}) \in \{S_3\}, k = 1, 2, \dots, L_3; \\ L_1 + L_2 + L_3 = L. \end{cases}$$

3 模型求解

遗传算法在解决最优化问题中有较大优势^[15], 因此选择遗传算法对模型进行求解。基于遗传算

法求解的步骤如下。

步骤 1:随机生成符合条件的染色体种群;步骤 2:进行选择、交叉、变异等遗传算子操作,得到下一代种群;步骤 3:计算每一代种群中染色体的适应度,选择适应度高的染色体进入下一代。重复步骤 2、步骤 3,直到满足结束条件获得最优解。

算法流程如算法 1 所示。

算法 1 遗传算法

输入:设定遗传代数 R_{GE} 、当前遗传代数 R_{ge} 、初始交叉概率 P_0 、初始变异概率 P_1 、常量 a 、常量 b 、染色体种群(Population)。

输出:得到候选解集(best_chromosome)。

// 主循环

for $g = 1$ to G

// 计算适应度

for each chromosome in Population

chromosome.fitness = f

end

// 选择适应度高的染色体进入下一代

NextPopulation = select_high_fitness(Population)

// 交叉操作

$P_c = a - 2 \times (e^{(b^2 - R_{ge}/R_{GE})} / (1 + e^{(b - R_{ge}/R_{GE})})) \times P_0$

for $i = 1$ to size(NextPopulation)

if random() < P_c

NextPopulation[i], NextPopulation[i+1] =

single_point_crossover(NextPopulation[i],

NextPopulation[i+1])

end

end

// 变异操作

$P_m = 2e^{(b^2 - R_{ge}/R_{GE})} / (1 + e^{(b - R_{ge}/R_{GE})}) \times P_1$

for each chromosome in NextPopulation

if random() < P_m

new_chromosome = single_point_mutation

(chromosome)

if is_valid(new_chromosome)

chromosome = new_chromosome

end

end

end

Population = NextPopulation

end

// 返回最终结果

return best_chromosome(Population)

3.1 编码

以模型中决策变量防空武器部署位置 (x_i^I, y_i^I) 、 (x_j^II, y_j^II) 、 (x_k^III, y_k^III) 为对象,采用二进制邻接矩阵编码方式,如图 5 所示。在二维平面坐标中,若 $(x_i^I, y_i^I) = 1$,表示该位置部署有防空武器;否则,没有部署防空武器,即 $a_{ij} = 0$ 或 1。

a_{11}	a_{12}	...	...	a_{1n}
a_{21}	a_{22}	...	...	a_{2n}
a_{31}	a_{32}	...	...	a_{3n}
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
a_{n1}	a_{n2}	...	...	a_{nn}

图 5 二进制邻接矩阵编码

3.2 适应度函数

以模型的优化目标构建适应度函数,可得适应度函数如下:

$$f = \min \left\{ e^{-k_1 D_m^2} \times e^{-k_2 T_m^2} \right\}^{-1} \quad (6)$$

3.3 交叉算子

交叉算子为全局遗传算子,采用“单点交叉”模式,在邻接矩阵上进行交叉操作。

在种群进化开始时期,由于种群多样,使用较低交叉概率就能保持种群多样性,但随着遗传代数增加,种群中相似染色体数量逐渐增加,需提高交叉概率才能保证种群多样性。可见交叉概率 P_c 需随着遗传代数增加不断变大。因此,设计交叉概率如下:

$$P_c = a - \frac{2e^{\left(b^2 - \frac{R_{ge}}{R_{GE}}\right)}}{1 + e^{\left(b - \frac{R_{ge}}{R_{GE}}\right)}} \times P_0 \quad (7)$$

式中: P_0 表示初始交叉概率; R_{GE} 表示设定遗传代数; R_{ge} 表示当前遗传代数; a 、 b 为常量,用于调节概率变化。

3.4 变异算子

变异算子为局部遗传算子,根据约束条件,设置单点突变算子,允许规定的部分变异,选择邻接矩阵中 0 和 1 进行互换,经过变异后需检验是否满足约束条件,否则变异失败。

在种群进化开始时期,提高变异概率可提高搜索速度,随着遗传代数增加,种群中个体拥有比较高的适应度,需调整变异概率才能保持种群稳定性,可见变异概率 P_m 需随着遗传代数增加不断变小,因此,设计变异概率如下:

$$P_m = \frac{2e^{\left(b^2 - \frac{R_{ge}}{R_{GE}}\right)}}{1 + e^{\left(b - \frac{R_{ge}}{R_{GE}}\right)}} \times P_1 \quad (8)$$

式中, P_1 表示初始变异概率。

4 示例分析

在红蓝对抗中,假设蓝方运输机在红方某要地东南方向一定距离处投放 96 架无人机构成蜂

群,对要地上6个设施发动攻击,假设6个设施的坐标位置分别为 $A(4\ 954, 9\ 877)$ 、 $B(3\ 464, 8\ 111)$ 、 $C(7\ 440, 9\ 988)$ 、 $D(6\ 086, 9\ 662)$ 、 $E(5\ 133, 8\ 690)$ 和 $F(8\ 332, 10\ 675)$ 。无人机蜂群在距离最近防卫目标20 km时,按照4×4编队分成6个组发动攻击。

红方有高能微波1套、高能激光2套、近防速射炮9套。设最大进化代数 $R_{GE}=100$,初始交叉概率 $P_0=0.03$,初始变异概率 $P_1=0.2$, $a=1.3$, $b=0.5$ 。采用本文设计算法求解,得到防空武器部署方案,如表2所示。

表2 防空武器部署方案

武器	最优部署	较优部署区域范围顶点坐标	较优部署区域中心点
高能微波	(11 654,3 831)	(12 158,5 712), (12 769,4 929), (10 473,2 668), (9 827,3 279)	(11 307,4 147)
高能激光	(10 491,4 090)	(7 819,7 115), (10 721,4 313), (9 669,3 293), (6 463,5 787)	(8 668,5 127)
	(11 384,4 955)	(9 663,8 924), (12 150,5 718), (11 023,4 595), (8 110,7 484)	(10 236,6 680)
近防速射炮	(5 142,7 321)	(4 785,8 398), (5 501,7 672), (4 692,6 881), (3 970,7 606)	(4 737,7 639)
	(5 948,6 699)	(5 501,7 672), (6 219,6 963), (5 403,6 168), (4 692,6 881)	(5 453,6 921)
	(6 739,6 058)	(6 219,6 963), (6 931,6 245), (6 124,5 459), (5 403,6 168)	(6 169,6 208)
	(6 415,8 567)	(6 459,10 038), (7 183,9 319), (5 501,7 672), (4 785,8 398)	(5 982,8 856)
	(7 132,7 851)	(7 138,9 319), (7 898,8 596), (6 219,6 963), (5 501,7 672)	(6 689,8 137)
	(7 871,7 167)	(7 898,8 596), (8 602,7 884), (6 931,6 245), (6 219,6 963)	(7 412,7 422)
	(8 140,10 256)	(8 337,10 656), (8 425,10 530), (7 627,9 762), (7 440,9 984)	(7 957,10 233)
	(8 707,9 399)	(8 425,10 530), (9 055,9 738), (8 298,8 999), (7 627,9 762)	(8 351,9 757)
	(9 360,8 627)	(9 055,9 738), (9 674,8 937), (8 956,8 227), (8 298,8 999)	(8 995,8 975)

1)威胁程度评估分析。根据6条航路到6个目标设施的航路捷径,计算每条航路对设施群的综合威胁程度。 A 航路为0.822; B 航路为0.806; C 航路为0.915; D 航路为0.945; E 航路为0.925; F 航路为0.836。

2)部署方案评估分析。根据12套武器位置,计算每个武器对6条航路的航路捷径,其最小值即该武器最优拦截航路的距离,如表3所示。高能微波对应航路 D ,高能激光分别对应航路 E 、航路 C ,近防速射炮分别对应航路 B 、航路 A 、航路 F 。

表3 防空武器对6条航路的航路捷径

武器	航路					
	A	B	C	D	E	F
高能微波	294.200	1 638.859	845.283	90.617	739.457	1 552.678
高能激光	326.151	1 130.578	1 554.865	741.690	155.399	2 314.998
	916.357	2 361.408	313.544	501.551	1 395.616	1 079.543
近防速射炮	1 710.341	404.437	3 483.091	2 310.999	1 012.823	4 574.671
	1 599.096	407.077	3 281.015	2 168.957	937.370	4 316.763
	1 511.942	385.511	3 102.717	2 050.921	886.077	4 082.339
	70.195	2 169.228	1 705.094	529.696	764.756	2 805.597
	51.995	2 043.044	1 631.833	517.003	710.806	2 675.580
	72.105	1 955.628	1 520.994	466.213	695.365	2 508.595
	2 483.362	4 561.101	704.595	1 884.499	3 173.931	408.025
	2 259.549	4 231.565	572.160	1 691.362	2 914.856	482.906
	2 156.617	4 021.904	560.380	1 619.141	2 776.482	437.771

若每套武器只针对1条航路进行拦截,不考虑防空武器协同,拦截结果如表4所示。根据拦截耗时与拦截飞行时间比较,高能微波拦截1个批次16架无人机耗时约48.24 s,冗余时间约37 s,若以最大转移火力需5 s计算,高能微波至少还能拦截4架无人机;高能激光拦截1个批次后冗余约6 s,若

考虑转移火力再进行拦截,时间比较紧张,不一定能拦截成功;对于近防速射炮,其射速满足拦截1个批次所有无人机,考虑弹药制约时,只能毁伤15架,则会让针对 B 和 F 目标的无人机编组各逃逸1架。若考虑武器协同,在成功拦截主责航路所有无人机后,选择协助拦截能力最弱的航路,则能将

96架无人机全部拦截,总体说明该部署方案能完成拦截任务,对要地目标具有较好防御能力。

表4 不考虑防空武器协同的拦截结果

武器	拦截 航路	拦截区 飞行距离/m	拦截区 飞行时间/s	拦截 耗时/s	无人机 逃逸数
高能 微波	<i>D</i>	11 830.77	85.17	48.24	0
高能 激光	<i>E</i>	7 739.73	55.72	48.62	0
	<i>C</i>	7 720.54	55.58	49.25	
		5 598.73	40.31	38.91	
	<i>B</i>	5 597.96	40.30	38.91	1
		5 604.06	40.35	38.91	
近防 速射炮	<i>A</i>	5 655.11	40.71	39.91	0
		5 655.89	40.72	39.91	
		5 655.01	40.71	39.91	
		5 597.68	40.30	38.91	
	<i>F</i>	5 573.79	40.13	38.91	1
		5 588.68	40.24	38.91	

3)算法性能分析。考虑防空武器快速部署需求,对算法求解效率提出更高要求,因此从算法耗时^[16]比较性能,选择非支配排序遗传算法(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)和基于分解的目标进化算法(Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition, MOEA/D)进行对比分析,取3次实验结果平均值进行比较。采用箱线图统计3种算法的耗时,如图6所示。本文算法平均耗时63.09 s、MOEA/D平均耗时75.79 s、NSGA平均耗时72.85 s。本文算法比NSGA在耗时上降低约13.40%,其原因在于调整不同阶段交叉变异算子,朝最优区域收敛,降低了算法的运算量。

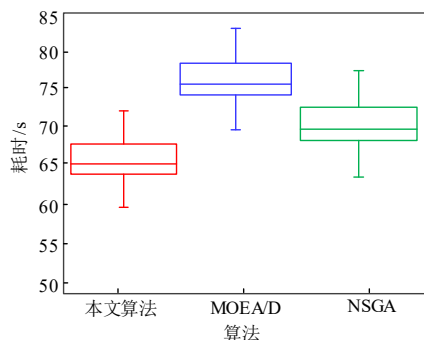


图6 各算法耗时对比图

5 结束语

围绕要地反无人机集群作战中多目标多类型防空武器配置问题,以拦截敌机效果为目标,按照梯次部署、重点防卫、尽远拦截的部署策略,通过来袭方向无人机航路分析、威胁评估、防空区域划

分等步骤,进行分步优化,建立了分层多目标非线性优化模型,利用遗传算法求解给出了有效的武器部署方案,并给出了示例分析。建模思路和问题解决方案具有一定的参考意义。对复杂战场环境和实战化约束条件研究,是下一步重点方向。

参考文献:

- [1] 鲁亚飞,陈清阳,郭正,等.要地防卫反无人机装备发展与启示[J].国防科技,2020,41(5):67-73.
- [2] LI C J, ZHAO Q L, CHE C Y. 3D flight path planning for UAV based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2025, 13:36637-36646.
- [3] 王诗年,孙家平,郭琰.要地防护反无人机系统设计与实现[J].测控技术,2021,40(1):132-136.
- [4] 薛猛,周学文,孔维亮.反无人机系统研究现状及关键技术分析[J].飞航导弹,2021(5):52-56.
- [5] WU J H, YANG Z, ZHANG N, et al. Adaptive pigeon-inspired optimization and dynamic gradient updating MDDPG decision method for UAV swarm confrontation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025. DOI:10.1109/TVT.2025.3600865.
- [6] 孟宪良,张搏,张明亮,等.基于ANP-DEA的反无人机蜂群装备投产效率评估[J].信息工程大学学报,2024,25(3):373-378.
- [7] 黄晨晨,李苏杭,高子龙,等.一种基于NSGA II多目标优化的防空武器部署方法[J].现代防御技术,2025,53(1):45-51.
- [8] 邓文彬,秦增朗,周晨茜,等.基于多Agent的岛礁反无人机集群武器部署问题仿真[C]//第十届中国指挥控制大会论文集.北京:兵器工业出版社,2022:123-129.
- [9] 马新星,滕克难,侯学隆.岛礁防空火力单元配置距离计算模型[J].兵工自动化,2017,36(10):38-41.
- [10] 李冬,赫永磊,李吉.防空导弹系统拦截低小慢无人机集群效能分析[J].舰船电子工程,2020,40(2):101-103.
- [11] 朱蓉,张则剑,赫志达.多保护目标的防空武器部署方案规划[J].现代电子技术,2022,45(21):27-31.
- [12] 黄晨晨,李苏杭,高子龙,等.一种基于NSGA II多目标优化的防空武器部署方法[J].现代防御技术,2025,53(1):45-51.
- [13] 颜培远,刘曙,王君.基于动态规划-遗传算法的防空部署优化模型[J].系统工程与电子技术,2018,40(10):2249-2255.
- [14] 万佳庆,王鹏飞,唐俊林,等.基于多武器平台的要地防空混合部署策略与模型研究[J].系统仿真学报,2021,33(8):1754-1765.
- [15] 栾鸾,顾纯祥,郑永辉.基于多目标优化遗传算法的Schnorr-Adleman整数分解算法[J].信息工程大学学报,2025,26(2):217-223.
- [16] 刘乾,鲁云军,陈克斌,等.任务主体二元约束下作战任务分解EVA方法[J].系统工程与电子技术,2022,44(7):2201-2210.

(编辑:李志豪)