

带精英集并行遗传算法的无人机干扰资源调度

邓 敏^{*①②} 伍志高^② 姚志强^② 陈永其^①

^①(中国电子科技集团第36研究所通信信息控制和安全技术重点实验室 嘉兴 314000)

^②(湘潭大学自动化与电子信息学院 湘潭 411105)

摘 要: 在中大规模无人机干扰资源调度中, 针对现有模型约束条件简单、调度算法适用规模较小的问题, 该文提出了带最少任务数约束的资源调度模型, 以最大化干扰效益和最小化成本为目标, 用层次分析法对效益与成本指标赋权, 并设计了一种用精英集加快收敛的改进并行遗传算法。在中等规模和500:500(干扰资源数:目标数)的更大规模仿真实验中, 所提算法与遗传算法、非支配排序遗传算法II、修复遗传算法、基于岛屿模型的并行遗传算法和自适应模拟退火遗传禁忌搜索算法的性能相比, 能在更短的时长内达到较优的目标函数值。

关键词: 干扰对抗; 资源调度; 遗传算法; 并行算法; 混合模型

中图分类号: TN974; TN972

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)06-2158-08

DOI: 10.11999/JEIT210349

Unmanned Aerial Vehicle Jamming Resource Scheduling Based on Parallel Genetic Algorithm with Elite Set

DENG Min^{①②} WU Zhigao^② YAO Zhiqiang^② CHEN Yongqi^①

^①(*Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, No. 36 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Jiaxing 314000, China*)

^②(*School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

Abstract: In order to solve the optimization problem of jamming resource scheduling in medium and large-scale Unmanned Aerial Vehicle (UAV) jamming scenarios, a jamming resource scheduling model that can meet the minimum number of tasks constraint is proposed to improve the simple constraints and small-scale solution algorithms of the existing models. The interference benefit and cost indicators are weighted by the analytic hierarchy process. Then an improved parallel genetic algorithm is designed, where the elite set is introduced to accelerate the convergence of the algorithm. The simulation results in medium scale and larger scale jamming situations, such as 500:500 (number of jamming resources: number of targets) show that the proposed algorithm converges faster and achieves better objective function value than the existing representative and improved genetic algorithms.

Key words: Interference countermeasure; Resource scheduling; Genetic algorithm; Parallel algorithm; Hybrid mode

1 引言

近年来, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)应用领域不断扩展, 如何高效使用反无人机设备反制、干扰“黑飞”无人机, 防护禁飞区域、

防止重大事件现场信息泄露、打击利用无人机进行违法活动, 成为行业热点, 而通过电磁干扰使对方设备瘫痪是主要目标^[1]。随着电磁环境复杂化、无人机行动方式协同化^[2], 调度各种规模数量的干扰资源对无人机群进行协同干扰成为一种趋势。资源调度问题是一种NP(Nondeterministic Polynomially)问题^[3], 至今没有最优的求解方法。已有研究集中在调度建模和求解算法两个方面。

在干扰资源调度建模与优化求解中, 用最小的调度成本达到最大的干扰效益是主要目的。在模型构建方面, 文献[4]将目标威胁等级、资源干扰样式以及目标雷达网的检测概率作为干扰效益, 并对干

收稿日期: 2021-04-23; 改回日期: 2021-10-12; 网络出版: 2022-04-17

*通信作者: 邓敏 iemdeng@xtu.edu.cn

基金项目: 湖南省自然科学基金(2019JJ50620), 国家重点研发计划(2020YFA0713502), GF科技重点实验室基金(61421060404)

Foundation Items: The Provincial Natural Science Foundation of Hunan (2019JJ50620), The National Key R&D Program of China (2020YFA0713502), The National Science Key Laboratory Foundation (61421060404)

扰数量、模式数量、被干扰数量和相同模式干扰机数量进行了限制。文献[5]以资源的协同规则构建了基于协同目标分配规则的模型,以反辐射杀伤收益为目标,并对是否攻击、单个无人机可攻击数量和目标可被攻击数量进行了约束。文献[6]根据干扰前后被拦截的雷达脉冲的幅度和数据速率变化,提出了一种从侦察和干扰系统的角度定量评估自我筛选干扰有效性和效果的方法。文献[7]从抑制功率、频率对准比、干扰覆盖空间和干扰模式分析收益,但仅对单个资源的可干扰数量和单个目标的被干扰数量进行了限制。文献[8]以雷达网检测概率为评价指标,计算了单部雷达在多样式干扰下的检测概率,再映射到计算全网的受干扰影响程度。文献[9]将UAV的飞行距离作为效益,飞行时间作为成本,并对资源和目标的干扰数量以及被干扰数量、目标执行顺序、时间窗口、最大飞行路径和时间以及同时到达时间这几个方面进行约束。总体来说,现有单个干扰资源调度模型的评价指标类型较少,资源与目标的分配模式约束多为一对一或多对一,较少考虑完成任务数和资源使用情况的约束。而在一些应用中,只有当对方被干扰掉的无人机达到一定数量时,才能达到有效防护和反制目的,上述研究并未充分凸显出干扰无人机群的复杂环境。

根据资源调度优化问题的模型,已有研究提出了一些有效的求解算法。文献[10]提出了带动态交叉率与变异率的遗传算法,维持了群体的多样性,且避免了过早收敛。文献[11]提出了一种分层多代理优化算法,结合了多智能体优化算法和遗传算法(Genetic Algorithm, GA),以提高资源利用率。文献[12]基于最佳动态反应设计了集中式迭代干扰策略选择算法,并基于学习自动机原理提出了分布式有限反馈干扰资源分配算法。文献[13]通过引入贪婪算法,增强了遗传算法的性能。文献[14]和文献[4]分别提出自适应蚁群算法、混合量子行为粒子群优化和自调整遗传算法,提高算法可靠性。文献[15]则利用人工免疫系统来求解问题。文献[16]聚焦于干扰抑制法的干扰能量比,将所提模型松弛为一个凸优化问题。文献[17]提出一种基于自举专家轨迹分层强化学习的干扰资源分配决策算法,解决跳频干扰决策难题。目前智能算法大多被用于求解小规模的资源调度问题,求解速度快于传统数学算法。文献[18]提出改进遗传算法,验证了大规模(如500:500)资源调度性能,但方案不能保证最少完成任务数等复杂情况。上述文献大多采用小规模、较少约束的干扰无人机群资源调度模型,对所用算法能达到的时效性和规模扩展后的适用性提及较少。而此

类算法在中、大规模、多约束的情况下会有运行时间过长、局部收敛等问题,求解复杂度和耗时会增加,设计算法需要在时间和优化目标值之间折中。

并行计算因具有加速代码运行和避免算法过早收敛的特点,成为改进智能算法的一个方向^[19]。并行进化算法有个体分布和维度分布两种类别。其中常用的个体分布有主-从模型、岛屿模型、细胞模型、混合模型以及池模型。基于并行进化模型的算法能够比非并行算法更快解决中、大规模的干扰资源调度问题,且能得到近似的优化目标值。

为了解决中、大规模复杂干扰资源调度问题,本文以干扰效益最大化、干扰成本最小化为目标,构建了资源调度优化模型,并提出一种基于主-从、岛屿混合模型的改进并行遗传算法。主要工作如下:(1)干扰效益从距离、频段、威胁等级以及功率压制比4个方面进行评价,干扰成本从资源占用、地理位置和被发现概率3个方面进行评价。(2)为灵活适应多无人机干扰环境,允许一个干扰资源最多能干扰 K_1 个目标,一个目标最多可被分配 K_2 个资源。(3)将资源被分配给某个目标与否建模为0-1规划,把某个目标被分配了干扰资源看作一个任务,提出最少完成任务数的约束,则需非线性约束来描述。与其他模型相比,所提模型的约束更复杂、对抗规模更大,在允许多对多的场景中保证优化调度方案能完成的最少任务数,并对闲置资源数量进行了限制。(4)针对中、大规模情况下,现有算法收敛过慢、耗时过长的问題,本文提出基于混合模型的改进并行遗传算法,并通过对比传统遗传算法、非支配排序遗传算法II^[20]、修复遗传算法^[18]、基于岛屿模型的并行遗传算法^[21]和自适应模拟退火遗传禁忌搜索算法^[22],验证在迭代次数、耗时、目标值方面的性能。

2 干扰资源调度模型

2.1 干扰资源调度场景

假设在复杂通信场景中,多架无人机分布在海、陆、空3种地理位置中,由 M 个干扰资源和 N 个被干扰目标组成,每个干扰资源用序号 i , $i \in I = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示,每个目标用序号 j , $j \in J = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示。具体干扰关系如图1所示。其中:单个干扰资源 i 最多可以干扰 K_1 ($1 \leq K_1 \leq N$)个目标;单个目标 j 最多可以被 K_2 ($1 \leq K_2 \leq M$)个干扰资源干扰;为了节约成本,这里限定未被调用的资源数要大于等于 $K_3 M$ ($0 \leq K_3 \leq 1$)且小于等于 $K_4 M$ ($0 \leq K_4 \leq 1$);要有 $K_5 N$ ($0 \leq K_5 \leq 1$)以上的目标被分配有干扰资源,即最少完成任务数为 $K_5 N$ 。

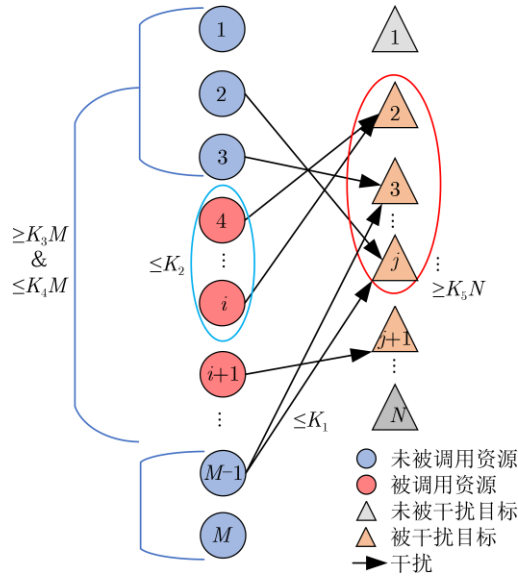


图1 干扰关系

假设目标的相关参数已通过侦察手段得到, 则可通过分配干扰资源给合适的目标来得到干扰效益, 同时支付相应的干扰成本。干扰效益和成本可根据双方参数计算相应的评估指标值来确定。其中, 目标与干扰源通信的信道环境可根据实际场景设置经历信道衰落。在计算干扰效益和成本指标时, 本文的接收功率和回波功率设置为空对空通信环境^[23]中衰落后的功率。干扰效益和干扰成本则通过层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)进行加权整合, 作为离散组合优化问题的目标函数, 将双目标问题转化为单目标问题。2.2节将介绍干扰资源调度的评价指标, 2.3节介绍干扰资源调度的数学模型。

2.2 干扰资源调度评价指标

2.2.1 干扰效益评价指标

(1) 干扰作用距离 S_{1ij}

由于只有目标位于干扰资源的有效干扰范围内才有干扰效果, 本文根据文献[24]利用干扰资源 i 与目标 j 之间的距离 T_{ij} 和资源 i 对目标 j 的有效干扰半径 D_{ij} 的比值来评价干扰效益。当 $T_{ij}/D_{ij} < 1$ 时才具有干扰价值, 且比值越小, 干扰资源 i 与目标 j 越近, 干扰价值越大, 即 S_{1ij} 越大; 若 $T_{ij}/D_{ij} > 1$ 则表示没有干扰价值。具体公式为

$$S_{1ij} = \begin{cases} 0, & T_{ij}/D_{ij} > 1 \\ 1 - T_{ij}/D_{ij}, & T_{ij}/D_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 干扰工作频段 S_{2ij}

根据干扰资源 i 与目标 j 的工作频段的重叠情况来衡量干扰效果^[12]。若干扰资源的频段范围完全包括目标的工作频段, 则 S_{2ij} 为1; 若部分重叠, 则

S_{2ij} 随着重叠部分的增大而增大; 若两个频段没有交集, 则 S_{2ij} 为0。具体公式为

$$S_{2ij} = \begin{cases} 0, & F_{i1} < F_{j2} \text{ 或 } F_{j1} < F_{i2} \\ \frac{\min(F_{i1}, F_{j1}) - \max(F_{i2}, F_{j2})}{F_{j1} - F_{j2}}, & \text{其它} \\ 1, & F_{i1} \geq F_{j1} \text{ 和 } F_{i2} \leq F_{j2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, F_{i1} 为干扰资源 i 的频段上界, F_{i2} 为干扰资源 i 的频段下界, F_{j1} 为目标 j 的频段上界, F_{j2} 为目标 j 的频段下界。

(3) 目标威胁等级 S_{3ij}

根据侦察结果, 综合考虑目标的部分属性, 例如频率、功率等, 评价目标的威胁等级 S_{3ij} 。其取值范围为[0,1], S_{3ij} 越大表示目标的威胁等级越高。

(4) 干扰功率压制比 S_{4ij}

通过比较干扰资源发射功率与目标信号功率的比值, 与预设压制阈值系数 L_j 的大小, 来确定目标被资源压制的程度^[10]。设 P_{ji} 为目标 j 接收到的干扰资源 i 的信号功率, P_{js} 为目标 j 接收到的回波功率。若 P_{ji} 与 P_{js} 的比值 $> 2L_j$, 则可完全压制目标, 干扰功率压制比 S_{4ij} 则为1。具体公式为

$$S_{4ij} = \begin{cases} 1, & \frac{P_{ji}}{P_{js}} \geq 2L_j \\ 2/3 \left(\frac{P_{ji}/P_{js}}{L_j} - 0.5 \right), & 0.5L_j < \frac{P_{ji}}{P_{js}} < 2L_j \\ 0, & \frac{P_{ji}}{P_{js}} \leq 0.5L_j \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 干扰成本评价指标

(1) 资源占用成本 C_{1ij}

每一个被使用的干扰资源都会产生一定的成本, 将占用资源数的成本量化为

$$C_{1ij} = \begin{cases} 1, & \text{占用干扰资源} i \text{ 干扰目标} j \\ 0, & \text{不占用干扰资源} i \text{ 干扰目标} j \end{cases} \quad (4)$$

(2) 地理位置调度成本 C_{2ij}

由于各干扰资源所处的地理位置不同, 其调度成本也不同, 可由经验设置调度成本 C_{2ij} , 预设值为

$$C_{2ij} = \begin{cases} 0.276, & \text{陆地} \\ 0.562, & \text{海洋} \\ 0.732, & \text{空中} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 被发现概率 C_{3ij}

干扰资源在执行干扰任务时存在被发现的概率, 被发现后资源有被击毁的可能, 默认被发现后将无法执行任务, 则根据侦察时检测敌方的虚警概率以及检测概率有^[23]

$$C_{3ij} = 1 - \prod_{q=1}^Q (1 - P_D^{qij}) \quad (6)$$

其中, Q 为干扰资源 i 干扰目标 j 的次数; P_D^{qij} 为第 q 次执行任务时, 干扰资源 i 被目标 j 检测到的概率, 公式为

$$P_D^{qij} = \frac{\exp\left[\frac{(R_0^j/R_{ij})^4 - A}{0.12A + 1.7}\right]}{1 + \exp\left[\frac{(R_0^j/R_{ij})^4 - A}{0.12A + 1.7}\right]} \quad (7)$$

其中, $A = \ln(0.62/P_{fa})$; P_{fa} 为虚警概率; R_0^j 为目标 j 信噪比达到最小可探测值时的探测距离; R_{ij} 为目标 j 与资源 i 的距离。

2.3 数学模型

定义向量 $\Omega_1 = (w_1, w_2, \dots, w_4)$ 为4项干扰效益评估指标权重, $\Omega_2 = (v_1, v_2, v_3)$ 为3项干扰成本评估指标权重, 本文采用多准则决策中的层次分析法^[25]来得出以上权重, 则第 i 个干扰资源干扰第 j 个目标的最终干扰评估值可表示为

$$E_{ij} = \sum_{n=1}^4 w_n S_{nij} - \sum_{m=1}^3 v_m C_{mij} \quad (8)$$

最终干扰评估矩阵可表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1N} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ E_{M1} & E_{M2} & \cdots & E_{MN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

若设调度决策变量 x_{ij} 为

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{不分配干扰资源 } i \text{ 给目标 } j \\ 1, & \text{分配干扰资源 } i \text{ 给目标 } j \end{cases} \quad (10)$$

则资源调度优化模型为

$$\max U = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} E_{ij} \quad (11)$$

$$\text{s.t.} : \sum_{j=1}^N x_{ij} \leq K_1 \quad (11a)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} \leq K_2 \quad (11b)$$

$$(1 - K_4)M \leq \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} \leq (1 - K_3)M \quad (11c)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^N F_j &\geq K_5 N \\ F_j &= \begin{cases} 0, & \sum_{i=1}^M x_{ij} = 0 \\ 1, & \sum_{i=1}^M x_{ij} > 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (11d)$$

其中, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 的定义见2.1节场景部分, 则 $K_3 M$ 和 $K_4 M$ 分别为未调用的资源数的最小值和最大值, 以进一步约束调用资源的平均成本; $K_5 N$ 为被分配有干扰资源的最少目标数。

该资源调度优化模型的目标函数为非线性非凸的, 约束条件中也含有非线性条件, 难以用现有数学优化方法直接求解。

3 并行遗传模型求解算法

本文提出基于混合主-从、孤岛模型的并行遗传算法, 来求解上述干扰资源调度问题。

3.1 基于主-从和岛屿模型的混合模型

主-从模式中, 主处理器处理交叉变异和选择操作, 随后把个体发送给从处理器。从处理器评估个体的适应度, 且不需要与其他从处理器进行信息交流, 从处理器之间相互独立。

岛屿模型与主-从模型不同之处在于将种群划分为不同子种群后, 各子种群之间独立进化, 只在固定的间隔与周围子种群进行随机的信息交流。岛屿模型的优点是节省时间, 提高进化算法的全局收敛能力, 但存在过早收敛的可能。

混合模型结构如图2所示, 将种群划分为不同子种群, 子种群独立进化一定次数后, 将各自的最优个体上传至精英集。精英集将当前最优个体与全局最优个体进行比较后, 更新全局最优个体, 并通过信息交换将其发送给各子种群, 继续进化。

混合模型结合了主-从模型可以接收全局信息和岛屿模型提高收敛能力的特点, 既增加了种群的多样性, 又减少了过早收敛的可能。

3.2 基于混合模型的并行遗传算法

使用混合模型的关键是设置多个并行的子种群。并行的子种群在信息交流阶段之前各自并行进行遗传迭代, 减少迭代耗时; 在信息交流阶段产生精英集合 \mathbf{G} , 保存全局最优个体的最优精英 b_0 。

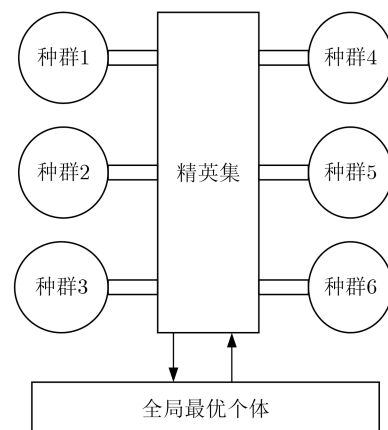


图2 混合主-从和岛屿模型结构

S 个子种群会在整个计算中进行多次信息交流。在信息交流阶段中,各子种群上传自己种群中的最优个体 $g_k(k=1,2,\dots,S)$ 到精英集合中,比较后将当前最优个体 b_1 与全局最优个体 b_0 比较,之后更新全局最优个体 b_0 并将其发送回各子种群,进入下一阶段信息交流。干扰资源调度算法步骤如表1所示。

遗传算法采取整数编码,每个个体表示为一个长度为干扰资源总数的向量,元素序号表示干扰资源的序号,向量中每个元素中的值为该干扰资源被分配的目标序号,若没有被分配目标则默认为0。

算法使用 ≥ 3 个子种群并行进行遗传进化,随后输出各子种群的最优和最差个体,再通过信息交换,进行精英集更新等操作。

在算法运算中,通过多个子种群同时进行搜

索,结合遗传交叉和变异操作,算法的搜索空间相对扩大,可以显著减少算法局部收敛的概率。同时,算法中的精英集收集和广播各子种群的最优个体,可以加快算法收敛速度。

4 仿真结果对比

假设干扰方有 M 个干扰资源(M 默认为100),干扰 N 个目标(N 默认为50),目标参数已通过侦察等手段获得。干扰约束条件同2.3节, $K_1=1$, $K_2=2$, $K_3=0.05$, $K_4=0.5$, $K_5=0.8$ 。经多次遗传算法参数调整实验,并行遗传算法的交叉概率取0.8,变异概率取0.6,最大迭代次数为1500^[11],初始种群规模根据调度规模和子种群数量进行调整,在中等规模下初始种群规模为120。

本文将提出的基于混合模型的并行遗传算法,与遗传算法、修复遗传算法^[18]、非支配排序遗传算法II^[20]、基于岛屿模型的并行遗传算法^[21]和自适应模拟退火遗传禁忌搜索算法^[22]进行仿真比较。资源与目标的空间坐标随机变量服从均匀分布,包含海、陆、空地理属性,具体见2.2.2节干扰成本评价指标。

图3为单次中、大规模资源调度优化的目标函数值迭代趋势对比。其中,修复遗传算法在中间每次迭代中没有及时修正为满足多对一、最少完成任务数等多限制条件的可行解,虽具有最高的目标函数值,但迭代结束后的可行解目标函数值较低。为了便于对比,图中在修复遗传算法基础上,增加了每次迭代修复可行解的目标函数值统计。

由于本文算法通过3个子种群并行搜索,加大了可行解的搜索空间,减少了遗传算法局部收敛的可能性,而混合模型中精英集的引入,能够提高搜索速度。通过图3可以看出,本文算法的迭代收敛次数和收敛后目标函数值的性能。

表2为用改进的基于混合模型的并行遗传算法与其余5种算法进行不同规模下1500次迭代干扰资源调度优化的对比数据,取100次仿真的用时平均值与最终目标函数值平均值。由于非支配排序遗传

表1 基于混合模型的并行遗传算法(算法1)

1: $t=1$ // 迭代次数
2: 计算总干扰效益矩阵 E , 规模为 $M \times N$
3: 初始化 S 个子种群($pop_1, pop_2, \dots, pop_s$), 种群规模为 P , 设置每个子种群的最差个体 g_{1k} , 全局最优个体 b_0 ; $S \geq 3$, 根据算法计算最短时间和并行线程而定;
4: while($t < t_{max}$)
5: parfor $s=1:S$; S 个子种群并行计算
6: (pop_k, g_k, g_{1k})=cacaulation(pop_k); //子种群进行选择, 交叉, 变异等遗传操作, 并计算操作后的目标函数值, 选出最优个体 g_k 和最差个体 g_{1k} , $k=1,2,\dots,S$
7: end parfor
8: $G=(g_1, g_2, \dots, g_k)$; $k=1,2,\dots,S$
9: $b_1=\max(G)$
10: if $b_1 > b_0$
11: $b_0=b_1$;
12: end if
13: for $k=1:S$
14: $pop_k=change(g_{1k}, b_0, pop_k)$ //所有子种群将最差个体 g_{1k} 替换为 b_0
15: end for
16: end while

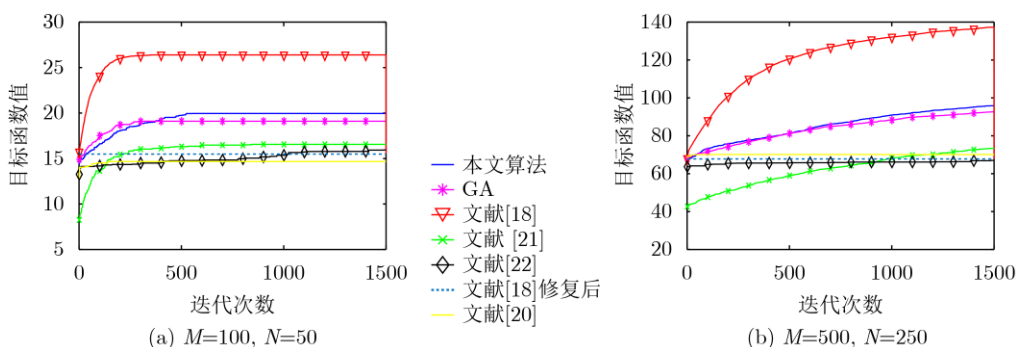


图3 中、大规模资源调度优化目标函数值迭代趋势对比

算法II单次迭代运算方式与其余算法差异较大且耗时更长，其最大迭代次数仅取150。从表中可知提出的基于混合模型的并行遗传算法在指定迭代次数和计算至收敛两种情况都具有较短的计算时间和最高的目标函数值，且随着规模不断增大，优势越来越明显。

图4为判断收敛后停止计算的上述算法在100次仿真中用时平均值和最终目标函数值平均值对比数据，最大迭代次数取10000次，超出后停止计算。非支配排序遗传算法II由于上述原因取150次。时间方面，修复遗传算法虽然计算时间快，但没有在每次迭代后都修复不可行解，收敛之后再修复得到的满足约束条件的可行解的目标函数值并不高。

由于中、大规模资源调度问题中，启发式算法难以在多项式时间内取得最优解，为了对比各启发式算法取得最优解的稳定性，在小规模下，通过穷举法获得最优解，再将各启发式算法在同样的小规模情况下进行仿真实验。表3为在小规模(12:6)下，上述算法在100次仿真中达到最优的百分比统计，

最优解的取值精度为1位小数。从表中可知，小规模的情况下基于混合模型的并行遗传算法达到最优的次数最多。

为进一步研究所提算法在不同建模环境中的优化求解性能，本文在上述随机分布无人机干扰源、目标位置的基础上，考虑一种干扰源和目标群之间有一定空间界限的场景。图5为改变后的无人机干扰源和目标3维位置分布图。其中，最远目标离干扰源的距离为其信噪比达到最小可探测值时的探测距离。以中等规模资源调度问题为例，本文与5种对比算法得到的目标函数值迭代趋势如图6所示，可以看出本文算法仍能达到更优的目标函数值。当对抗场景中的资源或目标参数发生改变时，亦可将评估指标归一化，更新效益矩阵 E 后，使用本文算法优化调度方案。

5 结论

本文针对中、大规模干扰资源调度的时效和综合效益优化问题，构建了联合优化4种干扰效益和

表 2 迭代1500次所用时间/最终目标函数值对比(100次仿真平均值)

算法	对抗规模									
	100:50		200:100		400:200		500:250		500:500	
	耗时(s)	函数值	耗时(s)	函数值	耗时(s)	函数值	耗时(s)	函数值	耗时(s)	函数值
本文算法	3.61	19.87	12.16	42.01	44.66	81.13	69.74	97.27	69.94	120.35
GA	9.84	18.56	37.95	37.85	101.03	76.82	217.29	92.06	212.15	121.03
文献[18]	1.83	14.63	2.42	30.13	3.65	55.34	4.11	67.65	4.20	68.36
文献[21]	5.42	15.72	13.82	36.79	54.42	74.33	78.12	90.80	80.67	98.19
文献[20]	287.60	14.38	1126.33	28.82	3912.38	56.50	6054.23	70.09	6343.78	75.40
文献[22]	13.57	15.71	53.01	28.67	219.72	54.54	300.68	67.34	310.36	68.93

表 3 在 $M=12, N=6$ 规模下各算法在100次计算中取得最优解次数的百分比

算法	本文算法	GA	文献[18]	文献[21]	文献[20]	文献[22]
百分比(%)	96	41	24	80	0	4

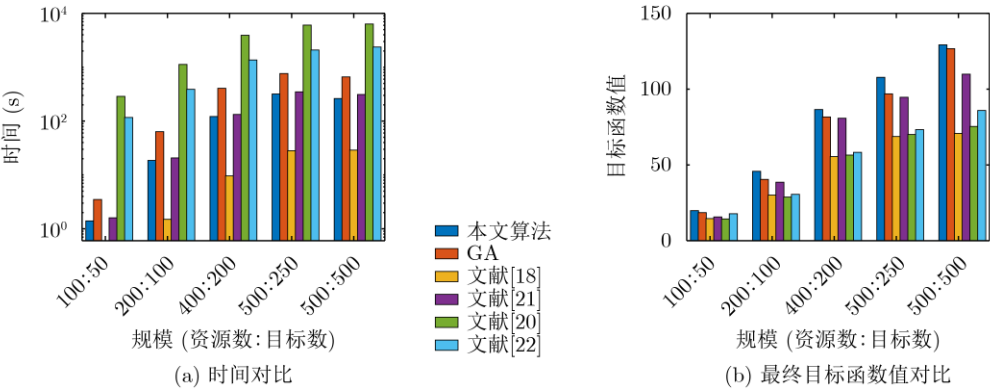


图 4 算法收敛性能对比(100次仿真平均)

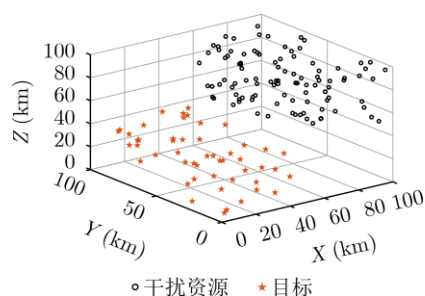


图5 干扰资源与目标的空间位置

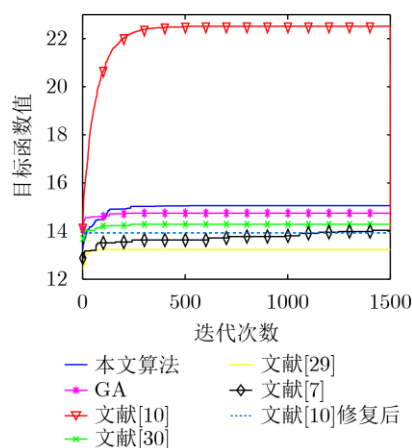


图6 中规模资源调度优化的目标函数值迭代趋势对比

3种干扰成本的多目标优化模型, 提出在允许多个干扰资源干扰单个目标、单个资源可同时干扰多个目标等条件下, 保证最少完成任务数的约束, 并提出基于混合模型的带精英集并行遗传算法来求解优化问题。

仿真结果表明, 与基于岛屿模型的并行遗传算法、非支配排序遗传算法II和自适应模拟退火遗传禁忌搜索算法、修复遗传算法、经典遗传算法相比, 所提算法在中、大规模下能够以较好稳定性在较短的时长内得到较高的目标函数值。

在其他领域的任务分配或资源调度应用中, 可通过将分配、调度的对象处理成资源与目标对应关系, 并采用合适的运算处理器, 根据规模调整并行子种群数量后, 将本文算法进行扩展应用, 可提高时效性。后续研究将结合持续调度场景, 根据不断变化的干扰场景, 构建动态资源调度模型, 引入新兴的侦干一体机, 提出侦察干扰双层资源调度模型和算法, 以适应各种规模资源调度优化。

参考文献

- [1] AILIYA, YI Wei, and YUAN Ye. Reinforcement learning-based joint adaptive frequency hopping and pulse-width allocation for radar anti-jamming[C]. Proceedings of 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20), Florence, Italy, 2020: 1–6. doi: 10.1109/RadarConf2043947.2020.9266402.
- [2] 赵太飞, 宫春杰, 张港, 等. 一种无人机集群安全高效的分区集结控制策略[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(8): 2181–2188. doi: 10.11999/JEIT200601.
ZHAO Taifei, GONG Chunjie, ZHANG Gang, *et al.* A safe and high efficiency control strategy of unmanned aerial vehicles partition rendezvous[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(8): 2181–2188. doi: 10.11999/JEIT200601.
- [3] 石荣, 刘江. 干扰资源分配问题的智能优化应用研究综述[J]. 电光与控制, 2019, 26(10): 54–61. doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2019.10.012.
SHI Rong and LIU Jiang. Application of intelligent optimization methods in jamming resource allocation: A review[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(10): 54–61. doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2019.10.012.
- [4] JIANG Haiqing, ZHANG Yangrui, and XU Hongyi. Optimal allocation of cooperative jamming resource based on hybrid quantum-behaved particle swarm optimisation and genetic algorithm[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(1): 185–192. doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0119.
- [5] 张阳, 司光亚, 王艳正. 无人机集群网电攻击行动协同目标分配建模[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(9): 2025–2033. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.09.15.
ZHANG Yang, SI Guangya, and WANG Yanzheng. Modeling of cooperative target allocation of the UAV swarm cyberspace attack action[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(9): 2025–2033. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.09.15.
- [6] OU Jian, ZHAO Feng, AI Xiaofeng, *et al.* Quantitative evaluation for self-screening jamming effectiveness based on the changing characteristics of intercepted radar signals[C]. Proceedings of 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2016: 1–5. doi: 10.1109/RADAR.2016.8059366.
- [7] YE Fang, CHE Fei, and GAO Lipeng. Multiobjective cognitive cooperative jamming decision-making method based on Tabu search-artificial bee colony algorithm[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 2018: 7490895. doi: 10.1155/2018/7490895.
- [8] 张养瑞, 高梅国, 罗皓月, 等. 基于检测概率的雷达网协同干扰效果评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1778–1786. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.08.10.
ZHANG Yangrui, GAO Meiguo, LUO Haoyue, *et al.* Evaluation method of cooperative jamming effect on radar net based on detection probability[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(8): 1778–1786. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.08.10.
- [9] ZHAO Ming, ZHAO Lingling, SU Xiaohong, *et al.* Improved discrete mapping differential evolution for multi-unmanned aerial vehicles cooperative multi-targets assignment under unified model[J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2017, 8(3): 765–780. doi: 10.1007/s13042-015-0364-3.

- [10] 段先华, 孙庆国, 蔡丹. 基于改进遗传算法的协同干扰资源优化分配[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版, 2016, 30(5): 466–472. doi: 10.3969/j.issn.1673-4807.2016.05.011.
DUAN Xianhua, SUN Qingguo, and CAI Dan. Optimization assignment for cooperative jamming resources based on improved genetic algorithms[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 30(5): 466–472. doi: 10.3969/j.issn.1673-4807.2016.05.011.
- [11] GAO Xiangqiang, LIU Rongke, and KAUSHIK A. Hierarchical multi-agent optimization for resource allocation in cloud computing[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2021, 32(3): 692–707. doi: 10.1109/TPDS.2020.3030920.
- [12] 韩鹏, 张龙. 雷达干扰资源优化分配博弈模型和算法[J]. 现代雷达, 2019, 41(2): 78–83, 90. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2019.02.018.
HAN Peng and ZHANG Long. Game model and algorithm of Radar jamming resources optimization allocation[J]. *Modern Radar*, 2019, 41(2): 78–83, 90. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2019.02.018.
- [13] YIN Changsheng, YANG Ruopeng, ZHU Wei, *et al.* Research on Radio frequency assignment method based on improved genetic algorithm[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD), Chengdu, China, 2019: 358–361. doi: 10.1109/ICAIBD.2019.8836999.
- [14] YANG Jiao. Research on optimized reconfiguration of distributed distribution network based on ant colony optimization algorithm[C]. Proceedings of 2020 International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA), Guangzhou, China, 2020: 20–23. doi: 10.1109/ICCEA50009.2020.00012.
- [15] YU V F, QIU Meng, PAN He, *et al.* An improved immunoglobulin-based artificial immune system for the aircraft scheduling problem with alternate aircrafts[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 16532–16545. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3051971.
- [16] WANG Xiangtuan, HUANG Tianyao, and LIU Yimin. Resource allocation for random selection of distributed jammer towards multistatic Radar system[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 29048–29055. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053762.
- [17] 许华, 宋佰霖, 蒋磊, 等. 一种通信对抗干扰资源分配智能决策算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(11): 3086–3095. doi: 10.11999/JEIT210115.
XU Hua, SONG Bailin, JIANG Lei, *et al.* An intelligent decision-making algorithm for communication countermeasure jamming resource allocation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(11): 3086–3095. doi: 10.11999/JEIT210115.
- [18] XUE Y, ZHUANG Y, NI Q T, *et al.* One improved genetic algorithm applied in the problem of dynamic jamming resource scheduling with multi-objective and multi-constraint[C]. Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), Changsha, China, 2010: 708–712. doi: 10.1109/BICTA.2010.5645212.
- [19] GONG Yuejiao, CHEN Weineng, ZHAN Zhihui, *et al.* Distributed evolutionary algorithms and their models: A survey of the state-of-the-art[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 34: 286–300. doi: 10.1016/j.asoc.2015.04.061.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182–197. doi: 10.1109/4235.996017.
- [21] KIZIL A and KARABULUT K. Effects of parameters of an island model parallel genetic algorithm for the quadratic assignment problem[C]. Proceedings of the 8th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), Toyama, Japan, 2019: 444–449. doi: 10.1109/IIAI-AAI.2019.00097.
- [22] DENG Liyuan, YANG Ping, and LIU Weidong. An improved genetic algorithm[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2019: 47–51. doi: 10.1109/ICCC47050.2019.9064374.
- [23] 邓兵, 张韫, 李炳荣. 通信对抗原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
DENG Bin, ZHANG Yun, and LI Bingrong. Principles and Applications of Communications Countermeasures[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [24] 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. doi: 10.3321/j.issn:1000-1093.2007.05.005.
SHENG Yang, CHENG Yongguang, and LI Xiuhe. Research on optimal distribution of Radar jamming resource based on zero-one programming[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(5): 528–532. doi: 10.3321/j.issn:1000-1093.2007.05.005.
- [25] LIU Yan, ECKERT C M, and EARL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 161: 113738. doi: 10.1016/j.eswa.2020.113738.
- 邓 敏: 女, 1987年生, 讲师, 研究方向为通信干扰对抗、认知无线电。
伍志高: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为干扰资源调度。
姚志强: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为导航定位、下一代宽带无线通信。
陈永其: 男, 1969年生, 研究员级高级工程师, 研究方向为数字信号处理、特种通信。

责任编辑: 陈 倩