

基于数字高程模型和人工蜂群算法的地面防空部署策略

卿朝进¹, 赵桂毅¹, 刘宇畅², 杨娜¹, 凌国伟¹

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 针对地面防空装备部署优化问题中部署策略实时性不高、合理性差等问题, 提出一种融合数字高程模型(DEM)与人工蜂群(ABC)算法的创新部署策略: 以防空效能作为评估指标, 在设定防空效能指标的前提下, 把DEM作为先验信息对部署区域进行筛选, 再通过ABC算法迭代寻找部署位置。该策略一方面利用ABC算法提高地面防空装备部署策略实时性, 另一方面借助DEM数据, 提高部署策略的合理性。仿真表明, 与经典群智能优化算法相比, 该策略能有效减少算法迭代次数, 并且能取得更合理的部署方案。

关键词: 数字高程模型; 人工蜂群算法; 地面防空; 设备部署; 防空效能

中图分类号: TP182 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2025)00-0001-13

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5470

Ground Air Defense Deployment Strategy Based on Digital Elevation Model and Artificial Bee Colony Algorithm

QING Chaojin¹, ZHAO Guiyi¹, LIU Yuchang², YANG Na¹, LING Guowei¹

(1. School of Electrical Engineering & Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036 China)

Abstract: In order to solve the problems of low real-time and poor rationality of the deployment strategy in the deployment optimization problem of ground air defense equipment, an innovative deployment strategy integrating digital elevation model (DEM) and artificial swarm (ABC) algorithm was proposed: the air defense efficiency was used as the evaluation index, and the DEM was used as the prior information to screen the deployment area under the premise of setting the air defense efficiency index, and then the deployment location was iteratively found through the ABC algorithm. On the one hand, the ABC algorithm is used to improve the real-time deployment strategy of ground air defense equipment, and on the other hand, the rationality of the deployment strategy is improved with the help of DEM data. Simulation results show that compared with the classical swarm intelligence optimization algorithm, the proposed

收稿日期: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(62301447); 四川省科技计划资助项目(2023YFG0316); 四川省科技计划“揭榜挂帅项目”(23GSC00004); 西华大学校重点项目(Z1320929); 中国高校产学研创新基金(2021HTA10016)。

第一作者: 卿朝进(1978—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为无线网络与通信。

ORCID: 0000-0002-8089-3181 E-mail: qing-chao-jin@163.com

引用格式: 卿朝进, 赵桂毅, 刘宇畅, 等. 基于数字高程模型和人工蜂群算法的地面防空部署策略[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2025, 44(X): 1-13.

QING Chaojin, ZHAO Guiyi, LIU Yuchang, et al. Ground Air Defense Deployment Strategy Based on Digital Elevation Model and Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2025, 44(X): 1-13.

strategy can effectively reduce the number of algorithm iterations and obtain a more reasonable deployment scheme.

Keywords: digital elevation model; artificial bee colony algorithm; ground air defense; equipment deployment; air defense effectiveness

在现代区域防空体系中,地面防空装备的合理与有效部署尤为关键^[1]。部署方案的设计与执行效率,不仅直接影响着防空装备能否发挥出最大的实战能力,而且对于整个防空作战的空间战略布局、战术层面的实施,乃至最终的作战成效,均起着决定性作用^[2]。制定一套能够充分发挥防空装备战斗力的部署方案,已成为确保现代防空行动成功的关键要素之一^[3]。然而,面对广阔区域的防空需求,传统的部署方法,如枚举法^[4]、分支定界法^[5]等,在应对多样化、大规模的防空系统部署时,常常遭遇计算复杂度高、耗时长等问题^[6]。鉴于现代战场环境的快速演变与对部署策略实时响应能力的迫切需求,研究高效部署优化算法及策略,一直是学术界和军事研究领域关注的热点^[7]。

为提高传统防空装备部署策略的实时性,群智能优化算法在防空装备部署优化问题中得到了广泛研究^[8-10]:文献[8]利用简化粒子群算法在兵力部署解空间中进行快速寻优;文献[9]提出改进量子遗传算法以解决岛礁防空防空武器部署的突出问题;文献[10]提出了基于烟花算法的要地防空多传感器部署优化方法以解决传统的多传感器部署规划不适用于要地防空任务场景的问题。

在这些群智能优化算法中,人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法不易陷入局部最优、算法结构简单易于实现,还具备较为强大的搜索能力^[11-12]。在军事研究领域,ABC算法体现了显著的优化能力^[11-14]:文献[11]提出一种改进的自适应离散多目标ABC算法,将锦标赛选择取代轮盘赌,并且设计一种自适应改进机制以针对大规模武器目标分配问题;文献[13]提出一种改进ABC算法,其利用先验知识来引导种群初始化,并在ABC算法的基础上融合了向量编码方式、引导策略等改进措施;文献[14]提出一种按基因组搜索的改进ABC算法。由此可见,ABC算法因其显著的优势已被广泛应用。在地面防空装备部署中,ABC算

法也备受青睐,文献[15]将ABC算法分为初始化阶段和优化阶段,提出了一种简化ABC算法的地面防空装备部署方法。在兵力部署问题中:文献[16]在ABC算法基础上建立两种新策略,通过针对性地设计和改进,提高ABC算法的迭代速度;文献[17]针对ABC算法在开发能力和收敛速度上的局限性,将ABC算法与遗传算法相结合,提出了一种改进遗传蜂群算法的部署方法。针对坦克阵地部署,文献[18]提出坦克阵地部署模型的ABC算法,对ABC算法进行有针对性的设计。

尽管文献[15-18]在一定程度上提高了部署策略的实时性,但实际地形对防空效能的影响并未得到充分考虑^[19]。实际上,数字高程模型(digital elevation model, DEM)作为一种区域地形起伏的数字化表达^[20],蕴含了丰富的地形地貌信息。DEM提供的这些信息对防空装备部署大有裨益^[19],且在一些研究中进行了应用^[21-24]:文献[21]根据DEM数据选择待部署位置,并用遗传算法进行部署;文献[22]对DEM进行处理分析,为气象站部署提供了地理信息支持;文献[23]使用DEM获取经纬度和数字高程信息,为天气雷达选址部署提供了技术支撑;文献[24]基于数字地形,分析部署区域地形条件,为兵力部署提供了理论支撑。可见,DEM在一定程度上提升部署策略的合理性^[25-27]。受DEM丰富的数字地形信息启发,将DEM融入到ABC算法中,有望在增强地面防空装备部署实时性的同时改善其合理性。

为此,本文提出一种基于数字高程模型和人工蜂群算法的地面防空部署策略,将DEM作为先验信息,引导ABC算法的迭代寻优过程,旨在快速寻找地面防空装备部署方案的同时,改善部署方案的合理性。本文的主要贡献如下。

1)利用DEM数据作为先验信息对部署区域进行预处理。在算法初始化阶段开始前,根据部署区域的DEM数据分析处理,得到优化因子,并且

初步筛选部署位置,以充分考虑地形对部署的影响从而提高部署方案的合理性。

2)自适应邻域优化策略。利用优化因子对邻域优化过程进行引导,根据优化因子的大小,对部署方案进行集中性邻域优化和多样性邻域优化。较大的优化因子会引导更集中性的搜索,以寻找更优部署方案,从而提高部署方案的质量;较小的优化因子会引导更多样性的搜索,以寻找更多部署方案,从而提高全局搜索的效率。

3)给定防空效能指标的提前停止策略。研究方法还根据预设的防空效能指标对产生的部署方案进行评判,若产生符合防空效能指标的部署方案则直接停止算法迭代。提前停止策略的引入,不仅可以减少算法运行时间,提高算法实时性,而且能确保生成的部署方案满足防空需求。

经过改进后的邻域优化机制,能依据优化因子的具体数值动态调整对不同地面子区域的优化权重。优化因子的融入,有效增强了算法的自适应能力,既保证了部署方案的高质量,又提高了部署方案的多样性。仿真结果表明,相比于经典群智能优化算法,本文方法在加速了寻优过程的同时,使产生的部署方案符合实际部署条件。

1 地面防空装备部署场景与问题形成

1.1 部署场景

1)地面区域划分。

防空装备的种类为 T 类,第 t ($t = 1, 2, \dots, T$) 类防空装备有 D_t 个防空装备,于是,防空装备的总数量为

$$N_D = \sum_{t=1}^T D_t \quad (1)$$

需要将 N_D 个防空装备在地面区域内进行部署。将地面区域划分为 N_A 个子区域,子区域集合 \mathcal{A} 可表示为

$$\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_{N_A}\} \quad (2)$$

式中 A_j 表示第 j 个地面子区域。不失一般性,假设每个子区域只能部署一个防空装备^[28]。

2)部署场景描述。

由于我国地域辽阔,要地众多,对于防空装备部署而言,地面子区域个数通常远远超过防空装备

的总数量,即 $N_A \gg N_D$ 。因此,为抵抗来袭飞机,需要在划定的 N_A 个地面子区域上选择 N_D 个子区域部署 N_D 个防空装备^[2]。

为方便起见,将 N_D 个设备组成设备集合 γ 表示为

$$\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{N_D}\} \quad (3)$$

假设所有可能的部署方案的总数为 N_S ,用 S 表示 N_S 个防空装备部署方案全集,有

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_S}\} \quad (4)$$

在第 i 个部署方案 S_i ($i = 1, 2, \dots, N_S$) 中,将第 i 个部署方案的第 j 个地面子区域表示为 $A_{i,j}$ 。于是,选出的 N_D 个地面子区域集合 $\tilde{\mathcal{A}}_i$, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mathcal{A}}_i &= \{A_{i,1}, A_{i,2}, \dots, A_{i,N_D}\} A_{i,j} \in \mathcal{A} \\ A_{i,j} &\neq A_{i,k}, \forall j \neq k \text{ and } j, k \in \{1, 2, \dots, N_D\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

于是,第 i 个部署方案 S_i 可用 $A_{i,j}$ 和 γ_j 表示为

$$S_i = \{(A_{i,1}, \gamma_1), (A_{i,2}, \gamma_2), \dots, (A_{i,N_D}, \gamma_{N_D})\} \quad (6)$$

本文部署策略的目标是:针对特定的地面子区域与给定数量的防空装备,生成能够兼顾高实时性和合理性的部署方案。

3)部署方案评价指标。

在现代防空作战中,部署方案通常倾向于追求火力纵深、杀伤区重叠次数以及火力密度最大化,以达到最大程度消灭空中威胁的效果^[7]。然而,根据文献^[29],防空效能评估现状还存在评估方法不够客观、评估指标不能直接反应作战效能等问题。为此,本文以有效性分析、合理性分析和优化因子影响分析为示例,阐述防空效能评价指标。

①防空效能。

根据文献^[30-32],防空效能定义为毁伤概率和命中概率的乘积。第 i 个设备部署方案 S_i 的防空效能可表示为

$$P_E(S_i) = 1 - \prod_{j=1}^{N_D} (1 - P_E(A_{i,j}, \gamma_j)) \quad (7)$$

式中: $P_E(A_{i,j}, \gamma_j)$ 表示第 i 个部署方案在地面子区域 $A_{i,j}$ 部署防空装备 γ_j 的防空效能,可表示为

$$P_E(A_{i,j}, \gamma_j) = \omega_{i,j} \times P_H(A_{i,j}, \gamma_j) \times P_D(A_{i,j}, \gamma_j) \quad (8)$$

其中, $P_E(A_{i,j}, \gamma_j)$ 和 $P_D(A_{i,j}, \gamma_j)$ 分别表示地面子区域 $A_{i,j}$ 部署防空装备 γ_j 时的命中概率和毁伤概率^[32-33], $\omega_{i,j}$ 表示第 i 个部署方案中地面子区域 $A_{i,j}$ 的

威胁系数。

②命中概率。

根据文献 [32], 式 (8) 中的命中概率 $P_H(A_{i,j}, \gamma_j)$ 定义为

$$P_H(A_{i,j}, \gamma_j) = \frac{s}{2\pi\sigma_j^2(A_{i,j}, \gamma_j) + s} \quad (9)$$

式中 s 表示来袭飞机暴露面积。这里, 用半径为 r_p 的圆表示该暴露面积, 即 $s = \pi r_p^2$ 。在式 (9) 中, $\sigma_j^2(A_{i,j}, \gamma_j)$ 可以表示为

$$\sigma_j^2(A_{i,j}, \gamma_j) = \frac{1}{2\ln 2} [c_1 R^2(A_{i,j}) + c_2(\gamma_j)] \quad (10)$$

其中, σ_j 表示第 γ_j 个防空装备脱靶量的圆标准差, $R(A_{i,j})$ 为地面子区域 $A_{i,j}$ 的位置参数, c_1 、 $c_2(\gamma_j)$ 为拟合常数。

③毁伤概率。

根据文献 [33], 以导弹为例, 式 (8) 中的毁伤概率 $P_D(A_{i,j}, \gamma_j)$ 定义为

$$P_D(A_{i,j}, \gamma_j) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{r_0^2}{2\sigma^2}} \int_0^\infty r e^{-r^2 \left(\frac{R^2(S_{i,j}) + \sigma^2}{2R^2(S_{i,j})\sigma^2} \right)} I_0 \left(\frac{r_0 r}{\sigma^2} \right) dr \quad (11)$$

式中: σ 表示导弹制导误差; r_0 表示制导误差的系统误差分量; r 表示脱靶量; R 为受地面子区域影响的杀伤规律参数; $I_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数。毁伤概率作为地面防空装备部署中的重要指标之一, 关系到诸如生存能力、部署方案的成败等 [34]。式 (11) 中, 杀伤规律参数 R 可用方案 S_i 中参数 $A_{i,j}$ 和 γ_j 进行表征。假设表征函数为 $f_{\text{Break}}(\cdot, \cdot)$, 则第 i 个部署方案中, 在地面子区域 $A_{i,j}$ 部署防空装备 γ_j 的杀伤规律为

$$R(S_{i,j}) \triangleq f_{\text{Break}}(A_{i,j}, \gamma_j) \quad (12)$$

④位置威胁系数。

在相对平坦的平原地区执行防空部署任务时, 地形因素对防空装备的影响体现得并不显著。然而, 在进行野战防空部署, 特别是在崎岖多山的地貌环境中, 地形条件则会对防空装备的运作造成实质性的影响 [35]。例如, 复杂的地形可能会导致炮弹发射时受到自然障碍物的遮蔽, 这直接影响到防空装备的有效覆盖范围及拦截效率, 从而对其防空效能产生重大影响。本文在利用 DEM 辅助 ABC 算法优化的同时, 引入位置威胁系数 $w_{m,n}$, 将 DEM 提供的海拔信息深入应用于考量防空装备在实际作战时可能出现的射界遮挡问题, 从而提升优化结果

的精确性和实用性。

在讨论防空装备的有效防御范围时, 将其火力覆盖区域抽象建模为一个理论上的扇形几何域。实际的火力覆盖区域是连续分布的, 然而, 在对其进行定量优化分析时, 就必须要进行量化处理。根据文献 [36], 对防空装备的火力覆盖进行网格离散化处理, 如图 1 所示。其中: 上图表示对防空装备火力覆盖进行网格化处理, 并且网格应划分的足够小, 旨在确保每个网格交叉点能够精确代表实际地理空间中被火力覆盖的点; 下图以矩阵抽象模型的方式对防空装备的火力覆盖范围进行了概要表示。矩阵元素值 $w_{m,n}$ 被赋予了特定含义: 若 $w_{m,n} = 1$, 则表示相应地面子区域处于火力覆盖范围内; 若 $w_{m,n} = 0$, 则代表该地面子区域未被火力所覆盖; 若 $w_{m,n} = -1$, 则表示该地面子区域由于存在障碍物而无法实现火力覆盖。

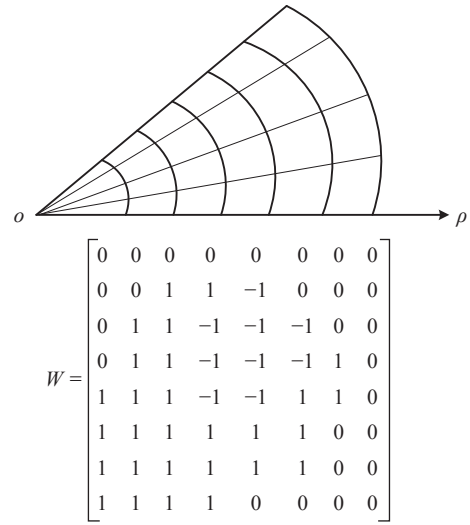


图 1 火力覆盖示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fire coverage

根据 $w_{m,n}$ 求出未存在遮挡的火力覆盖值 w_{normal} 和存在遮挡的火力覆盖值 w_{abnormal} , 分别表示为

$$w_{\text{normal}} = \sum_m^M \sum_n^N W(|w_{m,n}| = 1) \quad (13)$$

$$w_{\text{abnormal}} = \left| \sum_m^M \sum_n^N W(w_{m,n} = -1) \right| \quad (14)$$

式中, M 、 N 分别表示部署区域的横向、纵向的子区域个数。根据 w_{normal} 和 w_{abnormal} , 得到火力覆盖因子 ϖ , 表示为

$$\varpi = 1 - \frac{w_{\text{abnormal}}}{w_{\text{normal}}} \quad (15)$$

根据火力覆盖因子 ϖ 的大小,式(8)中的位置威胁系数 $\omega_{i,j}$ 定义^[28]为

$$\omega_{i,j} = \begin{cases} 1, & \varpi \in (0.75, 1] \\ 0.8, & \varpi \in (0.5, 0.75] \\ 0.6, & \varpi \in (0.25, 0.5] \\ 0, & \varpi \in (0, 0.25] \end{cases} \quad (16)$$

1.2 问题形成

部署方案的设计与执行是一个涉及诸多变量动态平衡的过程,尤其是在资源有限与威胁持续变化的现实条件下,如何权衡各项指标以实现防空效能的最大化,就成为了一个亟待解决的优化问题^[37]。

1) 优化问题形成。

为保证部署方案的有效性,产生的部署方案应保证防空效能最大。即,从 N_S 个部署方案中选出最大防空效能的部署方案,表示为:

$$\begin{aligned} & \arg \max_{S, \mathcal{A}, \gamma} \{P_E(S_i)\} \\ & \text{s.t. (C1): } P_E(S_i) \geq P_{Th} \\ & \quad \text{(C2): } \forall S_i \in S, \forall A_{i,j} \in \mathcal{A}, \forall \gamma_j \in \gamma \end{aligned} \quad (17)$$

式中:(C1)表示产生部署方案的防空效能应不小于防空效能门限;(C2)表示产生的部署方案 S_i 应是所有部署方案集合 S 中的子集,部署方案的地面子区域 $A_{i,j}$ 应在给定地面子区域集合 \mathcal{A} 中选取,并且部署的防空装备 γ_j 是在给定的防空装备集合 γ 中选取。

2) ABC 算法求解可行性。

尽管相同类型的设备具有相似的性能特征,然而,当这些设备部署在不同的地面子区域时,可能因为多种因素而呈现出差异化的性能表现。因此,从 N_A 个地面子区域选出 N_D 个子区域部署 N_D 个不同防空效能的防空装备的部署方案总数 $N_{Sch,Total}$ 可表示为

$$N_{Sch,Total} = \frac{N_A!}{(N_A - N_D)!} \quad (18)$$

广袤的部署区域会造成地面子区域数 N_A 非常大,在 N_A 个地面子区域中部署 N_D 个不同防空效能的防空装备的部署方案总数 $N_{Sch,Total}$ 也会非常大。例如,当 $N_A = 10^3$, $N_D = 10^2$ 时,则共有部署方案总数为

$$N_{Sch,Total} = \frac{10^3!}{(10^3 - 10^2)!} > 10^{297} \quad (19)$$

根据上述示例,若采用枚举法全局搜索最优部

署方案需要对比不少于 10^{297} 种部署方案。这种数量级的方案寻优,计算资源消耗巨大、处理延迟高,严重违背复杂多变战场环境对实时性的需求,难以实用。在实际的防空部署中,地面子区域数 N_A 和防空装备数 N_D 可能会比上述示例更大,寻求全局最优解在计算资源和时间成本上几乎不可能,无法满足实时性要求。更重要的是,耗费大量计算资源和时间成本得到的全局最优解,有时因过于理论化还难以匹配战场环境的具体特征,缺乏实战应用的合理性。

鉴于 ABC 算法具有不易陷入局部最优、算法结构简单易于实现,以及具备较为强大的搜索能力等优点^[11-18]。本文采用 ABC 算法对地面防空装备部署方案进行迭代寻优。为更有效地应用 ABC 算法解决地面防空装备部署问题,进一步改善其收敛速度与部署方案的合理性,考虑将 DEM 融入 ABC 算法,利用 DEM 对 ABC 算法进行引导,进一步减少算法的迭代过程,加快其收敛速度,并增强部署方案的合理性。因此,本文立足于防空效能最优的目标,利用 DEM 数据以强化算法求解的实用性和适应性,并在此基础上对 ABC 算法进行改进,旨在求解出防空效能最大化的部署方案。

2 基于 DEM 和 ABC 算法的地面防空装备部署方法

以防空效能为示例,本文提出的求解算法充分考虑了实际地形地貌、海拔差异等因素,利用 DEM 建立了一个更具有实际物理意义、更高效能的部署优化模型。DEM 的引入使得算法能够更全面地评估不同地面子区域的部署适宜性,并在实际应用中更灵活地应对战场环境的复杂性,从而更有效地提高地面防空装备部署方案的防空效能。

2.1 预处理阶段

目前,现有的 ABC 算法在进行优化问题求解时,并未对已有的数据进行加工处理,而是直接进行随机种群(解集)初始化。这种随机初始化处理虽然在一定程度上增加了解集多样性,避免全局最优解,但是,对于解空间十分庞大的问题,随机初始化处理的效果就不尽如人意^[38-39]。

因此,本文在进行初始化前,利用 DEM 数据

对需要进行部署任务的地面区域进行分析,根据地理位置的海拔高度得到优化因子,得到所有子区域的位置优化因子后,再进行种群初始化。这样在提高算法求解效率、减少计算复杂度的同时也提高了部署方案的适用性。

对所有地面子区域获取海拔数据,计算平均海拔高度 \bar{h} ,表示为

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} h_i}{N_A} \quad (20)$$

其中,第 i 个地面子区域的优化因子 ζ_i 表示为

$$\zeta_i = 1 - \frac{\text{abs}(h_i - \bar{h})}{\max(h_i - \bar{h})}, \quad i = 1, 2, \dots, N_A \quad (21)$$

由于地形复杂性、海拔高度以及其他环境限制等因素,地面防空装备在执行部署任务时十分困难。特别是在山地地形下,自然地貌对部署任务的挑战显著增加。例如,在低洼地带易遭水患、高海拔处难于运输且易暴露。

因此,本文在根据海拔信息得到 N_A 个优化因子后,对 N_A 个优化因子进行筛选,直接删除较小的优化因子和相邻差距较大的优化因子对应的地面子区域,从而避免了海拔太高或太低的地面子区域难以运输防空装备、部署子区域有障碍物遮挡的问题,增强了部署的合理性。

2.2 初始化阶段

采用与经典 ABC 算法相同的初始化策略^[15],随机产生部署候选解,得到初始部署方案,第 i 个部署方案中第 j 个地面子区域 $A_{i,j}$ 的随机初始化过程表示为

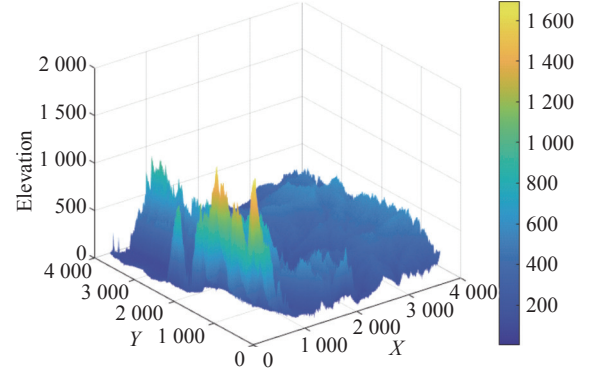
$$j_i = 1 + \text{round}(\varphi \cdot (N_A - 1)) \quad (22)$$

式中: j_i 表示第 i 个部署方案的第 j 个地面子区域编号; $\text{round}(x)$ 表示对 x 的值四舍五入; φ 是 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。

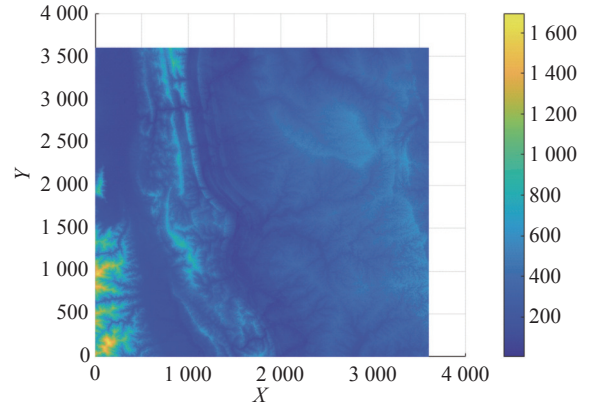
根据式(22),得到由 N_D 个地面子区域和防空装备组成的防空部署方案,其中,第 i 个初始部署方案 $S_{\text{ini},i}$ 表示为

$$S_{\text{ini},i} = \left\{ (A_{i,1}^{\text{ini}}, \gamma_1), (A_{i,2}^{\text{ini}}, \gamma_2), \dots, (A_{i,N_D}^{\text{ini}}, \gamma_{N_D}) \right\} \quad (23)$$

得到初始部署方案后,根据部署方案的防空效能、地面子区域的地形地貌、路网信息等条件作为部署指标,对部署方案进行校验,表示为



(a) 三维图



(b) 俯视图

图2 地形 DEM 数据三维图

Fig. 2 Terrain DEM data three-dimensional map

$$f_{\text{validate}}(S_i) = \begin{cases} 1, & \text{方案 } S_i \text{ 校验合格} \\ 0, & \text{方案 } S_i \text{ 校验不合格} \end{cases} \quad (24)$$

若产生的部署方案校验合格,即 $f_{\text{validate}}(S_i) = 1$,则停止算法迭代,将当前的部署方案直接输出,从而改善实时性;否则,进行算法后续处理。

2.3 雇佣蜂阶段

在解决部署方案求解问题时,经典 ABC 算法中雇佣蜂与跟随蜂阶段的邻域搜索机制存在固有的随机性质,其适用性并不理想。为此,本文巧妙地引入了在预处理阶段获得的优化因子,用以引导并改进邻域优化步骤。此外,经过邻域优化阶段形成的新部署方案会进一步接受部署指标的校验判断:若新方案成功满足预设的部署指标,则算法即时终止当前迭代过程,以改善实时性不高的问题。

经典 ABC 算法在雇佣蜂阶段对初始化产生的每个食物源进行探索开发^[40-41],在此基础上,本文方法利用预处理阶段的优化因子 ζ ,对第 i 个部署方案中第 j 个地面子区域 $A_{i,j}$ 的邻域优化过程表示为

$$j_i = \zeta j_i + (1 - \zeta) \cdot \kappa \cdot (j_i - j_k) \quad (25)$$

得到的第 i 个雇佣蜂部署方案 $S_{Emp,i}$ 表示为

$$S_{Emp,i} = \left\{ (A_{i,1}^{Emp}, \gamma_1), (A_{i,2}^{Emp}, \gamma_2), \dots, (A_{i,N_D}^{Emp}, \gamma_{N_D}) \right\} \quad (26)$$

得到 $S_{Emp,i}$ 后,根据公式 (24) 对部署方案进行校验。若产生的部署方案校验合格,即 $f_{Validate}(S_i) = 1$, 那么停止算法迭代,将当前的部署方案直接输出;否则,进行算法后续处理。

在邻域优化完成后,计算部署方案的适应度值,供跟随蜂阶段轮盘赌选择。部署方案的适应度值计算表达式为

$$fit(S_i) = \frac{1}{1 + P_E(S_i)} \quad (27)$$

其中, $fit(S_i)$ 表示第 i 个部署方案的适应度值。

完成适应度计算后,雇佣蜂会通过贪婪选择^[42]的方式进行食物源的筛选,即选择适应度高的部署方案,为

$$S_{Emp,i} = \begin{cases} S_{Ini,i}, & fit(S_{Emp,i}) \leq fit(S_{Ini,i}) \\ S_{Emp,i}, & fit(S_{Emp,i}) > fit(S_{Ini,i}) \end{cases} \quad (28)$$

2.4 跟随蜂阶段

在跟随蜂阶段,与经典 ABC 算法相同,本文方法采用轮盘赌选择机制^[42]来选择不同部署方案进行此阶段的邻域优化,对 $S_{Emp,i}$ 根据公式 (25) 进行邻域优化处理。随后,对于经过雇佣蜂阶段邻域优化后所产生的新的跟随蜂部署方案 S_{Fol} , 会进一步依据公式 (24) 对其进行部署指标评判,并按公式 (28) 进行贪婪比较,确保方案的有效性和适用性。

2.5 侦察蜂阶段

在侦察蜂阶段中,本文方法通过引入优化因子对部署方案求解,增强了部署策略的针对性与多样性。此外,每个阶段都根据公式 (24) 对产生的部署方案进行部署指标判决,无需额外考虑邻域优化限制次数的约束^[40]。此阶段分 2 种情况对迭代产生的部署方案进行讨论。

情况 1: 如果此次迭代过程中没有产生满足部署指标即公式 (24) 的部署方案,那么侦察蜂阶段会选择本次迭代过程中产生的防空效能最大的部署方案作为输出。

情况 2: 如果此次迭代过程中产生了满足部署指标的部署方案,那么侦察蜂阶段会把满足部署指标的部署方案作为输出。

本文方法的流程图如图 3 所示,对应的算法流程图如图 4 所示。

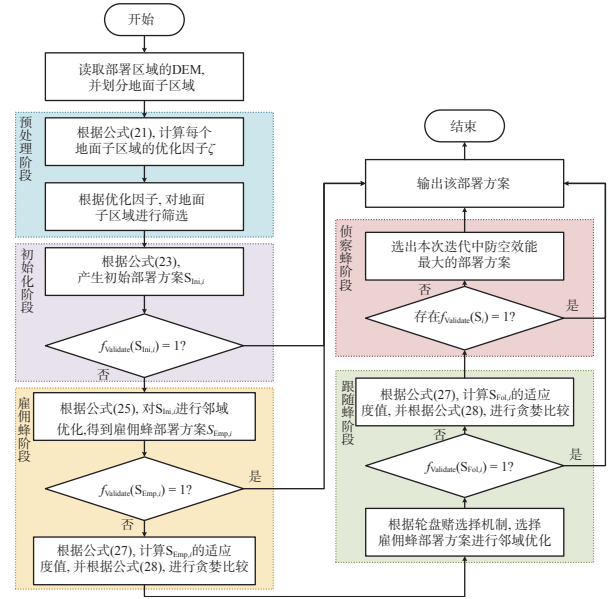


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

3 实验仿真

假设某防空小队需要在某区域需要进行部署任务,给定仿真条件^[41]如表 1 和表 2 所示。

3.1 有效性分析

本文方法进行 1000 次迭代后得到的结果与经典群智能优化算法^[42-46]进行 1000 次迭代后得到的结果进行比较,得到的防空效能与迭代次数仿真结果如图 5 所示。

1) 相较于经典群智能优化算法,本文方法在寻求部署方案的过程中,能更快地产生满足 P_{Th} 的部署方案。具体来说,在给定部署区域以及表 1 和表 2 条件的情况下,本文方法在经历 197 次迭代即能得到满足防空效能指标的部署方案,经典 ABC 算法、遗传算法和蚁群算法分别经历 421、500、467 次迭代才能得到满足防空效能指标的部署方案,粒子群优化算法甚至在 1000 次迭代中没有产生满足防空效能指标的部署方案。

2) 相较于经典群智能优化算法,本文方法在寻求部署方案的过程中,能产生更高防空效能的部署方案。具体地,本文方法在经历 319 次迭代时得到 0.9728 防空效能的部署方案,而经典群智能优化算法在 1000 次迭代内产生部署方案的防空效能

算法 1 基于DEM和ABC算法的地面防空装备部署策略

```

输入: 部署区域DEM数据, 防空装备参数
输出: 部署方案 $S_i$ 
预处理阶段
S1. 读取部署区域DEM数据, 得到 $N_A$ 个地面子区域;
S2. for  $i = 1, 2, \dots, N_A$ 
S3.   根据公式(20)和(21)计算 $\zeta_i$ ;
S4.   根据 $\zeta_i$ 筛选地面子区域;
S5. end
初始化阶段
S6. flagEmp = 1;
S7. for  $i = 1, 2, \dots, N_{ini}$ 
S8.   根据公式(22)进行, 产生 $S_{ini,i}$ ;
S9.   根据公式(24)对 $S_{ini,i}$ 进行校验;
S10.  if  $f_{validate}(S_{ini,i}) = 1?$ 
S11.   | flagEmp = 0;
S12.   | break
S13.   end
S14. end
雇佣蜂阶段
S15. while flagEmp
S16.   for  $i = 1, 2, \dots, N_{ini}$ 
S17.     根据公式(25)进行邻域优化, 产生 $S_{Emp,i}$ ;
S18.     根据公式(24)对 $S_{Emp,i}$ 进行校验;
S19.     if  $f_{validate}(S_{Emp,i}) = 1$ 
S20.       | flagEmp = 0;
S21.       | Break
S22.     end
S23.     根据公式(27)和(28)计算适应度并
        进行贪婪选择;
S24.     if  $i = N_{ini}$ 
S25.       | flagEmp = 0;
S26.       | flagFol = 1;
S27.       | break
S28.     end
S29.   end
S30. end
跟随蜂阶段
S31. while flagFol
S32.   for  $i = 1, 2, \dots, N_{ini}$ 
S33.     根据轮盘赌选择机制选择 $S_{Emp,i}$ ;
S34.     根据公式(25)进行邻域优化, 产生 $S_{Fol,i}$ ;
S35.     根据公式(24)对 $S_{Fol,i}$ 进行校验;
S36.     if  $f_{validate}(S_{Fol,i}) = 1$ 
S37.       | flagFol = 0;
S38.       | break
S39.     elseif  $i = N_{ini}$ 
S40.       | flagFol = 0;
S41.       | flagSco = 1;
S42.       | break
S43.     end
S44.   end
S45. end
侦察蜂阶段
S46. while flagSco
S47.   for  $i = 1, 2, \dots, N_{sco}$ 
S48.     if flagIni == 0 || flagEmp == 0 || flagFol == 0
S49.       输出满足部署指标的部署方案 $S_i$ ;
S50.       flagSco = 0;
S51.       break
S52.     else
S53.       输出最大防空效能的部署方案 $S_i$ ;
S54.     end
S55.   end
S56. end

```

图 4 本文算法

Fig. 4 The algorithm

表 1 防空装备参数

Tab. 1 Air defense equipment parameters

防空装备类型	个数	制导误差/m	系统误差分量/m	脱靶量/m
D_1	30	[0, 50]	[0, 30]	[0, 30]
D_2	50	[0, 100]	[0, 50]	[0, 50]
D_3	20	[0, 150]	[0, 80]	[0, 70]
D_4	50	[0, 200]	[0, 100]	[0, 90]

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	取值
防空装备种类	$T = 4$
防空装备总数	$N_D = 150$
部署区域范围	$X = 3061, Y = 3061$
地面子区域数	$N_A = 12967201$
防空效能指标	$P_{Th} = 0.97$
杀伤规律参数	$R \in [0, 1]$

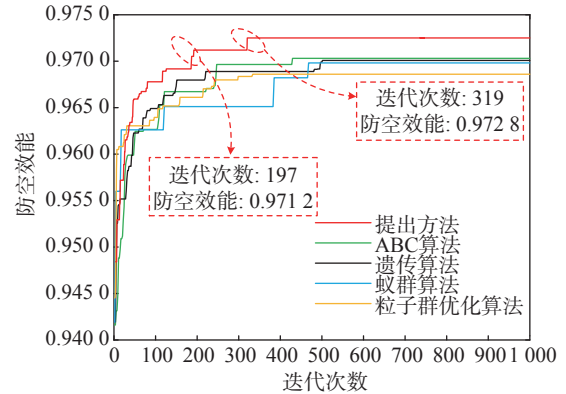


图 5 有效性分析

Fig. 5 Effectiveness analysis

都在 0.9700 左右。

3) 相较于经典群智能优化算法, 本文方法产生的初代部署方案具有更高的防空效能。具体而言, 在迭代初期, 本文方法产生的部署方案具有更高的防空效能, 其数值达到 0.9483, 相比之下, 经典群智能优化算法产生的防空效能均未能超过 0.9450。

此外, 将本文方法与经典 ABC 算法、经典 ABC 算法+DEM、经典 ABC 算法+ P_{Th} 进行比较, 其结果如图 6 所示。

1) 本文方法在初代产生的部署方案具有更高的防空效能。此外, 经典 ABC 算法与 DEM 结合的方法在初代产生的部署方案的防空效能高于经典 ABC 算法和经典 ABC 算法+ P_{Th} 。具体地, 本文

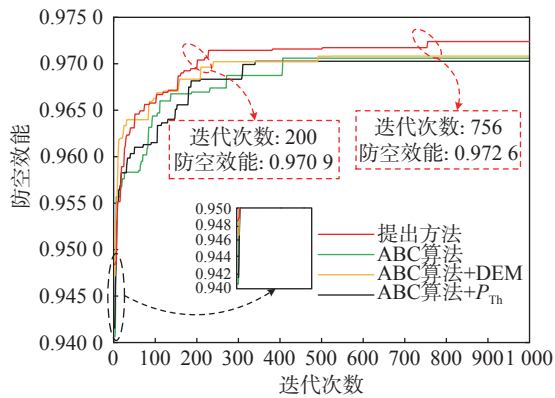


图 6 有效性分析

Fig. 6 Effectiveness analysis

方法的初代部署方案的防空效能为 0.9489, 经典 ABC 算法与 DEM 结合方法的初代部署方案的防空效能为 0.9468, 经典 ABC 算法和经典 ABC 算法+ P_{Th} 产生的初代部署方案防空效能都在 0.9450 以下。其原因在于, DEM 数据作为先验信息, 引导部署方案的迭代寻优过程, 使得初代部署方案的防空效能更高。

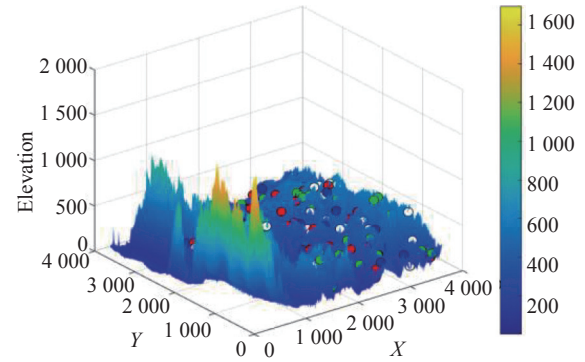
2) 本文方法在迭代寻优过程中, 能更快产生满足防空效能指标的部署方案。具体来说, 本文方法在 200 次迭代就产生了满足防空效能指标的部署方案, 经典 ABC 算法、经典 ABC 算法+DEM、经典 ABC 算法+ P_{Th} 分别在 407、237、311 次迭代才产生满足防空效能指标的部署方案。具体来说, 迭代次数减少意味着算法能以更快的速度收敛至有效解, 从而大幅缩短部署方案生成时间。其原因在于, 本文方法将 DEM 数据融入 ABC 算法中, 将其作为先验信息, 引导部署方案的迭代寻优过程, 进而显著提升了寻优效率与部署方案的产生速度。

3) 本文方法能产生更高防空效能的部署方案。在 1000 次迭代仿真中, 本文方法经过 756 次迭代产生的部署方案防空效能为 0.9726, 其他 3 种方法在 1000 次迭代中产生的部署方案其防空效能均在 0.9700 附近。

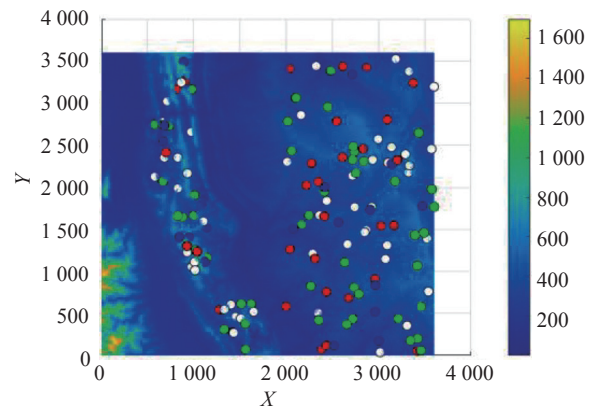
由图 5 和图 6 的有效性分析图可以看出, 本文方法能显著减少算法迭代次数, 迭代次数的减少直接降低了计算成本, 从而提高了实时性。

3.2 合理性分析

DEM 对部署方案的合理性有一定的影响。图 7 和图 8 给出了相应的仿真结果, 其中 4 类设备



(a) 三维图



(b) 俯视图

图 7 本文方法部署方案 DEM 数据图

Fig. 7 Deployment scheme diagram of the proposed method with DEM data

分别用红、绿、蓝、白四种颜色的点表示。

图 7 和图 8 分别为运用本研究方法所获得的部署方案在 DEM 数据下的可视化表现和运用经典 ABC 算法所获得的部署方案在 DEM 数据下的可视化表现。

可以看出, 在应用经典 ABC 算法时, 部署方案中一些部署点在海拔约为 1600 m 和 200 m 的高度区域。然而, 本文方法采用 DEM 作为先验指导信息后, 生成的部署方案不再包含位于 1600 m 和 200 m 高度位置的部署点, 而是遵循地形信息实现了更为合理的部署。具体地, 本文方法通过分析部署区域的平均海拔, 对部署位置进行筛选, 避开易受雨季影响的低洼地带以及运输困难容易暴露的高海拔地区。这不仅显著提升了部署方案的地理适宜性, 更提高了实战合理性。合理性的提升不仅体现在对潜在风险的规避上, 更在于确保了防空设备的高效性与安全性, 从而为实现整体战略目标奠定了坚实的基础。

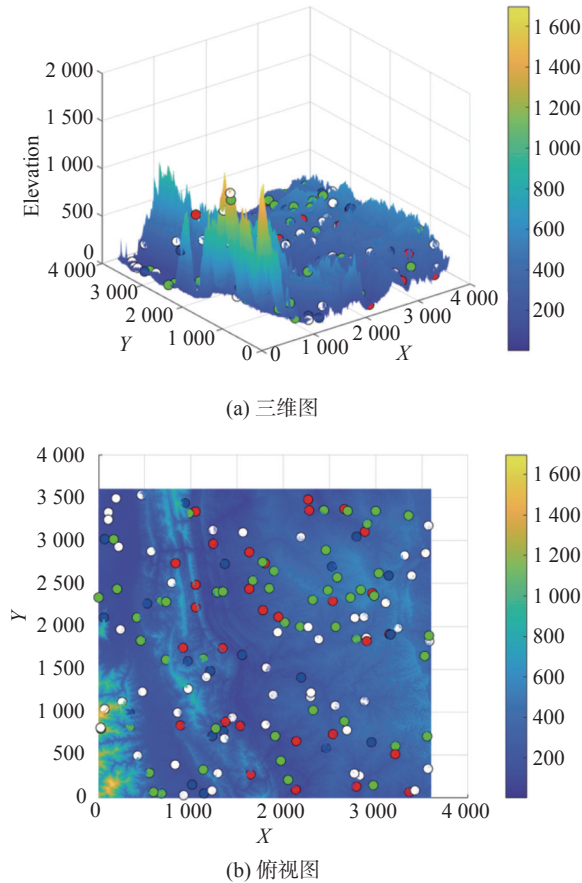
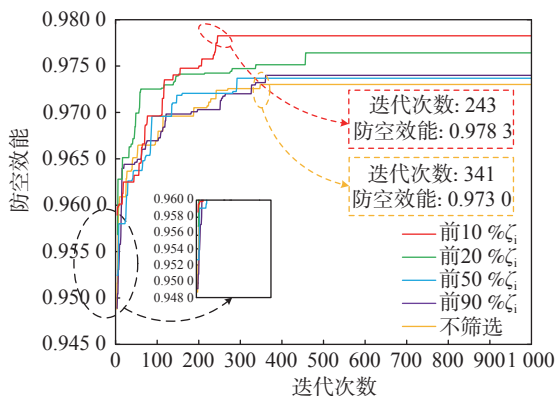


图8 经典ABC算法部署方案DEM数据图

Fig. 8 Deployment scheme diagram of the classic ABC algorithm with DEM data

3.3 优化因子影响分析

预处理阶段得到的优化因子对部署方案的求解寻优过程也存在影响。在上述条件的基础上,通过对预处理阶段的优化因子大小进行筛选,将优化因子从大到小排序,进行了5组实验,即分别考虑了前10%、前20%、前50%、前90%的 ζ_i 以及不对 ζ_i 进行筛选。图9给出了相应的仿真结果。

图9 不同 ζ_i 占比影响分析Fig. 9 Analysis of the different proportions of ζ_i

1) 优化因子对初代产生部署方案的防空效能有明显影响。具体地,前10%的 ζ_i 产生的部署方案在第一次迭代产生部署方案的防空效能就达到了0.9588,而不对 ζ_i 进行筛选产生的部署方案防空效能为0.9489。

2) 优化因子对算法迭代产生部署方案的防空效能有提升效果。例如,前10%的 ζ_i 经243次迭代后产生了防空效能为0.9783的部署方案,而不对 ζ_i 进行筛选经341次迭代产生了防空效能为0.9730的部署方案。

4 结论

本文利用DEM,并根据给定防空效能门限对部署方案进行校验,研究预先进行阵地筛选的地面防空装备部署优化ABC算法,根据需要进行部署任务区域的DEM得到优化因子,利用优化因子引导邻域优化过程,并且对产生的部署方案进行防空效能指标评判,通过利用DEM对部署区域筛选,提前排除不适合部署的区域,减少算法解集空间,提高算法实时性的同时,增强部署方案的合理性。本文研究为地面防空装备的部署问题提供了一种新方法,可以改善收敛速度并提高防空效能。

参 考 文 献

- [1] 刘文涛,单兆春,李红涛,等. 弹炮结合目标防空部署方案优化评估[J]. *火力与指挥控制*, 2006, 31(10): 58-61.
- [2] LIU W T, SHAN Z C, LI H T, et al. Optimized evaluation of the disposition of the missile-Gun combined air defence[J]. *Fire Control & Command Control*, 2006, 31(10): 58-61.
- [3] 周天颜,冯小恩,范云锋,等. 避免防空火力过剩的地面兵力防御部署优化模型[J]. *空天防御*, 2022, 5(4): 19-23.
- [4] ZHOU T Y, FENG X E, FAN Y F, et al. Optimization model of ground air defense force deployment to avoid excessive air defense firepower[J]. *Air & Space Defense*, 2022, 5(4): 19-23.
- [5] 于威,侯学隆. 要地区域防空兵力优化部署问题研究[J]. *舰船电子工程*, 2022, 42(12): 37-39.
- [6] YU W, HOU X L. Research on optimal deployment of air defense forces in important areas[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(12): 37-39.
- [7] 宋佳庆,张峰,关永胜,等. 基于最优作战效能的雷达部署优化问题研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2015, 10(4): 372-378.
- [8] SONG J Q, ZHANG F, GUAN Y S, et al. Research on radar

- deployment based on optimal operational effectiveness[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2015, 10(4): 372 – 378.
- [5] 段毅, 谭贤四, 曲智国, 等. 基于分支定界法的相控阵雷达事件调度算法[J]. *电子学报*, 2019, 47(6): 1309 – 1315.
- DUAN Y, TAN X S, QU Z G, et al. Phased array radar task scheduling algorithm based on branch and bound method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(6): 1309 – 1315.
- [6] 金慧中. 基于改进遗传算法的防空兵力智能部署优化方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- JIN H Z. Optimization method of intelligent deployment of air defense forces based on improved genetic algorithm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [7] 邢清华, 刘付显. 区域防空部署优化系统建模[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(5): 712 – 715.
- XING Q H, LIU F X. Modeling on area air defense optimization deployment system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(5): 712 – 715.
- [8] 樊辉锦, 巫银花, 毕月, 等. 航母编队反无人机蜂群作战兵力部署模型及优化[J]. *火力与指挥控制*, 2023, 48(6): 55 – 61.
- FAN H J, WU Y H, BI Y, et al. Combat force deployment model and optimization of aircraft carrier formation anti-UAV swarm[J]. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(6): 55 – 61.
- [9] 陶杨, 颜仙荣, 孟田珍. 改进量子遗传算法在岛礁防空部署问题中的应用[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2022, 17(05): 478 – 483.
- TAO Y, YAN X R, MENG T Z. Application of Improved Quantum Genetic Algorithm in Air Defense Deployment of Islands and Reefs[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2022, 17(05): 478 – 483.
- [10] 万佳庆, 王鹏飞, 郭强, 等. 基于烟花算法的要地防空多传感器部署规划方法[J]. *飞行力学*, 2021, 39(6): 62–67.
- WAN J Q, WANG P F, GUO Q, et al. Multi-sensor deployment planning method for air defense in strategic point based on firework algorithm[J]. *Flight Dynamics*, 2021, 39(6): 62–67.
- [11] 周玉虎, 王桐, 陈立伟, 等. 基于人工蜂群算法的大规模武器目标分配研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024(3): 1 – 9.
- ZHOU Y H, WANG T, CHEN L W, et al. Large-scale weapon-target allocation based on an artificial bee colony algorithm[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024(3): 1 – 9.
- [12] 马发民, 王锦彪, 张林. 泛网格化噪声监测点布局与蜂群优化[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(3): 50 – 56.
- MA F M, WANG J B, ZHANG L. Monitoring point layout of generic grid noise and wasp colony optimization[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2017, 36(3): 50 – 56.
- [13] 褚凯轩, 常天庆, 张雷. 基于改进人工蜂群算法的地面作战武器-目标分配[J]. *兵工学报*, 2023, 44(7): 2171 – 2183.
- CHU K X, CHANG T Q, ZHANG L. A ground combat weapon target assignment model based on shooting effectiveness and improved artificial bee colony algorithm[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(7): 2171 – 2183.
- [14] 冉雨, 陈大勇, 程郁凡, 等. 基于改进人工蜂群算法的认知抗干扰智能决策技术研究[J]. *信号处理*, 2019, 35(2): 240 – 249.
- RAN Y, CHEN D Y, CHENG Y F, et al. Cognitive anti-jamming intelligent decision based on improved artificial bee colony algorithm[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(2): 240 – 249.
- [15] 刘涛, 刘宇畅, 赵桂毅, 等. 基于简化人工蜂群算法的地面防空火力拦截设备部署方法[J]. *空军工程大学学报*, 2024, 25(1): 52 – 58.
- LIU T, LIU Y C, ZHAO G Y, et al. A deployment method of ground-based air defense intercept systems by using simplified artificial bee colony algorithm[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2024, 25(1): 52 – 58.
- [16] 褚凯轩, 常天庆, 孔德鹏. 基于 Jackson 网络的地面分队防御作战兵力部署方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(1): 219 – 227.
- CHU K X, CHANG T Q, KONG D P. Forces deployment method of ground unit defensive combat based on Jackson network[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(1): 219 – 227.
- [17] 岳韶华, 何晟, 王刚, 等. 基于改进遗传蜂群算法的武器系统优化部署问题研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(8): 80 – 86.
- YUE S H, HE S, WANG G, et al. Optimization of weapon system deployment based on improved genetic bee colony algorithm[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(8): 80 – 86.
- [18] 褚凯轩, 常天庆, 孔德鹏, 等. 基于蜂群算法的坦克阵地部署与火力分配模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(2): 546 – 556.
- CHU K X, CHANG T Q, KONG D P, et al. Bee colony algorithm based model of tank troop deployment and firepower allocation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(2): 546 – 556.
- [19] 曹伟伟. 高寒山地防空火力配系研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- CAO W W. Study on air defense firepower distribution in alpine mountain area[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.

- [20] 卢华兴. DEM 误差模型研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- LU H X. Research on DEM error model[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.
- [21] 刘卓承, 张云雷, 刘涛, 等. 基于 DEM 数据和遗传算法的对海雷达部署优化研究[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(3): 113 – 118.
- LIU Z C, ZHANG Y L, LIU T, et al. Research on optimization of seaside radar deployment based on DEM data and GA[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(3): 113 – 118.
- [22] SLÁDEK D. Applicability of Python-based geospatial analysis for operational assessment of weather station deployment[C]//2023 International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno: IEEE, 2023: 1–8.
- [23] 伍立坤, 李力, 段齐欢, 等. 基于数字高程模型的气象雷达选址软件设计[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(1): 124 – 129.
- WU L K, LI L, DUAN Q H, et al. Design of weather radar location software based on digital elevation model[J]. Journal of Geomatics, 2024, 49(1): 124 – 129.
- [24] 张德, 曾军, 张跃鹏, 等. 基于数字地形分析的智能兵力部署[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(8): 44 – 47.
- ZHANG D, ZENG J, ZHANG Y P, et al. Intelligent force deployment based on digital terrain analysis[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(8): 44 – 47.
- [25] 管宇锋, 王晓军, 阚飞, 等. 复杂地形下反低慢小作战效能仿真评估[J]. 系统仿真技术, 2021, 17(3): 175 – 179.
- GUAN Y F, WANG X J, KAN F, et al. Simulation evaluation of combat effectiveness of anti low slow small aircraft in complex terrain[J]. System Simulation Technology, 2021, 17(3): 175 – 179.
- [26] 谢瑞煜, 孙瑾, 赵建军. 防空武器系统复杂地形部署标定方法研究[J]. 现代防御技术, 2019, 47(1): 9 – 14.
- XIE R Y, SUN J, ZHAO J J. Calibration method of complex terrain deployment for air defense weapon system[J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(1): 9 – 14.
- [27] 邹宇皇. 高寒山地作战炮兵火力分配研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- ZUO Y H. Research on artillery fire distribution optimization in alpine mountain war[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [28] 唐巨室, 李东生, 高根支. 基于火力强度标准的三维要地防空部署评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(7): 57 – 61.
- TANG J S, LI D S, GAO G Z. Evaluation model of three-dimensional strategic point air defense deployment based on fire-power intensity standard[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(7): 57 – 61.
- [29] 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 F S, YANG Z H. Research on air defense effectiveness evaluation of missile-Gun combined air defense weapon system[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2021, 35(4): 34 – 41.
- [30] 马春茂. 弹炮结合防空武器系统总体设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- MA C M. Overall design of missile-gun combined air defense weapon system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [31] LIU G Q, CHEN W Y, CHENG H, et al. Study on a fire distribution model of integrated Naval Gun and laser weapon system[C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang: IEEE, 2018: 2959–2965.
- [32] 杨哲, 李曙林, 周莉, 等. 机载自卫压制干扰和箔条干扰下飞机生存力研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(4): 375 – 379.
- YANG Z, LI S L, ZHOU L, et al. Study of aircraft survivability under the conditions of self-defense jamming and chaff jamming[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(4): 375 – 379.
- [33] 马控柱, 刘飞. 地空导弹射击学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
- MA S Z, LIU F. Surface to air missile shooting[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2012.
- [34] 吴家明. 地面防空武器系统混合部署方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- WU J M. Research on mixed deployment method of ground air defense weapon system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [35] 杨荣军, 闫德恒, 王号. 考虑地形遮蔽的地空武器动态杀伤区计算方法[C]//中国指挥与控制学会. 第十一届中国指挥控制大会论文集. 南京: 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 2023: 5.
- YANG R J, YAN D H, WANG H. A Calculation Method for the Dynamic Killing Zone of Surface-to-Air Weapons Considering Terrain Masking[C]//Chinese Institute of Command and Control. Proceedings of the 11th China Command and Control Conference. Nanjing: The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 2023: 5.
- [36] 陈杰, 陈晨, 张娟, 等. 基于 Memetic 算法的要地防空优化部署方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(2): 242–248.
- CHEN J, CHEN C, ZHANG J, et al. Deployment optimization for point air defense based on memetic algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(2): 242–248.
- [37] 陈文奇. 防空导弹武器系统作战效能评估分析[D]. 厦

门: 厦门大学, 2006.

CHEN W Q. Evaluation and analysis of operational effectiveness of air defense missile weapon system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006.

[38] 暴励, 曾建潮. 一种双种群差分蜂群算法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 266 – 272.

BAO L, ZENG J C. A hi-group differential artificial bee colony algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(2): 266 – 272.

[39] 周新宇, 刘颖, 吴艳林, 等. 基于多元信息引导的人工蜂群算法[J]. 电子学报, 2024, 52(4): 1349 – 1363.

ZHOU X Y, LIU Y, WU Y L, et al. Artificial Bee Colony Algorithm Based on Multiple Information Guidance[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(4) : 1349 – 1363.

[40] 于文杰. 基于人工蜂群算法的无线传感器网络部署问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

YU W J. Research on deployment of wireless sensor networks based on artificial bee colony algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

[41] 王军, 谷良贤, 王博, 等. 毫米波制导弹系统误差及捕获概率研究[J]. 航空计算技术, 2012, 42(5): 25–27.

WANG J, GU L X, WANG B, et al. Research on system error analysis and acquisition probability of MMW guide weapon[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(5): 25–27.

[42] 王艳娇. 人工蜂群算法的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.

WANG Y J. Research and application of artificial bee colony algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

[43] 李晶晶, 张永敏, 田桂林, 等. 基于改进遗传算法的充电桩检测调度优化[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 19 – 27.

LI J J, ZHANG Y M, TIAN G L, et al. Scheduling optimization of charging pile detection based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2023, 42(5): 19 – 27.

[44] 王森, 姚建斌. 冬小麦大田中基于改进蚁群算法的传感器部署优化[J]. 现代信息科技, 2023, 7(14): 142 – 146.

WANG S, YAO J B. Sensor deployment optimization based on improved ant colony algorithm in winter wheat field[J]. Modern Information Technology, 2023, 7(14): 142 – 146.

[45] 陈佳美, 李世昂, 李玉峰, 等. 基于甲虫搜索的改进粒子群无人辅助网络部署优化算法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(5): 1697 – 1705.

CHEN J M, LI S A, LI Y F, et al. Improved particle swarm optimization unmanned aerial vehicle-assisted network deployment optimization algorithm based on beetle antennae search[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(5) : 1697 – 1705.

[46] 徐豫新. 破片杀伤式地空导弹战斗部杀伤概率计算[D]. 太原: 中北大学, 2008.

XU Y X. Calculation of kill probability of fragmentation surface-to-air missile warhead[D]. Taiyuan: North University of China, 2008.