

控制与决策

Control and Decision

面向点与区域目标联合成像侦察的多无人机协同任务规划

洪芳宇, 张涛, 杨昊, 伍国华

引用本文:

洪芳宇, 张涛, 杨昊, 等. 面向点与区域目标联合成像侦察的多无人机协同任务规划[J]. *控制与决策*, 2026, 41(4): 1122-1134.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0827>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向多目标侦察任务的无人机航线规划

UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions

控制与决策. 2021, 36(5): 1191-1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1284>

基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法

A two-stage iterative optimization method for the coordinated task planning of space and air observation resources

控制与决策. 2021, 36(5): 1147-1156 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1193>

多无人机协同直播场景下自适应任务卸载决策

Adaptive task offloading decision of multi-UAVs cooperation in live broadcasting scenario

控制与决策. 2021, 36(4): 974-982 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1104>

天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法

Planning model and parallel competing memetic algorithm for space-near space-air based cooperative earth observation missions

控制与决策. 2021, 36(3): 523-533 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0732>

分布式无人机的时变编队非线性控制设计

Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs

控制与决策. 2021, 36(10): 2490-2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

面向点与区域目标联合成像侦察的多无人机 协同任务规划

洪芳宇¹, 张涛^{2†}, 杨昊¹, 伍国华³

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710100;
3. 中南大学 自动化学院, 长沙 410017)

摘要: 无人机在成像侦察领域的应用是提升战场侦察效能的重要手段. 研究一种多无人机协同的点与区域目标联合成像侦察任务规划问题, 其中区域侦察任务可由多架性能各异的无人机联盟协同侦察. 鉴于此, 建立以最小化侦察任务执行时间和侦察失败任务数量为优化目标的混合整数规划模型, 重点考虑机载成像设备能力、侦察任务成像质量要求以及时间窗等多重约束, 提出一种领域知识驱动的多无人机协同侦察任务规划方法求解. 首先, 根据解空间结构重塑问题理解, 将原问题分解为多机任务分配和单机任务规划两阶段求解. 为加快算法求解, 依据问题特征设计基于最优联盟的多机任务分配算法和联盟优先的单机任务调度算法产生高质量的初始解. 然后, 在迭代优化阶段, 从最优性条件出发, 设计 4 种问题领域知识驱动的多机任务调整因子以及包含 4 种特殊邻域结构的改进变邻域下降算法, 向最优解方向搜索高质量多机任务分配方案和单机任务调度方案. 最后, 通过大量仿真实验验证所提出方法在优化任务完成率和侦察任务执行时间上的优势. 此外, 通过一系列敏感性分析识别点/区域侦察任务比例、无人机数量和成像传感器能力等 3 个关键因素对结果的影响.

关键词: 多无人机协同; 点/区域目标覆盖; 成像侦察; 无人机任务规划方法

中图分类号: V19 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0827

引用格式: 洪芳宇, 张涛, 杨昊, 等. 面向点与区域目标联合成像侦察的多无人机协同任务规划 [J]. 控制与决策, 2026, 41(4): 1122-1134.

Multi-UAV cooperative task planning for joint point-and-area imaging reconnaissance

HONG Fang-yu¹, ZHANG Tao^{2†}, YANG Hao¹, WU Guo-hua³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710100, China;
3. School of Automation, Central South University, Changsha 410017, China)

Abstract: The application of unmanned aerial vehicles (UAVs) in imaging reconnaissance has been an important technology for improving the reconnaissance efficiency in modern warfare. This paper studies a multi-UAV task scheduling problem for joint point and area target imaging reconnaissance, wherein an area target can be collaboratively covered by a coalition consisting of multiple heterogeneous UAVs. A mixed-integer programming model is formulated to minimize total reconnaissance time and the number of failed reconnaissance tasks. The model considers multiple complex constraints including imaging sensor capabilities, task imaging quality requirements, and time windows. A knowledge-driven task planning algorithm for collaborative heterogeneous multi-UAV reconnaissance (HMUR-KTPA) is designed to solve this problem. First, the original problem is decomposed into two phases: multi-UAV task allocation and single-UAV task sequencing. In the initial phase, an optimal coalition allocation (OCA) method and a coalition-first-assigned (CFA) algorithm are developed to generate high-quality initial solutions. In the optimization phase, four domain knowledge-driven task adjustment operators and an improved variable neighborhood descent (IVND) algorithm with four problem-specific scheduling operators are designed to search for optimal task allocation and scheduling solutions. Finally, extensive experiments and comparative studies are conducted to verify the effectiveness of the

收稿日期: 2025-08-10; 录用日期: 2025-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62373380); 湖南省自然科学基金项目 (2025JJ10007).

责任编辑: 王凌.

†通信作者. E-mail: zt324101@126.com.

proposed approach in improving task completion rates and reducing execution time. Furthermore, several sensitivity analyses identify three critical influencing factors on the HMUR-KTPA.

Keywords: cooperative multi-UAV; point/area target coverage; imaging reconnaissance; UAV task planning methods

0 引言

现代战争中高效的敌情获取手段是占据战场主动权的关键. 徒步/车载抵近侦察等传统军事侦察手段危险性高且效率低下, 难以适应现代战场的侦察需求. 无人机凭借其成本低廉、机动灵活等优势, 已成为现代军事侦察的重要工具^[1-2], 其中无人机成像侦察通过无人机平台携带成像传感器, 配合其它侦察资源完成给定目标的覆盖搜索和情报采集, 从而获取战场情报^[3].

在实际战场环境中, 点目标和区域目标侦察需求极为广泛^[4-5]. 点目标侦察需求包括指挥所定位、高价值武器平台追踪以及对战略电站、桥梁等关键设施的损毁评估; 区域侦察需求包括毁伤效果评估、前沿战区环境扫描等. 目前, 已有部分学者研究无人机对点目标或区域目标的侦察^[6-8]. 如 Xia 等^[9]研究了无人机与车辆协同的区域目标侦察任务规划问题, 田双喜等^[10]研究了车与多无人机协同的多区域覆盖路径规划问题, Fan 等^[11]研究了交通监控背景下的多无人机协同点目标侦察任务规划问题. 然而, 现有研究大多数仅考虑点目标侦察或区域目标侦察等单一侦察任务类型, 较少研究点目标与区域目标联合的异构侦察任务规划问题.

面对点目标侦察、区域目标侦察等多样化侦察任务, 单无人机受到航程等个体性能约束, 难以满足现代化作战侦察需求^[12]. 相比之下, 多架无人机可通过成员间的协同突破单机性能局限, 拓展侦察范围并提高侦察效率^[13]. 利用多无人机系统同时完成点目标和区域目标的联合侦察可缩短侦察时间, 从而充分发挥无人机在成像侦察任务中的优势, 是提升战场侦察效能的重要手段. 在综合考虑无人机平台特性、任务属性等核心要素的基础上, 如何结合实际侦察任务需求, 为多无人机协同侦察系统生成高效合理的任务调度方案, 是当前多机协同任务规划的重要研究方向^[14].

国内外学者对多无人机协同任务规划问题进行了一系列研究^[15-16]. 如刘子宸等^[17]研究了异构无人机平台不规则区域协同侦察任务规划问题, 该研究将目标任务抽象为质点并提出了自适应粒子群-区域最优匹配算法来求解该问题, 在该研究中, 目标进入传感器感知范围则视为任务执行成功; Mao 等^[18]

研究了多无人机任务规划问题并将其建模为带航程约束的车辆路径问题, 设计了双层深度强化学习方法来求解该问题; Hong 等^[19-20]研究了物流配送背景下的多无人机协同任务规划问题, 分别提出了两阶段优化算法和多目标优化算法进行求解; 王辰等^[21]研究了一种有限通信资源的多无人机协同航迹规划问题并提出了一种基于深度强化学习的协同规划方法进行求解. 虽然当前多无人机协同任务规划问题的研究已取得显著进展, 但是, 将其应用于多无人机协同侦察任务规划仍然存在多个需要解决的问题. 具体而言, 现有多无人机任务规划研究大多将任务目标抽象为质点, 忽略了实际侦察场景中区域侦察任务在空间特征上的差异^[22-23]. 同时, 现有多无人机成像侦察任务规划的数学模型仅考虑了任务属性和无人机平台自身属性, 忽略了机载成像传感器特性以及成像任务质量要求带来的约束^[24]. 此外, 以往研究较少考虑任务时间窗的影响. 但是, 在实际战场中, 不在规定时间内完成侦察很可能会导致信息失效或任务失败^[25].

鉴于此, 本文研究多无人机协同的点与区域目标联合成像侦察任务规划问题 (MUSPPAIR), 其中将线目标与面目标合并为区域目标 (线目标可看作特殊的面目标). 在本问题场景中, 多架无人机同时从基地出发, 依次访问预先设定的点目标和区域目标, 完成所有侦察任务后返回基地. 考虑到战场情报的时效性, 每个侦察目标均需要在规定时间窗内进行访问. 由于无人机能力和数量通常难以满足大量任务需求, 构建以最大化任务完成数量和最小化侦察任务执行时间为优化目标的混合整数线性规划模型, 综合考虑无人机电池容量、任务成像质量要求以及机载成像传感器等复杂约束. 每个点目标只能由一架无人机覆盖, 而每个区域目标可进行分解并由多架无人机联合覆盖, 从而减少区域目标的侦察搜索时间并最大限度地满足时间窗约束. 最后, 设计一个领域知识驱动的多无人机协同侦察任务规划方法进行求解, 旨在将点目标和区域目标侦察任务分配给系统内无人机, 并确定每架无人机任务执行顺序和资源分配情况, 使得最终解决方案的任务执行时间最短、任务总收益最大. 本文的主要内容如下:

1) 面向点、线、面侦察任务, 研究多无人机协同

的点与区域目标联合成像侦察任务规划问题,并建立考虑机载传感器约束与区域侦察目标分解的多无人机协同任务规划模型.

2) 提出一种领域知识驱动的多无人机协同侦察任务规划方法 (HMUR-KTPA). 该方法将问题分解为多机任务分配和单机任务规划两阶段进行求解. 在多机任务分配阶段,设计基于最优联盟的任务分配算法和4种规划因子为所有无人机分配任务;在单机任务规划阶段,设计联盟优先的单机任务调度算法和改进的变邻域下降搜索算法为每架无人机生成任务调度方案.多机任务分配与单机任务调度两个阶段交互迭代,最终产生高质量的多无人机协同点与区域联合成像侦察任务调度方案.

3) 大量仿真实验表明所提出算法框架可有效提高资源利用率和任务侦察成功率,同时,从点/区域侦察任务比例、无人机数量以及机载成像传感器能力3个方面开展敏感性分析实验.

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

在多无人机协同成像侦察任务规划问题中,需要为多架无人机进行任务规划,以完成多种待侦察目标的侦察.假设侦察任务集合 T 中包含一组点侦察任务 $P = \{1, 2, \dots, r\}$ 和一组区域侦察任务 $A = \{r + 1, r + 2, \dots, n\}$,一组性能不同的无人机 $K = \{1, 2, \dots, m\}$ 从基地出发执行侦察任务,在完成所有分配的任务后返回基地.为保证情报的时效性要求,每个侦察目标均必须在 (st_i, et_i) 时间段内完成覆盖.

如图1所示,每架无人机在航程范围内可覆盖多个异构侦察任务.每个点侦察任务只能由一架无人机侦察.由于单架无人机难以在规定时间内完成区域目标侦察,区域侦察目标可以拆分给多架无人机共同侦察.另外,由于不同侦察任务对于成像质量需求不同,多无人机协同成像侦察任务规划需要根

据不同侦察任务成像质量要求匹配不同成像能力的机载成像传感器,同时,令有限的无人机在尽可能短的时间内覆盖更多的侦察任务.这里将侦察一个区域任务的多架无人机定义为一个联盟,联盟中每架无人机的机载成像设备均必须满足区域任务成像质量要求.

1.2 多无人机协同成像侦察问题建模

多无人机协同成像侦察问题受无人机平台性能、任务时间窗、任务成像质量要求以及平台续航能力等约束.为找到高质量的侦察任务调度方案,本文构建以最大任务完成数量和最小化侦察任务执行时间为目标的混合整数规划模型.多无人机协同的点与区域目标联合成像侦察任务规划问题的数学模型如下,表1为该模型的符号及其描述.

表1 主要符号描述

| 符号 | 描述 |
|----------------------|---|
| K | 无人机集合, $K = \{1, 2, \dots, m\}$ |
| P | 点侦察任务集合任务, $P = \{1, 2, \dots, r\}$ |
| A | 区域侦察任务集合, $A = \{r + 1, r + 2, \dots, n\}$ |
| T | 任务集合, $T = P \cup A$ |
| $0, k, i$ | 基地、无人机、任务的索引 |
| $d_{i,j}$ | 任务 i 飞到任务 j 的距离(m) |
| (st_i, et_i) | 任务 i 的最早开始时间和最晚结束时间 |
| D_i^k | 无人机 k 执行区域目标任务 i 的侦察距离 |
| t_i^k | 无人机 k 侦察任务 i 的时间 |
| v_k, L_k, dy_k | 无人机 k 速度、最大航程(m)、视场宽度(m) |
| GSD_i^k | 无人机 k 在任务 i 时的成像能力(成像质量用地面采样距离GSD表示,即数字影像中单个像元对应的地面尺寸) |
| $(Px_k, Py_k), PE_k$ | 无人机 k 成像载荷的像素、像元(μ) |
| E_k, f_k | 无人机 k 成像载荷的续航时间、焦距(mm) |
| S_i, h_i | 任务 i 的面积(m^2)、无人机最小飞行高度(m) |
| dt_i, PR_i | 任务 i 的持续侦察时间、成像需求 |
| at_i^k | 无人机 k 到达任务 i 的时间 |
| $x_{i,j}^k$ | 无人机 k 从任务 i 飞到任务 j 时, $x_{i,j}^k = 1$; 否则, $x_{i,j}^k = 0$ |
| y_i^k | 任务 i 由无人机 k 完成时, $y_i = 1$; 否则, $y_i = 0$ |

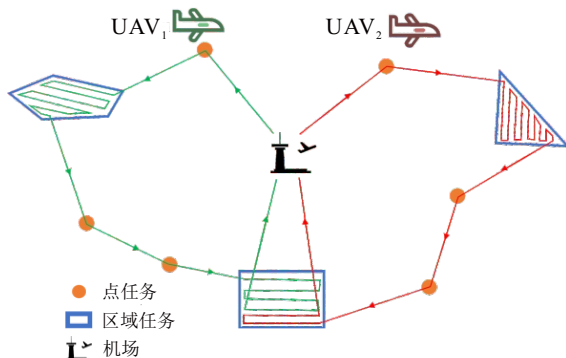


图1 多无人机协同成像侦察场景示意图

$$\min f = c_1 \cdot \max_{k \in K} \left\{ \sum_{i \in T \cup \{0\}} \sum_{j \in T \cup \{0\}, j \neq i} \frac{x_{i,j}^k \cdot d_{i,j}}{v_k} + \sum_{i \in T \cup \{0\}} y_i^k \cdot t_i^k \right\} + c_2 \cdot \sum_{i \in T \cup \{0\}} \sum_{k \in K} (1 - y_i^k); \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in T \cup \{0\}} x_{0,i}^k = \sum_{i \in T \cup \{0\}} x_{i,0}^k = 1, \quad \forall k \in K; \quad (2)$$

$$\sum_{j \in T} x_{i,j}^k = \sum_{j \in T} x_{j,i}^k \leq 1, \quad \forall k \in K, i \in T; \quad (3)$$

$$\sum_{j \in T \cup \{0\}} x_{i,j}^k = y_i^k, \forall k \in K, i \in T; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in T \cup \{0\}} x_{i,j}^k = y_j^k, \forall k \in K, j \in T; \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k \leq 1, \forall i \in P; \quad (6)$$

$$y_i^k (\text{GSD}_i^k - \text{PR}_i) \geq 0, \forall i \in T, k \in K; \quad (7)$$

$$\text{GSD}_i^k = \frac{\text{PE}_k \cdot h_i}{f_k \cdot 10^3}, \forall i \in T, k \in K; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in T \cup \{0\}} \sum_{j \in T \cup \{0\}, j \neq i} d_{i,j} \cdot x_{i,j}^k + \sum_{i \in A} D_i^k \cdot y_i^k \leq L_k, \quad \forall k \in K; \quad (9)$$

$$D_i^k = s_i \cdot \frac{v_k}{g}, \forall i \in A; \quad (10)$$

$$\sum_{k=1} v_{k1} \cdot dy_{k1}$$

$$\sum_{i \in T} t_i^k \cdot y_i^k \leq E_k, \forall k \in K; \quad (11)$$

$$\text{at}_i^k + \left(dt_i + \frac{d_{i,j}}{v_k} \right) - M(1 - x_{i,j}^k) \leq \text{at}_j^k, \quad \forall i, j \in T \cup \{0\}, k \in K; \quad (12)$$

$$\text{at}_i^k \geq \text{st}_i, \forall i \in T, k \in K; \quad (13)$$

$$\text{at}_i^k + t_i^k \leq \text{et}_i, \forall i \in T, k \in K; \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} t_i^k \cdot y_i^k \geq dt_i, \forall i \in A; \quad (15)$$

$$x_{i,j}^k = \{0, 1\}, \forall i, j \in T \cup \{0\}, k \in K; \quad (16)$$

$$y_i^k = \{0, 1\}, \forall i \in T \cup \{0\}, k \in K. \quad (17)$$

其中: 式(1)为该混合整数规划模型的目标函数, 旨在最小化侦察任务执行时间和任务侦察失败数量(c_1, c_2 均为 $0.5^{[9]}$), 这里侦察任务执行时间包括飞行时间和侦察时间, 由所有无人机中执行侦察任务时间最长的无人机决定; 式(2)表示所有无人机必须从基地起飞, 完成所有任务后回到基地; 式(3)为任务点流量平衡约束, 表示无人机到达侦察任务点后必须离开该侦察任务点且无人机最多访问任务一次; 式(4)和(5)表示无人机访问节点*i*最多有一个前置节点和一个后置节点; 式(6)表示点侦察任务最多由一架无人机侦察, 隐含的约束是区域侦察目标可由多架无人机侦察; 式(7)和(8)为成像质量约束, 无人机*k*在任务*i*上的成像能力不小于区域*i*的成像质量要求; 式(9)和(10)为无人机航程约束, 其中无人机航程包括无人机在侦察任务间的行驶时间和无人机在区域任务侦察时的覆盖距离; 式(11)为无人机成像载荷的续航能力约束; 式(12)为无人机从侦察任务*i*到侦察任务*j*的时间消耗; 式(13)~(15)为无

人机侦察时间窗约束; 式(16)和(17)规定了决策变量取值范围.

式(2)~(5)共同构成路径连通性约束, 其意义在于消除断点和跳跃, 确保输出序列无人机可连续飞行. 式(6)通过禁止重复访问同一点任务, 避免多机对同一目标进行重叠成像, 从而节省运力和空域窗口; 在战场环境下, 该机制还可减少无人机在危险空域的滞留时间. 式(7)和(8)成像质量约束则将分辨率需求显性化. 如当战场侦察时, 疑似导弹发射车的点目标需要高清晰度的成像, 而大规模车队这种大范围态势监视则对清晰度要求较低. 该组约束可保证高价值目标自动分配给搭载高性能载荷的无人机, 实现差异化成像. 由于无人机以及携带的成像载荷电池容量有限, 式(9)~(11)可以约束生成任务规划方案在无人机有限的电池容量内被执行, 防止因电量不足导致任务中途返航. 无人机侦察时间窗约束(13)~(15)适用于交通早高峰、战场时敏目标等典型场景, 为每个任务赋予硬时间窗. 算法必须在该窗口内完成成像, 否则目标价值急剧下降(拥堵已扩散或敌方完成转移). 该约束迫使规划方案在空间最短与时间可行间取得平衡, 显著降低了任务失效风险.

2 领域知识驱动的多无人机协同侦察任务规划方法

2.1 算法框架

多无人机协同任务规划问题是典型的 NP-Hard 问题^[26], 其解空间会随问题规模和无人机数量的增加而呈指数增长. 本文在多机协同任务规划问题的基础上考虑了点侦察任务和区域侦察任务这两种异构任务类型, 同时, 考虑了无人机成像质量和载荷续航能力等与问题相关的约束条件, 使得问题求解更复杂. 为在短时间内获得高质量的多无人机任务规划调度方案, 本文设计一种领域知识驱动的多无人机协同侦察任务规划方法(HMUR-KTPA)对问题进行求解. 从问题特征出发, HMUR-KTPA 将原问题分解为两个阶段: 第1阶段为多机任务分配, 即将任务资源与无人机资源匹配, 每架无人机被分配一个子任务集; 第2阶段为单机任务调度阶段, 即为每架无人机生成一个满足所有约束条件的任务执行方案. 由于问题分解可能会影响最终调度方案的全局最优性, 求解过程中多机任务分配与单机任务调度这两个阶段交替进行, 通过交互过程中的信息交互尽可能提升解的质量. HMUR-KTPA 的伪代码如算法1所示.

算法1 HMUR-KTPA.

输入: 无人机信息 U , 任务信息 M , 初始温度 T_0 , 终止温度 T_f , 最大迭代次数 l_{\max} , 衰减因子 σ ;

输出: 任务调度方案 S .

1. 初始化多机任务分配方案 $A \leftarrow \text{OCA}(U, M)$;
2. 初始化单机调度方案 $s_k \leftarrow \text{CFA}(a_k), a_k \in A$;
3. 合并所有单机调度方案 s_k , 获得初始任务调度方案 S ;
4. $S^b \leftarrow S, T \leftarrow T_0, l \leftarrow 1$;
5. while $T > T_f$ or $l < l_{\max}$
6. for $i \leftarrow 1 : s$
7. 根据4种多机任务分配因子生成新的多机任务分配方案 A' ;
8. 产生新的单机任务调度方案 $s'_k \leftarrow \text{IVND}(a'_k), a'_k \in A'$;
9. 合并所有单机调度方案 s'_k , 由式(2)~(5)解码获得新的任务调度方案 S' ;
10. 计算目标函数差值 $\Delta f \leftarrow f(S') - f(S)$;
11. if $\Delta f < 0$
12. $S \leftarrow S'$;
13. if $f(S') - f(S^b) < 0$
14. $S^b \leftarrow S'$;
15. end if
16. else if $\exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right) > \text{rand}(0, 1)$
17. $S \leftarrow S', l \leftarrow l + 1$;
18. else
19. $l \leftarrow l + 1$;
20. end if
21. end for
22. $T \leftarrow \sigma \cdot T$;
23. end while

在初始阶段, 考虑成像传感器特性以及区域覆盖侦察时间约束, 设计基于最优联盟的任务分配算法(OCA)生成初始的多机任务分配方案. 为获得每架无人机的任务执行路径, 设计联盟优先的单机任务调度算法(CFA), 根据多机任务分配方案产生无人机可执行的任务调度方案. 值得注意的是, CFA 优先为被分配区域侦察任务的无人机规划任务执行顺序, 只有满足所有约束条件的任务才能被成功调度. 当计算解方案的目标函数时, 违反约束的解会在成本中加入足够大的数作为惩罚成本. 因此, 在后续优化阶段, 未违反约束的解将会被优先选择.

在迭代优化阶段, 设计无人机任务转移、无人机任务交换、联盟无人机添加、联盟无人机删除等4种问题领域知识驱动的多机任务分配因子调整任务分

配方案. 同时, 在当前解的基础上, 根据全局最优条件设计一种改进的变邻域下降算法(IVND)引导单机任务调度方案向最优解方向调整, IVND 包含已调度任务交换、已调度任务倒置、未调度任务插入、未调度任务置换等4种单机任务调整算子. 为避免解陷入局部最优, 采用 Metropolis 准则^[27]以一定概率接受次优解. 多机任务分配与单机任务调度交替进行, 直至满足停止条件. 当 HMUR-KTPA 当前温度低于预设的最低温度或在连续一定迭代次数中找不到更优解时, 输出最终的多机任务调度方案.

2.2 多机任务分配方法**2.2.1 基于最优联盟的多机任务分配算法**

由于任务成像质量要求和无人机成像设备能力各异, 随机将任务分配给无人机可能会使得任务需求与无人机能力不匹配而产生大量不可行解或造成无人机能力浪费. 为加快算法搜索高质量解的能力, 本文从多无人机协同成像侦察问题特征出发, 提出一种基于最优联盟的多机任务分配算法(OCA)为任务需求匹配合适的无人机资源. OCA 的伪代码如算法2所示.

算法2 OCA.

输入: 无人机信息 U , 任务信息 M ;

输出: 最优联盟 C , 初始任务分配方案 A .

1. 初始化任务 i 的最优联盟 $C_i \leftarrow \emptyset$ 、未调度任务集合 $T \leftarrow \{1, 2, \dots, n\}$ 、无人机 k 任务分配方案 $A_k \leftarrow \emptyset$;
2. for $i \leftarrow 1 : n$
3. 由式(8)计算所有无人机对任务 i 的成像能力 $\text{GSD}_i \leftarrow \{\text{GSD}_i^1, \text{GSD}_i^2, \dots, \text{GSD}_i^K\}$;
4. 由式(18)计算任务 i 的成像能力溢出 $H_i \leftarrow \{H_i^1, H_i^2, \dots, H_i^K\}$;
5. 筛选满足任务 i 成像质量约束的无人机并计数 $N_i \leftarrow \text{count}(H_i \geq 0)$;
6. end for
7. while $T \neq \emptyset$
8. 找到可用无人机数量最少的任务 $i^* \leftarrow \arg \min_{i \in T} N_i$;
9. 对任务 i^* 的可用无人机排序 $\text{rank}_{i^*} \leftarrow \text{Score}(H_{i^*}, A_k)$;
10. while $\text{rank}_{i^*} \neq \emptyset$
11. 从 rank_{i^*} 选择排名最高的无人机 k 加入 C_{i^*} , 从 rank_{i^*} 移除无人机 k ;
12. 将任务 i^* 加入 A_k ;
13. 由式(19)计算联盟 C_{i^*} 侦察任务 i^* 的持续时间 rt_{i^*} ;
14. if $\text{rt}_{i^*} \leq \text{et}_{i^*} - \text{at}_{i^*}$
15. break

16. end if
17. end while
18. 更新联盟 $C \leftarrow C_i^*$;
19. 更新未调度任务 $T \leftarrow T - i^*$;
20. end while
21. 根据时间窗先后对所有 A_k 任务重新排序;
22. 合并所有 A_k 得到任务分配方案 A

为保证任务被分配的无人机成像能力均不低于任务的成像质量要求, 首先遍历每项任务并筛选满足任务成像质量约束的可用无人机集合. 为减少无人机资源浪费, 计算任务可用无人机的成像能力溢出, 任务 i 可用无人机 k 对应的成像能力溢出尺度 H_i^k 计算, 如下所示:

$$H_i^k = \text{GSD}_i^k - PR_i, \forall i \in T, k \in K. \quad (18)$$

为尽可能多地分配任务, OCA 优先为可用无人机较少的任务匹配无人机资源. 具体做法是根据无人机已分配任务数量和无人机成像能力溢出对可用无人机排序, 将持续侦察时间短的点侦察任务分配给排序最高的无人机; 对于持续侦察时间较长的区域侦察任务, 单架无人机可能无法在规定时间内独自侦察覆盖面积过大的目标区域. 为此, 将满足任务持续侦察时间约束与最小成像能力溢出的多架无人机组成最优联盟, 协同完成该区域的侦察覆盖.

为最小化联盟对区域任务的侦察时间, 规定联盟中每架无人机同时开始侦察并同时结束侦察. 假设区域侦察任务 i 的面积为 S_i , 由 g 架异构无人机联盟协同完成该区域的侦察覆盖. 根据无人机覆盖搜索能力将目标区域划分为多个子区域, 一架无人机负责一个子区域的覆盖搜索. 忽略转弯航迹的影响, 则联盟中第 k 架无人机覆盖其对应子区域的侦察持续时间 rt_i 计算方法如下所示:

$$rt_i = \frac{S_i}{\sum_{k=1}^g v_k dy_k}, \forall i \in A. \quad (19)$$

无人机 k 的视场宽度 dy_k 计算公式如下所示:

$$dy_k = \frac{Py_k \cdot PE_k \cdot h}{f_k \cdot 10^3}, \forall k \in K. \quad (20)$$

其中 h 为无人机飞行高度.

2.2.2 问题领域知识驱动的多机任务调整

在初始任务分配时, 可能有部分无人机分配任务数量过多. 同时, 由于区域任务分配仅基于最优联盟, 可能会导致联盟中部分性能次优的无人机区域覆盖时间较长. 以上两种情况均可能导致无人机难以在规定时间内访问其他任务, 影响任务侦察成

功率. 此外, 过度强调无人机能力溢出可能会限制高性能无人机的潜力, 使其无法充分发挥效能. 为此, 在任务重分配阶段从最优性条件出发, 设计无人机任务转移、无人机任务交换、联盟无人机添加、联盟无人机删除等 4 种任务重分配因子, 分别从任务和无人机资源两个角度调整多无人机间的任务分配方案.

如图 2 和图 3 所示, 无人机任务转移和无人机任务交换调整无人机负责的任务集合. 其中: 无人机任务转移添加因子随机转移一架无人机负责的一项任务给另一架无人机, 无人机任务交换因子随机交换两架无人机中的一项任务. 如图 4 和图 5 所示, 联盟无人机添加因子和联盟无人机删除因子可调整区域侦察任务的无人机联盟. 这里: 联盟无人机添加因子随机为一个联盟添加一架无人机, 联盟无人机删除因子随机删除某个联盟中的一架无人机, 实现重组侦察区域目标的无人机联盟.

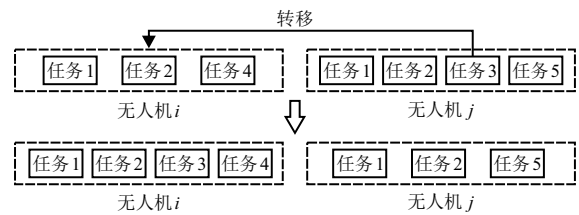


图2 无人机任务转移因子

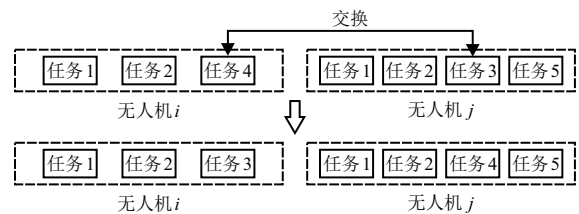


图3 无人机任务交换添加因子

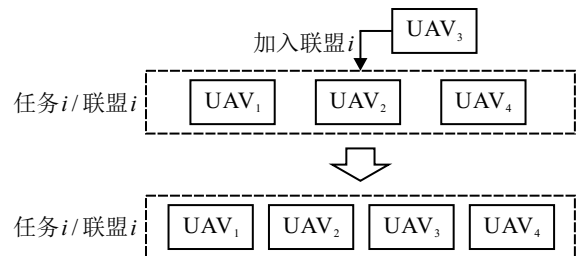


图4 联盟无人机添加因子

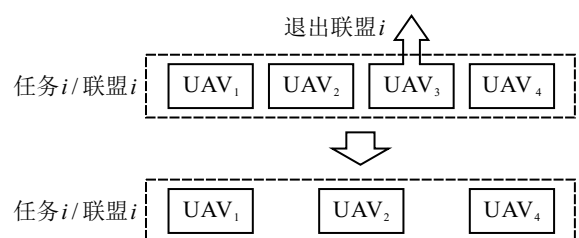


图5 联盟无人机删除因子

2.3 单机任务调度方法

2.3.1 联盟优先的单机任务调度算法

相较于传统的多无人机协同任务规划问题, 本文考虑了异构多无人机对区域目标的协同侦察, 即多架无人机组成一个联盟的同时访问单个区域侦察任务. 这意味着联盟内所有无人机均需要满足这一区域侦察任务的时间窗约束. 相较于其他目标, 这些被联盟访问的区域侦察任务的时间窗约束更复杂. 为了给无人机生成有序的任务执行路径并降低问题复杂度, 本文设计一种联盟优先分配算法(CFA)生成每架无人机的初始任务调度方案. CFA的思想是优先分配被多无人机联盟同时访问的区域侦察任务, 然后再分配由单架无人机访问的点侦察任务. 同时, CFA在生成任务调度方案时将检查新任务的插入是否满足所有约束条件以提升初始解的可行性, CFA伪代码如算法3所示.

算法3 CFA.

输入: 无人机 k 的任务分配方案 a_k ;
 输出: 无人机 k 的任务调度方案 s_k .

1. 初始化调度任务集 $z_k \leftarrow \emptyset$ 和未调度任务集 $u_k \leftarrow \emptyset$;
2. 计算任务被访问的无人机数量 $nu \leftarrow \text{Count}(a_k)$;
3. while $nu \neq \emptyset$
4. 从 nu 选出被无人机访问数量最多的任务 i ;
5. if 任务 i 满足所有约束
6. 将任务 i 加入 z_k ;
7. else
8. 将任务 i 加入 u_k ;
9. end if
10. 从 nu 中删除任务 i ;
11. end while
12. 合并 z_k 和 u_k 得到 s_k

2.3.2 改进的变邻域下降算法

在初始化任务调度方案后, 无人机的任务被分为已调度任务和未调度任务. 已调度任务是满足约束、被成功侦察的任务, 未调度任务是不满足约束、侦察失败的任务. 调整已调度任务的执行顺序可以优化无人机成功侦察的任务数量, 未调度任务插入和未调度任务置换均可在一定程度上释放无人机潜力. 因此, 针对两种类型任务, 分别设计改进的变邻域下降算法(IVND)优化改进单机任务调度方案, IVND包含已调度任务交换、已调度任务倒置、未调度任务插入、未调度任务置换等4种邻域结构. IVND的4个算子结构如下.

1) 已调度任务交换算子 N_1 : 随机交换单架无人机负责的两个不同的已调度任务. 具体操作方法如

图6所示: 在选定的无人机任务序列中, 随机选择两个已调度任务点 i, j , 将两个任务点 i, j 的位置互换.

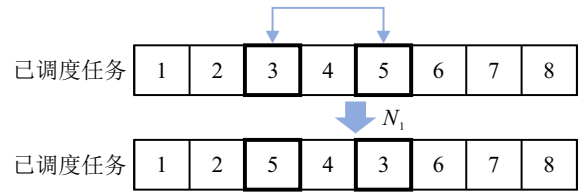


图6 已调度任务交换算子

2) 已调度任务倒置算子 N_2 : 将单架无人机负责的一段已调度任务序列的顺序随机打乱. 具体操作方法如图7所示: 在选定的无人机的已调度任务序列中, 随机选择一段随机长度的、连续的任务序列, 并将其顺序随机打乱.

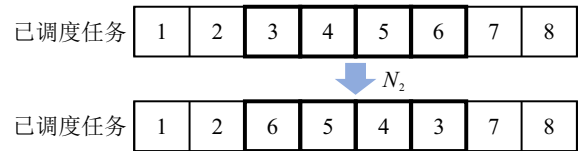


图7 已调度任务倒置算子

3) 未调度任务插入算子 N_3 : 将单架无人机的一个未调度任务随机插入该无人机已调度任务序列中. 具体操作方法如图8所示: 在无人机的未调度任务中, 随机选择一个未调度任务 i , 并将其随机插入该无人机已调度任务序列的任一位置 j .

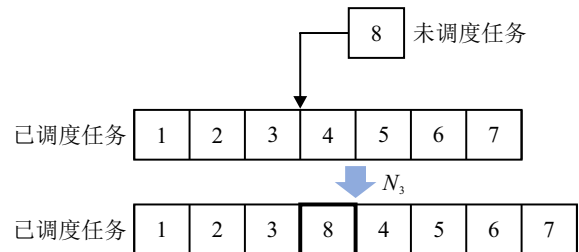


图8 未调度任务插入算子

4) 未调度任务互换算子 N_4 : 互换单架无人机的一个已调度任务与一个未调度任务. 具体操作方法如图9所示: 在无人机已调度任务序列中, 随机选择一个已调度任务 i , 并在该无人机未调度任务中, 随机选择一个未调度任务 j , 交换 i, j 的位置.

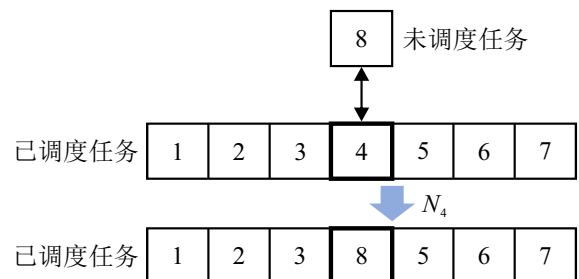


图9 未调度任务置换算子

3 仿真与分析

为验证 HMUR-KTPA 在多无人机协同成像侦察任务调度问题中的性能, 本节设置 HMUR-KTPA 与 6 种算法的对比实验以及灵敏度分析实验. 实验环境为 Window 10 系统, Core i5-10400F 2.90 GHz CPU, 8 GB 内存, Matlab R2021b 编程软件.

3.1 实验设置

目前的多无人机调度研究较少关注成像侦察, 且本文所研究的多无人机协同的点与区域目标联合成像侦察任务规划问题为一种新模式, 目前, 鲜有针对这一问题的标准测试集. 为测试算法性能, 本文生成 8 个具有不同点目标数量、不同区域目标数量、不同无人机数量的算例 ($C_1 \sim C_8$). 每个算例包括任务坐标、任务时间窗、任务最小飞行高度、任务成像质量要求、任务面积、无人机平均飞行速度、无人机最大航程、成像传感器像素、成像传感器像元大小、成像传感器焦距、成像传感器电量. 本文主要使用 3 种不同性能的无人机, 无人机及其机载成像传感器的相关参数如表 2 所示.

HMUR-KTPA 相关参数如下: 初始温度 $T_0 = 100$, 最低温度 $T_f = 0.1$, 衰减因子 $\sigma = 0.05$, 最大迭代次数 $l_{\max} = 100$.

3.2 算法性能分析

由于没有可以直接用于解决本文多无人机协同

表2 3种不同性能的无人机及其机载成像传感器相关参数

| 无人机 | 速度 | 航程 | 像素 | 像元 | 焦距 | 电量 |
|------------------|----|----|--------------|-----|----|----|
| UAV ₁ | 50 | 70 | (5472, 2648) | 2.3 | 24 | 80 |
| UAV ₂ | 50 | 60 | (5280, 3956) | 3.4 | 30 | 70 |
| UAV ₃ | 50 | 50 | (8192, 5460) | 4.4 | 35 | 60 |

成像侦察任务调度问题的优化算法, 本文修改 ADPSO 算法^[28]、VNS 算法^[29]与 ALNS 算法^[9]作为比较算法. 为实现算法在无人机联盟中添加或删除无人机, 本文将未调度任务插入、未调度任务置换加入所有对比算法中, 使得改进后的 ADPSO 算法、VNS 算法和 ALNS 算法可以实现对无人机联盟的重组. 同时, 引入基于遗传算法和梯度下降法的多无人机节能路径规划算法 (HGA/GD)^[30]作为比较算法来验证所提出算法与其他多无人机协同规划算法的优越性. 此外, 为验证所提出算法各模块对于算法性能的影响, 本文还将移除 OCA 的 HMUR-KTPA (no-OCA) 与移除 CFA 的 HMUR-KTPA (no-CFA) 作为比较算法. 所有算法均运行 20 次, 所有性能指标均取这 20 次实验结果的平均值. 仿真实验结果如表 3 ~ 表 5 以及图 10 ~ 图 13 所示.

由图 10 和表 3 结果可见, 所设计 HMUR-KTPA 在 8 个算例的求解中, 获得的目标函数值与其他 3 个对比算法相比具有绝对的优势. 在每个算例中, HMUR-KTPA 均取得了最优的目标函数均值. 表 4

表3 所有算法在每个算例中的目标函数结果

| 算例 | 点/区域侦察任务数量 | 无人机数量 | 目标函数值 | | | | | | |
|-------|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| | | | ADPSO | VNS | ALNS | HGA/GD | no_CFA | no_OCA | HMUR-KTPA |
| C_1 | 7/3 | 3 | 4.11 | 3.22 | 5.07 | 3.54 | 3.27 | 3.19 | 3.19 |
| C_2 | 5/5 | 3 | 5.12 | 4.95 | 6.36 | 4.95 | 4.50 | 4.36 | 4.3 |
| C_3 | 14/6 | 4 | 11.35 | 12.63 | 14.49 | 12.86 | 11.42 | 12.02 | 11.13 |
| C_4 | 10/10 | 4 | 18.21 | 16.54 | 19.05 | 14.75 | 13.35 | 13.06 | 12.33 |
| C_5 | 21/9 | 6 | 30.49 | 30.87 | 30.5 | 29.74 | 28.40 | 29.33 | 28.06 |
| C_6 | 15/15 | 6 | 32.92 | 29.19 | 30.61 | 33.33 | 28.04 | 27.78 | 27.12 |
| C_7 | 28/12 | 8 | 129.53 | 135.01 | 139.84 | 132.28 | 132.03 | 131.54 | 124.12 |
| C_8 | 20/20 | 8 | 148.24 | 138.85 | 147.88 | 148.48 | 137.59 | 141.03 | 135.91 |

表4 所有算法在所有算例中的调度任务数量

| 算例 | 点任务/区域侦察任务数量 | 无人机数量 | 调度任务数 | | | | | | |
|-------|--------------|-------|-----------|----------|------|----------|--------|--------|-----------|
| | | | ADPSO | VNS | ALNS | HGA/GD | no_CFA | no_OCA | HMUR-KTPA |
| C_1 | 7/3 | 3 | 6 | 8 | 6 | 8 | 4 | 5 | 8 |
| C_2 | 5/5 | 3 | 6 | 6 | 5 | 3 | 4 | 4 | 7 |
| C_3 | 14/6 | 4 | 12 | 9 | 8 | 9 | 11 | 12 | 14 |
| C_4 | 10/10 | 4 | 11 | 9 | 9 | 11 | 10 | 10 | 13 |
| C_5 | 21/9 | 6 | 18 | 20 | 18 | 18 | 19 | 18 | 21 |
| C_6 | 15/15 | 6 | 20 | 18 | 21 | 19 | 17 | 18 | 21 |
| C_7 | 28/12 | 8 | 30 | 25 | 28 | 27 | 26 | 28 | 30 |
| C_8 | 20/20 | 8 | 32 | 30 | 29 | 26 | 28 | 30 | 33 |

表5 所有算法在所有算例中的路径长度

| 算例 | 点任务/区域侦察 任务数量 | 无人机数量 | 路径长度 | | | | | | |
|-------|------------------|-------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|---------------|
| | | | ADPSO | VNS | ALNS | HGA/GD | no_CFA | no_OCA | HMUR-KTPA |
| C_1 | 7/3 | 3 | 125.71 | 122.66 | 117.34 | 119.44 | 121.42 | 122.36 | 119.03 |
| C_2 | 5/5 | 3 | 133.65 | 131.87 | 136.03 | 131.70 | 133.29 | 134.20 | 130.59 |
| C_3 | 14/6 | 4 | 204.85 | 184.89 | 268.61 | 184.24 | 180.39 | 179.77 | 174.87 |
| C_4 | 10/10 | 4 | 219.61 | 184.89 | 268.61 | 188.06 | 186.29 | 184.78 | 177.87 |
| C_5 | 21/9 | 6 | 208.93 | 207.55 | 210.18 | 206.62 | 203.28 | 208.42 | 201.35 |
| C_6 | 15/15 | 6 | 205.42 | 203.89 | 212.27 | 216.11 | 218.13 | 207.38 | 202.52 |
| C_7 | 28/12 | 8 | 217.67 | 220.01 | 219.68 | 201.14 | 196.62 | 194.90 | 192.24 |
| C_8 | 20/20 | 8 | 232.28 | 219.7 | 229.76 | 212.50 | 228.59 | 226.50 | 211.83 |

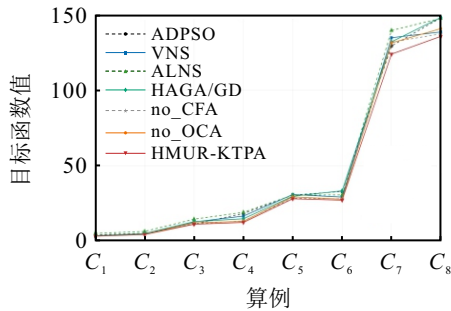


图10 所有算法在每个算例中的目标函数值

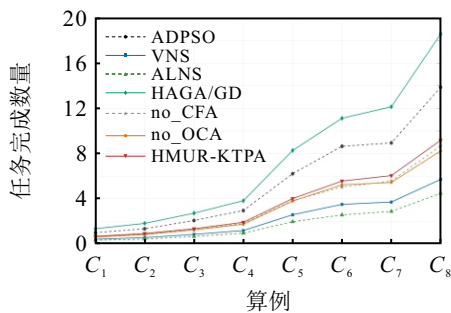


图11 所有算法在每个算例中的运行时间

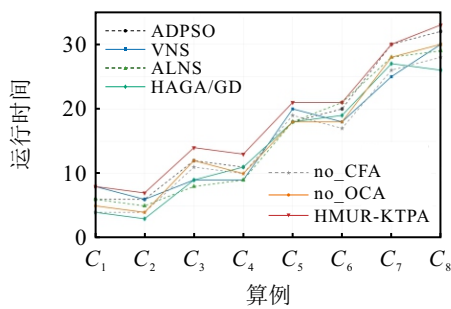


图12 所有算法在每个算例中的任务完成数量

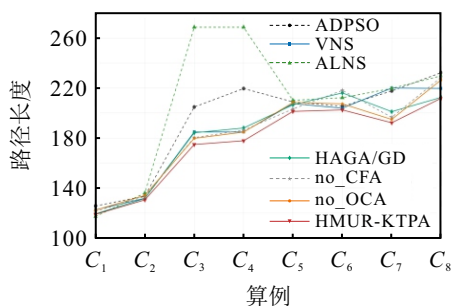


图13 所有算法在每个算例中的路径长度

和图12为所有算法在8个算例中成功侦察的任务数量,只有满足所有任务约束、无人机性能约束以及成像传感器约束的调度任务才可被视为成功执行;否则,视为任务侦察失败.由图12可见,随着任务数量的增加,任务侦察成功率明显降低.表明随着任务规模的增大,有限的无人机难以满足所有侦察需求.值得注意的是, HMUR-KTPA在表4所有算例中成功调度的任务数量是最多的,表明 HMUR-KTPA具有更加优秀的约束处理能力,可以在有限资源中通过优秀的资源调度能力满足更多的侦察任务需求.

由图11可见,随着任务数量的增多,所有算法的运行时间明显增加.同时,可以观察到:运行时间最短的为ALNS和VNS;然后是no-OCA、no-CFA和HMUR-KTPA,三者的运行时间较为接近;最长的为ADPSO和HGA/GD,其中HMUR-KTPA的运行时间整体在10s以内.结合表3数据可以表明, HMUR-KTPA可在较短时间获得高质量的解决方案.

由表5和图13可以发现,当总任务数量一定时,随着区域任务数量的增加,路径长度也会随之增大.这是因为区域任务占比的增大,需要无人机组成联盟协同覆盖区域侦察任务,从而导致路径长度增大.除 C_1 算例, HMUR-KTPA在其他算例中的平均路径长度最短.结合表4的结果可以发现, HMUR-KTPA产生的调度方案可在实现更短路径长度的同时,成功调度更多的侦察任务,验证了 HMUR-KTPA的优越性能.

表6展示了负责每个任务的无人机联盟,表7为 HMUR-KTPA在算例 C_8 求解的无人机调度方案.其中:点侦察任务的序号用数字表示(包括任务1~任务5、任务11~任务15、任务21~任务25、任务31~任务35),区域侦察任务的序号用#号加数字表示(包括任务#6~任务#10、任务#16~任务#20、任务#26~任务#30、任务#36~任务#40).由表6可以发现,部分区域任务只需要一架无人机即可完

成区域成像覆盖侦察, 而大部分区域目标难以由单架无人机独立侦察, 需要多架无人机组成联盟进行协同侦察. 表明了所提出多无人机协同区域侦察模式的有效性.

表6 HMUR-KTPA 在算例 C_8 求解的无人机联盟

| 任务编号 | 联盟 | 任务编号 | 联盟 | 任务编号 | 联盟 | 任务编号 | 联盟 |
|------|----|------|----|------|------|------|----|
| 1 | ③ | 11 | ⑧ | 21 | ④ | 31 | ③ |
| 2 | ⑤ | 12 | ② | 22 | ② | 32 | ③ |
| 3 | ② | 13 | ① | 23 | ④ | 33 | ④ |
| 4 | ⑤ | 14 | ③ | 24 | ① | 34 | ⑦ |
| 5 | ④ | 15 | ④ | 25 | ⑦ | 35 | ⑦ |
| #6 | ⑥ | #16 | ⑧ | #26 | ②④ | #36 | ⑥ |
| #7 | ③ | #17 | ⑤⑧ | #27 | ②⑤⑦⑧ | #37 | ② |
| #8 | ⑧ | #18 | ③ | #28 | ①⑤ | #38 | ⑧ |
| #9 | ③ | #19 | ⑥ | #29 | ①②⑤⑧ | #39 | ① |
| #10 | ⑥⑦ | #20 | ①⑥ | #30 | ⑧ | #40 | ①④ |

表7 HMUR-KTPA 在算例 C_8 求解的无人机调度方案

| 无人机编号 | 调度方案 |
|-------|---|
| ① | 13 → 24 → #39 → #40 → #29 → #28 → #20 |
| ② | #27 → 22 → #37 → 12 → 3 → #29 → #26 |
| ③ | 1 → 14 → #7 → #9 → 32 → 31 → #18 |
| ④ | 33 → 23 → #40 → 26 → 15 → 5 → 21 |
| ⑤ | 2 → #27 → 4 → #29 → #28 → #17 |
| ⑥ | #36 → #6 → #10 → #19 → #20 |
| ⑦ | 25 → #10 → 34 → 35 → #27 |
| ⑧ | #27 → #38 → #16 → #17 → #29 → #30 → 11 → #8 |

3.3 敏感度分析

为分析关键因素对 HMUR-KTPA 解决多无人机协同点与区域目标联合成像侦察任务规划问题的影响, 本节将分析点目标与区域目标比例、无人机数量和无人机成像能力 3 个因素的影响, 实验算例的总任务数量为 40 个.

1) 区域目标与点目标比例.

本文考虑了点与区域目标这两种异构任务的联合成像侦察. 其中: 点目标只需要一架满足成像要求的无人机侦察, 区域目标需要一架或多架满足成像要求的无人机组成的联盟协同侦察, 显然两类目标的侦察难度存在差异. 为了分析两类目标对多无人机协同成像侦察问题的影响, 设置实验算例 $C_9 \sim C_{13}$, 区域目标与点目标的比例分别为 1:9、2:8、3:7、4:6、5:5, 无人机数量为 8 架.

实验结果如图 14 所示. 在多无人机协同点与区域目标联合成像侦察任务规划问题中, 路径长度为所有无人机中飞行距离最远的无人机路径长度, 包括任务点之间的飞行航迹长度和区域覆盖的航迹长

度. 由图 14 可以发现, 随着区域目标占比增大, 路径长度也逐渐增大. 相较于点目标, 无人机完成区域目标的侦察任务还要对区域目标进行区域覆盖, 从而产生更多的路径成本. 此外, 随着区域目标占比增大, 任务完成率越来越低, 目标函数值也越来越大. 表明相比于单架无人机侦察点目标, 无人机联盟协同侦察区域目标需要满足联盟内所有无人机的约束, 显然, 侦察区域目标需要满足的约束更多、更复杂, 使得区域目标任务可成功执行的概率更小, 从而导致任务完成率的降低以及目标函数值的上升. 上述结果表明, 无人机数量的增加有利于缩短协同侦察任务的执行时间和提高任务完成率.

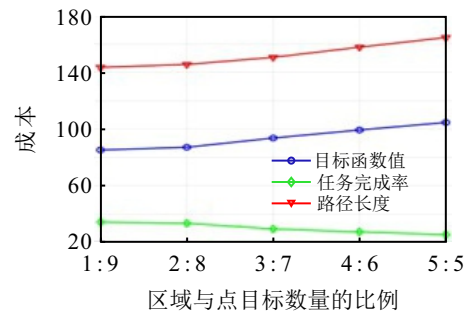


图14 不同点/区域侦察任务比例的求解结果

2) 无人机的数量.

当任务数量固定时, 无人机数量可能会影响多无人机协同成像侦察问题的结果. 因此, 设置实验算例 $C_{14} \sim C_{19}$, 对无人机数量进行敏感性分析. 无人机的数量分别为 3、4、5、6、7、8, 区域目标与点目标的比例为 3:7.

实验结果如图 15 所示, 由于路径长度表示为所有无人机中飞行距离最远的无人机的路径长度, 随着无人机数量的增加, 路径长度明显缩短. 随着无人机数量的增加, 可执行各点目标的无人机增多, 可执行各区域目标的无人机联盟也增多, 因此, 任务可以被执行的概率也随之增大, 即任务完成率增大. 此外, 目标函数值被表示为路径长度与任务未完成率的加权和, 随着无人机数量的增加, 路径长度逐渐缩短, 任务完成率逐渐上升, 因此, 目标函数值随之降低.

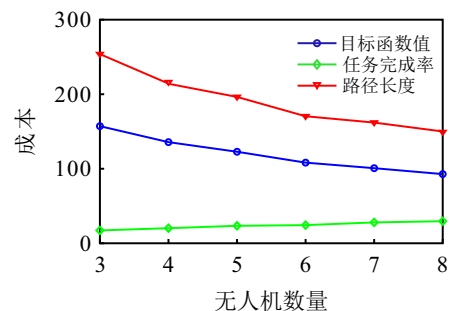


图15 不同无人机数量的求解结果

3) 成像传感器的能力.

在多无人机协同点与区域目标联合成像侦察任务规划问题中, 成像传感器的参数对问题的影响主要体现在两个方面: ① 由式 (7) 和 (8), 无人机能否侦察目标任务取决于其机载成像传感器能力是否满足任务成像需求, 像元PE越大、焦距 f 越小, 无人机的成像能力越强; ② 由式 (19) 和 (20), 无人机对区域目标的覆盖侦察时间由像素分量 P_y 、像元PE、焦距 f 以及无人机速度 v 共同决定, 像素分量 P_y 、像元PE和无人机速度 v 越大, 焦距 f 越小, 覆盖侦察时间越短, 覆盖侦察时间缩短意味着无人机满足任务时间窗约束的概率更高. 综上所述, 可用 $\varepsilon = \frac{P_y \cdot PE \cdot v}{1000 \cdot f}$ 衡量成像传感器的能力, ε 越大, 成像传感器能力越强. 基于上述分析, 设置实验算例 $C_{20} \sim C_{22}$, 各算例均由 8 架具有相同成像能力的无人机侦察 40 个目标, 各算例的成像传感器的参数如表 8 所示.

表8 $C_{20} \sim C_{22}$ 的无人机及其机载成像传感器相关参数

| 算例 | 无人机 | 速度 v | 像分量 P_y | 像元PE | 焦距 f | ε |
|----------|------------------|--------|-----------|------|--------|---------------|
| C_{20} | UAV ₁ | 50 | 2648 | 2.3 | 24 | 12.69 |
| C_{21} | UAV ₂ | 50 | 3956 | 3.4 | 30 | 22.42 |
| C_{22} | UAV ₃ | 50 | 5460 | 4.4 | 35 | 34.32 |

实验结果如图 16 所示, 随着成像传感器能力的增强, 无人机更加容易满足成像质量约束和时间窗约束, 从而提升任务完成率. 由图 16 可以发现, 路径长度的变化趋势为先上升再下降. 其原因可能是当机载成像传感器能力较小时, 无人机能够完成的任务较少, 因此, 花费的路径成本较低; 随着成像传感器能力的增强, 无人机能够执行更多的任务; 当成像传感器能力足够大时, 更多的无人机不再需要考虑成像质量约束和时间窗约束, 从而缩短飞行路径长度.

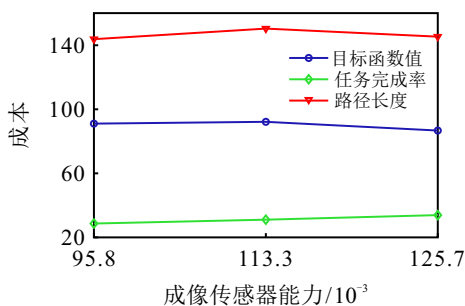


图16 不同成像传感器的求解结果

4 结论

针对多无人机协同的点与区域目标联合成像侦察任务规划问题, 本文提出了一种领域知识驱动的

多无人机协同侦察任务规划方法求解. 主要结论如下:

1) 建立了考虑机载成像设备能力、侦察任务成像质量要求以及时间窗等多重约束的混合整数规划模型, 其中区域侦察任务可由多架性能各异的无人机联盟协同侦察. 值得注意的是, 这个研究可以推广至灾害评估、应急救援等领域^[31-32].

2) 提出了一种领域知识驱动的多无人机协同侦察任务规划方法. 该方法将问题分解为多机任务分配和单机任务规划两阶段求解. 在初始阶段, 设计了基于最优联盟的任务分配算法和联盟优先的单机任务调度算法产生高质量的初始解; 在迭代优化阶段设计了 4 种问题领域知识驱动的多机任务调整因子与包含 4 种特殊邻域结构的变邻域下降算法往最优解方向搜索多无人机协同点与区域联合成像侦察任务调度方案.

3) 对比实验结果表明, 所提出 HMUR-KTPA 在 8 个算例中获得的解方案质量明显优于其他 3 种对比算法. 同时, HMUR-KTPA 在所有算例中成功调度的任务数量最多, 充分表明了所提出算法可在有限资源中通过优秀的资源调度能力满足更多的侦察任务需求. 此外, 一系列敏感性分析表明在同等任务数量下, 区域侦察任务由于需要满足的约束更多、更复杂而导致其可成功执行的概率更小; 而无人机数量增加或无人机机载成像传感器能力增强, 均可以提高任务成功执行数量.

本文在数学建模阶段将两种优化目标通过线性加权整合为单目标问题进行求解. 下一步将引入更为高效的多目标优化算法, 以一次性生成帕累托最优解集, 为决策者提供多样化、可权衡的备选方案.

参考文献 (References)

- [1] 肖鹏, 田润澜, 李赫, 等. 基于改进蚁群算法的无人机通信侦察航迹规划[J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3239-3252.
(Xiao P, Tian R L, Li H, et al. Unmanned aerial vehicle communication reconnaissance track planning based on improved ant colony algorithm[J]. Control and Decision, 2025, 40(11): 3239-3252.)
- [2] 郑锴, 李明明, 郑猷民, 等. 面向影像拼接的多无人机覆盖搜索规划方法[J]. 火力与指挥控制, 2025, 50(2): 70-77.
(Zheng K, Li M M, Zhen X M, et al. Multi-UAV area coverage plan method for image stitching[J]. Fire Control & Command Control, 2025, 50(2): 70-77.)
- [3] 王子玉, 张世勇, 董千里, 等. 面向目标实时稳定跟踪的无人机主动观测轨迹规划[J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3220-3228.

- (Wang Z Y, Zhang S Y, Dong Q L, et al. Active observation trajectory planning for real-time and stable target tracking with UAVs[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(11): 3220-3228.)
- [4] 夏阳升, 石建迈, 陈超, 等. 车机协同多区域覆盖侦察路径规划方法[J]. *指挥与控制学报*, 2020, 6(4): 372-380.
(Xia Y S, Shi J M, Chen C, et al. Path planning method for multi-area reconnaissance by cooperated ground vehicle and drone[J]. *Journal of Command and Control*, 2020, 6(4): 372-380.)
- [5] Zhou X Y, Jia W, He R F, et al. High-precision localization tracking and motion state estimation of ground-based moving target utilizing unmanned aerial vehicle high-altitude reconnaissance[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(5): 735.
- [6] Xie C, Wu B B, Guo D X, et al. Autonomous navigation UAVs for enhancing information freshness for reconnaissance[J]. *Electronics*, 2024, 13(7): 1354.
- [7] Sun W C, Luo Z H, Hu X C, et al. An improved variable neighborhood search algorithm embedded temporal and spatial synchronization for vehicle and drone cooperative routing problem with pre-reconnaissance[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2024, 91: 101699.
- [8] Hu S Y, Ni W, Wang X, et al. Disguised tailing and video surveillance with solar-powered fixed-wing unmanned aerial vehicle[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(5): 5507-5518.
- [9] Xia Y S, Chen C, Liu Y, et al. Two-layer path planning for multi-area coverage by a cooperative ground vehicle and drone system[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 217: 119604.
- [10] 田双喜, 陈洪辉, 徐彬杰, 等. 车辆支持的多无人机多区域覆盖路径规划算法[J]. *国防科技大学学报*, 2024, 46(6): 227-234.
(Tian S X, Chen H H, Xu B J, et al. Coverage path planning algorithm for multi-area by truck-supported multi-UAV[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, 46(6): 227-234.)
- [11] Fan M F, Liu H, Wu G H, et al. Multi-UAV reconnaissance mission planning via deep reinforcement learning with simulated annealing[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2025, 93: 101858.
- [12] Zhang J, Xing J H. Cooperative task assignment of multi-UAV system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(11): 2825-2827.
- [13] Cuong N V, Hong Y-W P, Sheu J P. UAV trajectory optimization for joint relay communication and image surveillance[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(12): 10177-10192.
- [14] 赵得霖, 寿莹鑫, 陈蓓, 等. 面向多目标侦察的多无人机分层任务规划方法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(11): 3229-3238.
(Zhao D L, Shou Y X, Chen B, et al. Multi-UAVs hierarchical mission planning method for multi-target reconnaissance[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(11): 3229-3238.)
- [15] Chen T Y, Miao Z H, Li W M, et al. A learning-based memetic algorithm for a cooperative task allocation problem of multiple unmanned aerial vehicles in smart agriculture[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2024, 91: 101694.
- [16] 王国岩, 赵旭华, 解宇轩, 等. 基于态势感知的无人机空战协同决策方法[J]. *控制与决策*, 2025, 40(6): 1847-1854.
(Wang G Y, Zhao X H, Xie Y X, et al. A collaborative decision-making method for unmanned aerial vehicles in aerial combat based on situational awareness[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(6): 1847-1854.)
- [17] 刘子宸, 曲俊海, 马跃东. 异构无人平台不规则区域协同侦察部署方法[J]. *火力与指挥控制*, 2022, 47(5): 103-110.
(Liu Z C, Qu J H, Ma Y D. Cooperative reconnaissance deployment method of heterogeneous unmanned platform in irregular area[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(5): 103-110.)
- [18] Mao X, Wu G H, Fan M F, et al. DL-DRL: A double-level deep reinforcement learning approach for large-scale task scheduling of multi-UAV[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 22: 1028-1044.
- [19] Hong F Y, Wu G H, Luo Q Z, et al. Logistics in the sky: A two-phase optimization approach for the drone package pickup and delivery system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(9): 9175-9190.
- [20] Hong F Y, Wu G H, Wang Y L, et al. Multi-objective multi-drone collaborative routing problem with heterogeneous delivery and pickup service[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, 26(5): 6084-6100.
- [21] 王辰, 魏才盛, 殷泽阳, 等. 考虑信道资源约束的多无人机航迹与通信策略协同规划[J]. *航空学报*, 2025, 46(24): 331837.
(Wang C, Wei C S, Yin Z Y, et al. Collaborative planning of multi-UAV trajectories and communication strategies considering channel resource constraints[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(24): 331837.)
- [22] Li X Q, Lu X P, Chen W H, et al. Research on UAVs reconnaissance task allocation method based on communication preservation[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2024, 70(1): 684-695.
- [23] Xiong H, Yao C Y, Liu J Z, et al. Improved multi-objective gray wolf optimization for task allocation in multi-UAV heterogeneous targets reconnaissance[J]. *Cluster Computing*, 2025, 28(6): 397.
- [24] Fang Z X, Savkin A V. Strategies for optimized UAV surveillance in various tasks and scenarios: A review[J]. *Drones*, 2024, 8(5): 193.
- [25] Atencia C R, Del S J, Camacho D. Weighted strategies

- to guide a multi-objective evolutionary algorithm for multi-UAV mission planning[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 44: 480-495.
- [26] Dorling K, Heinrichs J, Messier G G, et al. Vehicle routing problems for drone delivery[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(1): 70-85.
- [27] Kirkpatrick S, Gelatt C D J, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680.
- [28] Nabi S, Ahmad M, Ibrahim M, et al. AdPSO: Adaptive PSO-based task scheduling approach for cloud computing[J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 920.
- [29] Masmoudi M, Borchani R, Jarboui B. Generalized variable neighborhood search algorithm for vehicle routing problem with time windows and synchronization[J]. *Computers & Operations Research*, 2025, 183: 107193.
- [30] Mustafa Y A, Ali E S, Osman T E, et al. Multi-drones energy efficient based path planning optimization using genetic algorithm and gradient decent approach[C]. *Proceedings of the 9th International Conference on Mechatronics Engineering*. Kuala Lumpur, 2024: 171-176.
- [31] Wang J Q, Xie W J, Ryzhov I O, et al. D-optimal orienteering for post-earthquake reconnaissance planning[J]. *Operations Research*, DOI: [10.1287/opre.2023.0470](https://doi.org/10.1287/opre.2023.0470).
- [32] Zhou C Y, Liu J Y, Qu K G, et al. Delay-aware UAV computation offloading and communication assistance for post-disaster rescue[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(12): 19110-19125.

作者简介

洪芳宇 (1995-), 女, 博士生, 主要研究方向为智能优化与决策方法、调度理论及应用, E-mail: fangyuhong@csu.edu.cn;

张涛 (1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为空中作战规划与指挥控制、无人机任务规划, E-mail: zt324101@126.com;

杨昊 (1998-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为无人机任务规划, E-mail: yanghao1998@csu.edu.cn;

伍国华 (1986-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为计算智能、智能优化与决策、深度强化学习、调度理论及应用, E-mail: guohuawu@csu.edu.cn.