

# 车辆支持的多无人机多区域覆盖路径规划算法

田双喜<sup>1,2</sup>, 陈洪辉<sup>2</sup>, 徐彬杰<sup>3\*</sup>, 伍国华<sup>3</sup>

(1. 湖南财政经济学院 工商管理学院, 湖南 长沙 410205; 2. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073;

3. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**针对无人机在区域侦察中的应用研究,提出车辆支持的多无人机覆盖侦察的车机协同模式与协同路径规划算法。以最小化任务完成时间为目标,考虑车辆路径所受的道路约束以及无人机的能量约束,建立混合整数规划模型,并设计基于迭代松弛思想的启发式算法。在构建的60 km<sup>2</sup>的测试场景中随机设置16个目标区域,算法实现了车辆与无人机的覆盖路径规划,全部侦察任务完成用时为1.593 h,验证了车辆支持多无人机模式的可行性以及算法的有效性。

**关键词:**无人机;区域侦察;车机协同;覆盖路径规划

中图分类号:V279 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)06-227-08



论文  
拓展

## Coverage path planning algorithm for multi-area by truck-supported multi-UAV

TIAN Shuangxi<sup>1,2</sup>, CHEN Honghui<sup>2</sup>, XU Binjie<sup>3\*</sup>, WU Guohua<sup>3</sup>

(1. School of Business, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China;

2. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** To study the application of UAVs (unmanned aerial vehicles) in area reconnaissance, a cooperation mode of truck-supported multi-UAV coverage reconnaissance and a collaborative path planning algorithm were proposed. With the goal of minimizing the task completion time, a mixed integer programming model was established considering the road constraints on the vehicle path and the energy constraints of the UAVs. A heuristic algorithm based on the idea of iterative relaxation was designed. In the test scene of 60 km<sup>2</sup>, 16 target areas were randomly set. The proposed algorithm realizes the coverage path planning of the truck and the UAVs, and the total reconnaissance task time is 1.593 h, which verifies the feasibility of the vehicle supporting the multi-UAV mode and the effectiveness of the algorithm.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; area reconnaissance; truck-UAV cooperation; coverage path planning

无人机区域侦察是一种快速感知目标区域信息的典型方式,目前广泛应用于地理测绘<sup>[1-3]</sup>、灾害调查<sup>[4-5]</sup>、目标搜索<sup>[6]</sup>以及战场侦察<sup>[7-8]</sup>等领域。在实际应用中,只有快速感知并完整获取目标区域信息,才能为指挥人员提供可靠的信息支撑<sup>[9]</sup>。但受限于无人机较差的续航能力,面对多区域的侦察需求还需依靠地面车辆提供支持,提高空地资源的协同性,实现对目标区域的高效侦察。

近年来,利用无人机实现区域覆盖侦察得到了广泛研究。李登峰和马跃龙等在研究利用无人机获取特定地区的影像数据时,考虑无人机视场较小,提出了无人机序列影响快速拼接算法<sup>[10]</sup>。Xiao等将地图划分为一组均匀的正方形网格单元,从而将区域覆盖问题转化为旅行商问题(traveling salesman problem, TSP),并利用模拟退火算法求解<sup>[11]</sup>;Di等<sup>[12]</sup>考虑了无人机起飞和降落位置对任务用时的影响,基于割草机的路径特

收稿日期:2022-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62073341)

第一作者:田双喜(1981—),男,湖南株洲人,副教授,博士,E-mail:tsx\_0726@nudt.edu.cn

\*通信作者:徐彬杰(1998—),男,河南信阳人,博士研究生,E-mail:binjie\_xu@csu.edu.cn

引用格式: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.

Citation:TIAN S X, CHEN H H, XU B J. 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.

点提出了一种往复式的无人机覆盖模式;Öst<sup>[13]</sup>认为无人机的覆盖效率与转弯次数和转角大小有关,提出一种螺旋式的无人机覆盖模式;Cabreira等<sup>[14]</sup>建立了无人机的速度-能耗模型,对比了往复式与螺旋式在不同形状区域的特点与优势,并实地测试了模型的准确性;Xie等<sup>[15]</sup>提出动态规划算法与启发式算法,解决了无人机覆盖多区域的路径规划问题。考虑到无人机续航能力较差,Luo等<sup>[16]</sup>提出车辆作为移动充电站以协助无人机完成点目标的访问任务;夏阳升等<sup>[17]</sup>首次将车辆支持无人机的模式引入多区域覆盖侦察问题,利用一辆车支持一架无人机协同完成多个目标区域的覆盖任务,提出了一种高效的三阶段启发式算法求解。

在无人机区域侦察领域,多数的研究聚焦于利用无人机执行目标数量较少或区域面积较小的侦察任务,研究无人机在目标区域内的最优扫描路径。然而,多数文献未考虑目标区域多、目标分布范围远、超出无人机飞行范围的情况。考虑利用车辆支持无人机的模式来扩大有效侦察范围、提升侦察效率的研究仍在起步阶段,建立的多区域覆盖侦察模型较为简单,且缺乏车辆同时携带多架无人机的研究。针对以上问题,本文考虑车辆的道路约束以及无人机的续航约束,建立车辆支持多无人机的多区域覆盖路径规划模型;改进往复式与螺旋式两种无人机覆盖模式,提出求解车辆与无人机协同路径的启发式算法;基于真实场景进行仿真实验,验证车辆支持多无人机的区域覆盖侦察模式的必要性以及算法求解效率。

## 1 模型建立

### 1.1 问题描述

车辆支持的多无人机多区域覆盖路径规划问题如图 1 所示,车辆携带无人机从基站出发,沿已知的地面道路行驶,在道路网的节点可为无人机提供起飞和降落的环境。起飞后无人机自主前往目标区域执行覆盖任务,其飞行路径不再受道路网约束。无人机从起飞点驶至目标区域边缘,沿采样路径对其进行覆盖扫描,期间车辆可以原地等待,也可继续沿道路行驶,适时放飞或收回其他无人机。无人机完成覆盖扫描任务后与车辆汇合充电或更换电池。以此循环,直至所有目标区域均被覆盖完毕,车辆搭载全部无人机返回出发点。

### 1.2 问题建模

在车辆支持多无人机的协同区域覆盖路径规

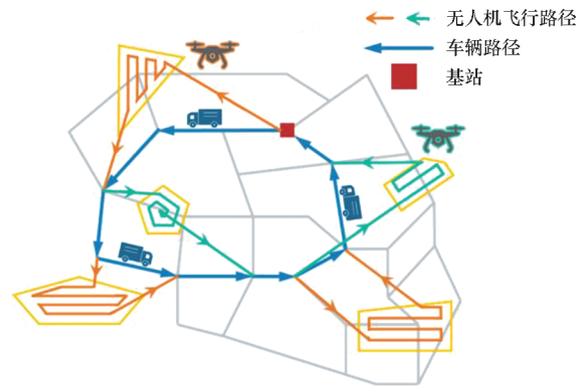


图 1 车辆支持的多无人机多区域覆盖路径规划问题  
Fig. 1 Illustration of collaborative coverage path planning problem for multi-area by truck-supported multi-UAV

划问题中,由一辆汽车作为无人机的移动充电平台支持无人机完成全部覆盖任务。车辆载  $U$  架无人机沿道路行驶,道路无向图  $G = (V, E)$  表示,其中道路节点集合  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ ,道路弧段集合为  $E$ 。节点 1 为车辆出发与返回的基站。待侦察的目标区域均为多边形,其集合为  $A = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M\}$ ,其中  $\delta_i (i = 1, 2, \dots, M)$  为目标区域  $i$  的顶点坐标集合。建模过程中使用的符号及其含义如表 1 所示。

表 1 符号及其含义  
Tab. 1 Symbols and definitions

| 符号                   | 含义  |
|----------------------|---|
| $G$                  | 道路无向图, $G = (V, E)$   |
| $V$                  | 道路节点集合, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$                            |
| $E$                  | 道路弧段集合  |
| $A$                  | 目标区域集合, $A = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M\}$             |
| $v^V$                | 车辆平均速度  |
| $E_{\max}$           | 无人机最大电量   |
| $t_i^{VA}, t_i^{VL}$ | 车辆到达、离开节点 $i$ 的时刻   |
| $t_i^{UA}, t_i^{UL}$ | 无人机从节点 $i$ 降落、离开的时刻   |
| $E_{ija}$            | 无人机起降于 $i, j$ 并覆盖目标区域 $a$ 过程中消耗的电量                                |
| $T_{ija}$            | 无人机起降于 $i, j$ 并覆盖目标区域 $a$ 过程中消耗的时间                                |
| $D_{ij}$             | 节点 $i, j$ 之间的最短距离, $\forall i, j \in V$                           |
| $x_{ij}$             | 若车辆通过弧 $(i, j) (i \neq j)$ , 则为 1; 否则为 0                          |
| $y_{ijad}$           | 若无人机 $d$ 从 $i$ 起飞, 覆盖目标区域 $a$ , 并降落于 $j (i \neq j)$ , 则为 1; 否则为 0 |
| $z_{ijd}$            | 若车辆载着无人机 $d$ 通过弧 $(i, j) (i \neq j)$ , 则为 1; 否则为 0                |

所建立的混合整数规划模型为:

$$\min Z = t_1^{VA} \quad (1)$$

s. t.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N x_{1j} = 1 \\ \sum_{i=1}^N x_{i1} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = \sum_{u=1}^N x_{ui} \quad \forall i \in [1, N] \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{d=1}^U y_{ijad} = 1 \quad \forall a \in [1, M] \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq z_{ijd} \quad \forall i, j \in [1, N]; \forall d \in [1, U] \quad (5)$$

$$z_{ijd} + \sum_{a=1}^M y_{ijad} \leq 1 \quad \forall i, j \in [1, N]; \forall d \in [1, U] \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N (z_{ijd} + \sum_{a=1}^M y_{ijad}) = \sum_{u=1}^N (z_{uid} + \sum_{a=1}^M y_{uiad}) \quad \forall i \in [1, N]; \forall d \in [1, U] \quad (7)$$

$$y_{ijad} E_{ija} \leq E_{\max}$$

$$\forall i, j \in [1, N]; \forall a \in [1, M]; \forall d \in [1, U] \quad (8)$$

$$t_1^{VL} = 0 \quad (9)$$

$$(1 - x_{ij}) \left( t_j^{VA} - t_i^{VL} - \frac{D_{ij}}{v} \right) \geq 0 \quad \forall i, j \in [1, N] \quad (10)$$

$$(1 - x_{ij}) (t_i^{VL} - t_j^{VA}) \geq 0 \quad \forall i, j \in [1, N] \quad (11)$$

$$(1 - x_{ij}) (t_i^{VL} - t_{jd}^{UA}) \geq 0 \quad \forall i, j \in [1, N]; \forall d \in [1, U] \quad (12)$$

$$t_{id}^{UL} \geq t_i^{VA} \sum_{j=1}^N \sum_{a=1}^M y_{ijad} \quad \forall i \in [1, N]; \forall d \in [1, U] \quad (13)$$

$$t_{jd}^{UA} \geq \sum_{a=1}^M (T_{ija} + t_{id}^{UL}) y_{ijad} \quad \forall i, j \in [1, N] \quad (14)$$

目标函数(1)表示最小化区域覆盖的总时间,指车辆与无人机从基站出发,完成所有区域覆盖任务后返回基站所用的时间。约束条件(2)要求车辆路径的起点与终点必须是基站;约束条件(3)确保车辆路径在每个点的出度与入度一致;约束条件(4)确保每个目标区域都被一架无人机覆盖仅一次;约束条件(5)表示车辆载着无人机行驶的路径包含于车辆路径;约束条件(6)确保无人机在任意两道路节点间最多有一条路径;约束条件(7)确保无人机的出度与入度一致;约束条件(8)表示无人机每次执行覆盖侦察任务

消耗的电量不能超过上限;约束条件(9)表示车辆离开基站的时刻为0;约束条件(10)表示车辆到达后一节点的时刻不早于前一节点离开的时刻加两点间最短路径的用时;约束条件(11)与约束条件(12)表示车辆离开节点的时刻不早于车辆到达节点的时刻,也不早于无人机降落于该点的时刻;约束条件(13)表示车辆停靠在节点后才能发射无人机;约束条件(14)表示无人机完成区域覆盖任务后才能降落。

## 2 迭代松弛的启发式算法

为解决车辆支持的多无人机协同覆盖路径规划问题,提出一种迭代松弛的启发式算法,共分为三个阶段:①无人机覆盖路径规划阶段,将无人机每对起落点之间的距离约束为0,且都选在对应目标区域的映射点,继而根据目标区域的形状大小选择最优的覆盖模式并规划覆盖路径;②车辆路径规划阶段,根据目标区域映射点求解访问各区域的顺序并规划车辆路径;③迭代松弛对起落点间距的约束,并同时优化无人机与车辆的路径。

### 2.1 无人机覆盖路径生成

车辆支持无人机进行区域搜索时,需沿道路行驶至某处释放无人机,无人机行进至目标区域执行覆盖任务,任务完成后再与车辆汇合。由于起飞点与降落点之间的距离受到额外约束,一个目标区域对应的无人机起落点相同且是道路节点,称此节点为该目标区域在道路网上的映射点。基于每个目标区域的映射点,初步生成无人机区域覆盖模式及覆盖路径。

#### 2.1.1 映射点的选取

无人机于车辆处起飞后的工作状态分为三个阶段:①行进至目标区域边缘;②沿既定路径执行覆盖任务;③离开目标区域并返回车辆处。由于只有阶段2的能耗属于有效工作能耗,为了提高无人机的工作效率,应减少无人机行进过程的能耗。

对任意多边形目标区域 $\delta$ ,求得其质心坐标为 $c$ ,距离质心最近的道路节点 $v_{i^*} = \arg \min_{i \in [1, N]} d(c, v_i)$ ,将该点记为 $\delta$ 的映射点 $v_{LR} = v_{i^*}$ ,其中 $d(c_i, v_i)$ 表示点 $c_i$ 与 $v_i$ 间的欧氏距离。

#### 2.1.2 覆盖路径的约束

规划无人机覆盖路径即规划无人机空中采样点的数量与位置。单次采样在地面的投影区为矩形,覆盖任务结束时所有采样投影区应能完全覆盖目标区域。同时为了保证后期图像拼接或3D

建模的精度,相邻采样区域之间应有一定重叠<sup>[18]</sup>。无人机覆盖路径约束如图 2 所示, $L_x$  表示采样区垂直于无人机飞行方向的横向长度, $ov_x$  表示相邻采样区域之间横向重叠量;相似地, $L_y$  与  $ov_y$  分别表示采样区沿飞行方向的纵向宽度与纵向重叠量。采样点的连线构成一条无人机覆盖路径。

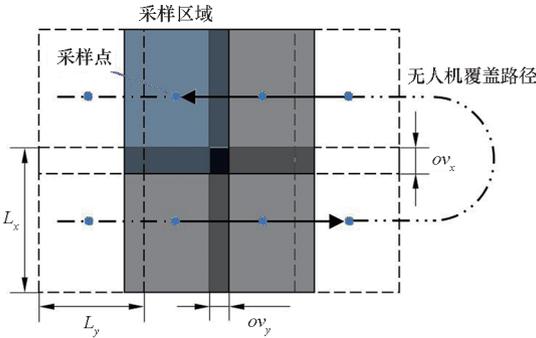


图 2 无人机覆盖路径约束

Fig. 2 Constraints on the coverage path of the UAV

### 2.1.3 覆盖模式的选取

目前的研究认为,覆盖模式在不同的区域中的表现具有显著差异,且难以根据区域的形状大小准确判断最优的覆盖模式<sup>[19]</sup>。另外,根据起落点与目标区域相对位置,最优的覆盖模式与覆盖路径也不同。因此规划无人机覆盖路径时,分别基于起落点的位置规划不同模式下的覆盖路径。

螺旋式覆盖路径:无人机以距离起飞点最近的目标区域顶点为基准点,以基准点至两个相邻顶点为基准边分别构建两条覆盖路径,选择使无人机转角较小者为第一条覆盖路径。此后依次沿下一条边并逐圈向内覆盖,如图 3 所示。

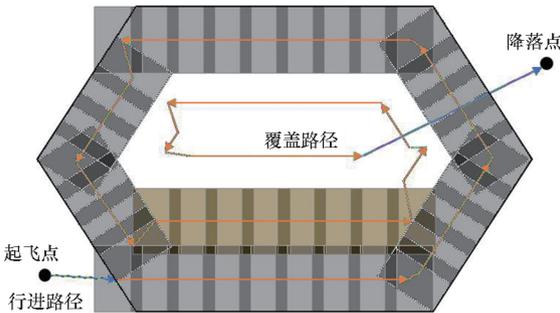


图 3 基于起落点的螺旋式覆盖路径

Fig. 3 Spiral coverage path based on takeoff and landing points

往复式覆盖路径:以多边形最长边为基准边,分别以基准边的两个顶点为基准点构建往复式覆盖路径。根据基准边以及基准点的不同可构建四种路径,从中选取最短者作为构建的往复式覆盖

路径,如图 4 所示。

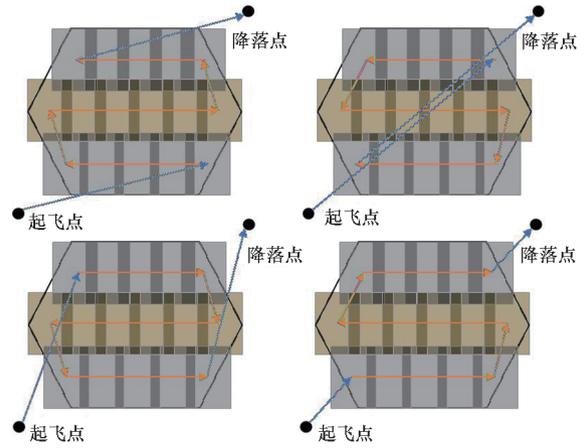


图 4 基于起落点的往复式覆盖路径

Fig. 4 Back-and-forth coverage path based on takeoff and landing points

## 2.2 车辆路径生成

设目标区域映射点构成集合  $T = \{v_{LR}^i \mid \delta_i \in A\}$ , 车辆行驶至目标区域的映射点即视为访问了该目标区域,因此车辆路径的生成问题转化为典型的 TSP 为 NP 难 (non-deterministic polynomial-hard, NP-hard) 问题,在目标区域数较多的情况下使用精确算法是不现实的,而简单的启发式算法如贪婪算法得到的解通常不令人满意。尤其是求解路径存在交叉时,通过启发式的消解交叉的方法能快速提升路径规划的质量<sup>[20]</sup>。因此在生成访问顺序时,首先采用贪婪算法构建一条可行的车辆路径,然后重复检测并消除路径中的交叉,如算法 1 所示。 $Path(u, v)$  与  $D(u, v)$  分别表示道路节点  $u$  至  $v$  的最短路径与最短路径距离。 $\Gamma^V$  表示车辆路径,仅记录涉及无人机起飞与降落的道路节点,节点之间则沿最短路径行驶。

### 算法 1 车辆路径交叉检测与消解

Alg. 1 Detection and resolution of truck path intersections

输入:  $Path(u, v), D(u, v), \forall u, v \in V; \Gamma^V$   
 输出: 无交叉的车辆路径  $\Gamma^V$

1. 设  $\Gamma^V$  中第  $m$  位节点为  $V_{(m)}$
2. **While** 存在  $m, n \in \{1, 2, \dots, |\Gamma^V| - 1\}, n > m$  使  $Path(V_{(m)}, V_{(m+1)}) \cap Path(V_{(n)}, V_{(n+1)}) \neq \emptyset$  **do**:
3.  $\Gamma^V \leftarrow \{V_{(1)}, \dots, V_{(m)}, V_{(n)}, V_{(n-1)}, \dots, V_{(m+1)}, V_{(n+1)}, \dots, V_{(1)}\}$
4. **End while**

## 2.3 迭代松弛优化

每个目标区域由一架无人机一次完成,起飞

点、覆盖路径中的所有采样点以及降落点构成一条航路,用 $\Gamma^U$ 表示所有无人机航路的集合。经前述步骤,车辆与无人机的路径已经初步确定,此时的方案已经属于一个可行解,但该方案每次仅放飞一架无人机,期间车辆与其他无人机都在原地等待,显然没有利用车辆与无人机之间的协同性,因此对车辆与无人机的路径进行迭代优化,如算法2所示。

### 算法2 无人机与车辆路径的迭代优化

Alg.2 Iterative optimization of UAV and truck paths

输入:道路节点图 $G = (V, E); P(u, v), D(u, v), \forall u, v \in V; \Gamma^V; \Gamma^U; \varepsilon_{\max}; I$

输出:改进后的车辆路径与无人机航路集合 $\Gamma^V, \Gamma^U$

1.  $\varepsilon \leftarrow 0$ ;
2. **While**  $\varepsilon < \varepsilon_{\max}$  **do**:
3. 松弛无人机起落点间距约束  $\varepsilon \leftarrow (\varepsilon + \varepsilon_{\max}) / I$
4. 将 $\Gamma^U$ 内所有航路按无人机剩余能量从大到小排列, $task_{(\alpha)}$ 表示排名为 $\alpha$ 的航路;
5. **For**  $\alpha = 1$  **to**  $|\Gamma^U|$  **do**
6. 构建 $task_{(\alpha)}$ 备选起飞点集合 $H_L$
7. **If**  $H_L \neq \emptyset$  **then**
8. 计算所有 $u_\alpha \in H_L$ 的综合指标 $C_\alpha = \theta C_{1,\alpha} + (1 - \theta) C_{2,\alpha}$ ;
9. 将 $C_\alpha$ 值最小者设为航路 $task_{(\alpha)}$ 的新起飞点,记为 $u_\alpha^*$
10. **If**  $u_\alpha^*$ 不是原起飞点 $V_{(l_\alpha)}$  **then**
11. **If**  $V_{(l_\alpha)}$ 不是其他航路的起落点 **then**
12. 将车辆路径中的 $V_{(l_\alpha)}$ 替换为 $u_\alpha^*$
13. **Else if**
14. 在满足无人机数量约束的条件下将 $u_\alpha^*$ 插在 $V_{(l_\alpha)}$ 之前或之后,使车辆路径长度的增量更小
15. **End if**
16. 新车辆路径与无人机路径
17. **End if**
18. **End if**
19. 与上述更新起飞点的过程类似,更新 $task_{(\alpha)}$ 的降落点
20. **End for**
21. **End while**

算法中, $\varepsilon$ 表示无人机航路的起落点间距的上限。初始路径中 $\varepsilon = 0$ ,即约束每条航路的起落点相同,在随后迭代过程中逐渐松弛该约束,引导无人机路径与车辆路径的迭代优化。设置

迭代次数 $I$ 以及结束时 $\varepsilon$ 的最大值 $\varepsilon_{\max}$ ,控制松弛速度与松弛范围(算法2第1行)。无人机航路 $task_{(\alpha)} \in \Gamma^U$ 的起飞点位于车辆路径 $\Gamma^V$ 中的第 $l_\alpha$ 位,记为 $V_{(l_\alpha)}$ 。构建无人机航路 $task_{(\alpha)}$ 的备选起飞点集合 $H_L$ 时,每个备选点均为道路节点且与降落点的距离不超过 $\varepsilon$ ,同时不应导致航路违反无人机能量约束(算法2第4行)。从 $H_L$ 中选定一个备选点作为新起飞点时,考虑两项指标 $C_{1,\alpha}$ 与 $C_{2,\alpha}$ 。对某备选点 $u \in H_L$ , $C_{1,\alpha}$ 表示 $V_{(l_{\alpha-1})}$ 与 $V_{(u)}$ 之间的最短路径距离, $C_{1,\alpha}$ 越小表示新起飞点与车辆路径中的上一点越近,当 $C_{1,\alpha} = 0$ 时车辆可以少经过一个道路节点; $C_{2,\alpha}$ 表示将 $V_{(l_\alpha)}$ 替换为 $V_{(u)}$ 时车辆路径长度的增量。经过加权处理,新起飞点的选择指标的计算方法为 $C_\alpha = \theta C_{1,\alpha} + (1 - \theta) C_{2,\alpha}$ ,其中 $\theta$ 为权重系数(算法2第8行)。

## 3 分析实验

下面通过模拟算例对所提出的模型与算法作出验证。实验应用Python 3.8进行编程,程序运行于Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU,32 GB内存,Windows 10操作系统。

### 3.1 参数设置

针对车辆与无人机协同完成的多区域覆盖任务,选用IRIS四旋翼无人机,搭载具有万向节稳定器的GoPro相机,利用三芯串联锂聚合物电池(3S LiPo battery, 11.1 V, 5.5 Ah)为其供电。为保证飞行安全,预留部分能量以供无人机起飞与降落各一次,剩余有效能量 $E$ 为120.0 kJ;采样区域地面投影尺寸( $L_x, L_y$ )为(40.0 m, 30.0 m)。为保证图片拼接效果,要求相邻采样区域的纵横重叠率至少为5%。无人机在扫描路径上的平均输出功率 $P_w = 205$  W,平均速度为 $V_{dw} = 12$  m/s;在非扫描路径上的输出功率为行进功率 $P_m = 150$  W,平均速度为 $V_{dm} = 20$  m/s。车辆在道路上行驶的平均速度为30 km/h。

### 3.2 场景想定

在 $60 \text{ km}^2$ 的测试区域内随机生成16个目标区域,区域面积均在 $0.30 \sim 0.60 \text{ km}^2$ 之间,形状为随机的凸多边形。3架无人机在1辆卡车的支持下完成所有区域的覆盖任务。在图5所示的想定场景中,16个目标区域由蓝框标出,车辆需沿道路网(灰色网格)行驶,每个交叉口作为一个道路节点。红色方块表示基站位置,车辆与无人机从基站出发,完成全部覆盖任务后与车辆共同

返回基站。

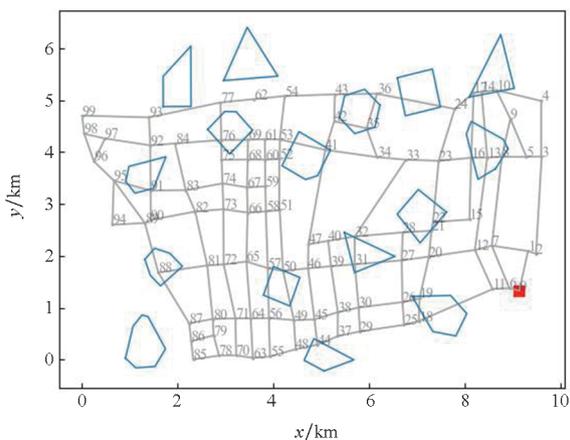
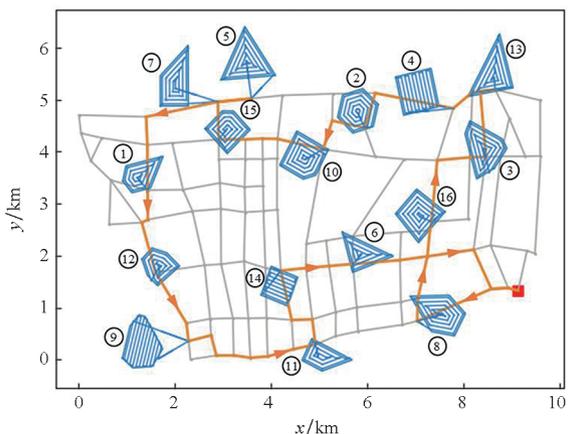


图 5 道路网络及目标区域场景想定

Fig. 5 Road network and target area scene setting

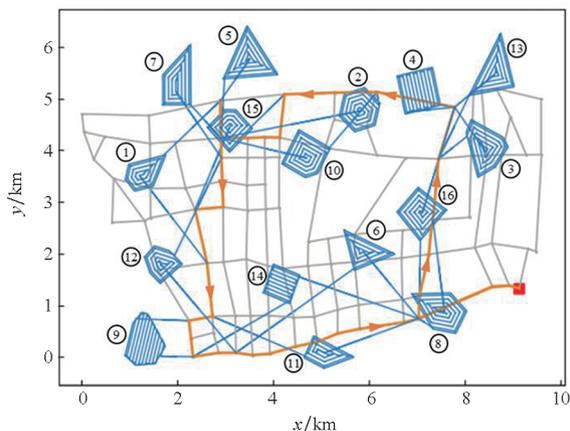
### 3.3 结果分析

采用车辆支持多无人机的区域覆盖侦察问题,应用所设计的迭代松弛的启发式算法进行求解。经过多次试验,算法参数值最终设置为  $\varepsilon_{\max}=4\ 000\ \text{m}$ 、 $J=10$ 、 $\theta=0.52$ 。迭代松弛优化前后的求解结果分别如图 6 所示。针对单个目标区域,无人机选用了最优的覆盖模式与覆盖路径;车辆路径沿道路网络将各目标区域串联,且不存在路径交叉的情况。规划结果如图 6 (b) 所示,其中蓝色路径为无人机覆盖路径,橙色路径为车辆沿道路网行驶路径。从图 6 (b) 可知,无人机在目标区域①、②等区域采取了螺旋式覆盖路径,在目标区域④、⑨等区域采取了往复式覆盖路径。车辆路径与无人机路径协同配合,完成多区域覆盖侦察任务总用时为 1.593 h,算法运算时间为 15.903 s。若仅由无人机从基站出发完成所有侦察任务,则只能完成 1 个目标区域的覆盖。



(a) 初始路径规划结果

(a) Initial path planning result



(b) 迭代松弛优化结果

(b) Iterative relaxation optimization result

图 6 车辆与无人机路径规划结果

Fig. 6 Collaborative path planning results of truck and UAVs

为验证迭代松弛策略的优势,设计了基于贪婪思想的优化算法进行对比分析。该算法在图 6 (a) 所示的初始路径的基础上,在满足无人机能量约束与数量约束的条件下,以最小化车辆等待时间为目标依次改变各航路的起飞点与降落点位置。基于贪婪思想的优化算法所得路径规划方案如图 7 所示,任务总用时为 2.003 h,因此所提出的迭代松弛优化策略比贪婪策略提升了 20.47%。

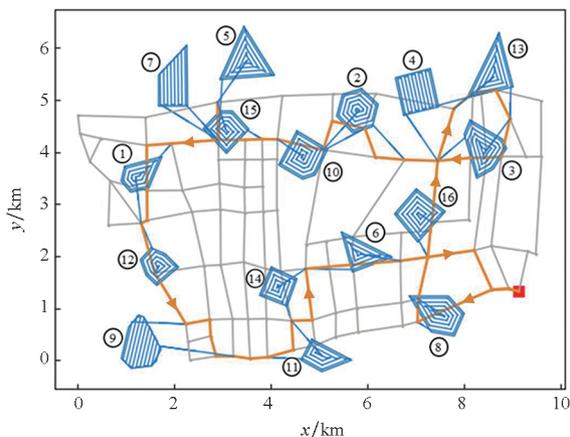


图 7 基于贪婪策略的路径规划结果

Fig. 7 Path planning result based on greedy strategy

为了检验迭代松弛优化算法的路径规划效果,将无人机航路的能量消耗量与有效能量  $E$  的比值定义为能量利用率。由于无人机飞行速度高于车辆,提高无人机航路的能量利用率有助于提升任务完成效率,如图 8 所示,迭代优化后绝大部分无人机航路的能量利用率均有提升,最多提升 110.41%。图 9 显示了无人机与

车辆相互等待的时间,其中车辆等待无人机的时间记为正。分别计算迭代优化前后,车辆等待无人机的总时间分别为 1.862 h 与 0.893 h。由此可知,通过降低车辆的等待时间可以显著缩短任务完成时长。综上所述,车辆支持多无人机的模式可以高效完成大范围内的区域覆盖任务,所提出的迭代松弛的启发式算法可以有效解决车机协同路径规划问题。

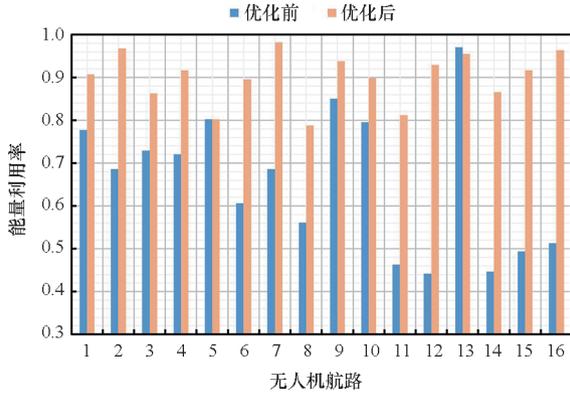


图8 迭代优化前后无人机能量利用率

Fig.8 Comparison of UAV energy utilization before and after iterative optimization

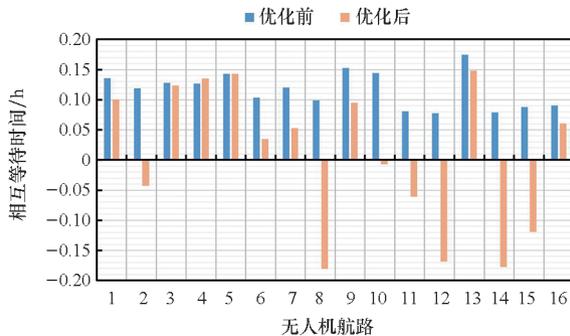


图9 迭代优化前后无人机与车辆相互等待时间

Fig.9 Mutual waiting time between UAV and vehicle before and after iterative optimization

## 4 结论

作为一种快速感知目标区域信息的典型方式,无人机区域侦察已成为新的研究热点。考虑到无人机续航能力低的短板,亟待研究新的区域侦察模式以突破无人机飞行范围的限制,从而在更大范围内执行区域覆盖侦察任务。车辆支持无人机是一种成熟的车机协同作业方式,是无人机区域侦察的一个新的研究方向。针对车辆支持多无人机的协同覆盖路径规划问题,建立混合整数规划模型,设计基于迭代松弛思想的启发式算法,高效求解车辆与多无人机的协同路径规划方案。然而对基于车机协同的多区域侦察问题的研究还

不够深入,问题模型较为简单。未来研究应着力于贴近更真实的环境,如建立更精确的无人机能耗与速度模型,或扩展新的车机应用模式,如多辆车与多架无人机的协同等。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘慧霞,马丽娜,李大健,等. 无人机多机协同侦察系统关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(12): 1-4. LIU H X, MA L N, LI D J, et al. Research on technologies for multi-UAV cooperative reconnaissance[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(12): 1-4. (in Chinese)
- [2] CESETTI A, FRONTONI E, MANCINI A, et al. A visual global positioning system for unmanned aerial vehicles used in photogrammetric applications[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 61: 157-168.
- [3] SIEBERT S, TEIZER J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system[J]. Automation in Construction, 2014, 41: 1-14.
- [4] 皇甫莹丽,程威. 灾害救援中无人机资源优化配置仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(2): 55-58. HUANGFU Y L, CHENG W. Simulation research on resource optimization configuration of UAV in earthquake rescue[J]. Computer Simulation, 2019, 36(2): 55-58. (in Chinese)
- [5] 史洁青,冯仲科,刘金成. 基于无人机遥感影像的高精度森林资源调查系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 82-90. SHI J Q, FENG Z K, LIU J C. Design and experiment of high precision forest resource investigation system based on UAV remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 82-90. (in Chinese)
- [6] 吴岸平,郭正,侯中喜,等. 不确定环境下无人机区域目标搜索及载荷参数影响[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(4): 35-42. WU A P, GUO Z, HOU Z X, et al. Area target search and payload parameters influence for UAV in uncertain environment[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(4): 35-42. (in Chinese)
- [7] 蒋超,崔玉伟,王辉. 基于图像的无人机战场态势感知技术综述[J]. 测控技术, 2021, 40(12): 14-19. JIANG C, CUI Y W, WANG H. Review on battlefield situational awareness of UAV based on image technology[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(12): 14-19. (in Chinese)
- [8] 刘琨,黄大庆,韩玉洁,等. 多无人机协同区域搜索系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(3): 98-103. LIU K, HUANG D Q, HAN Y J, et al. Design of multi-UAV cooperative area search system[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(3): 98-103. (in Chinese)
- [9] 王庆江,彭军,倪保航,等. 无人机大区域侦察研究[J]. 光电与控制, 2015, 22(6): 39-43. WANG Q J, PENG J, NI B H, et al. Research on large-range reconnaissance of UAV[J]. Electronics Optics &

- Control, 2015, 22(6): 39–43. (in Chinese)
- [10] 李登峰, 马跃龙, 陈丁, 等. 基于视觉 slam 的无人机序列影像快速拼接[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(增刊 1): 30–38.  
LI D F, MA Y L, CHEN D, et al. Rapid mosaic of UAV sequence images based on visual slam[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(Suppl 1): 30–38. (in Chinese)
- [11] XIAO S C, TAN X J, WANG J P. A simulated annealing algorithm and grid map-based UAV coverage path planning method for 3D reconstruction [J]. Electronics, 2021, 10(7): 853.
- [12] DI FRANCO C, BUTTAZZO G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 83(3/4): 445–462.
- [13] ÖST G. Search path generation with UAV applications using approximate convex decomposition [D]. Linköping: Linköping University, 2012.
- [14] CABREIRA T M, DI FRANCO C, FERREIRA P R, et al. Energy-aware spiral coverage path planning for UAV photogrammetric applications [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 3662–3668.
- [15] XIE J F, GARCIA CARRILLO L R, JIN L. Path planning for UAV to cover multiple separated convex polygonal regions[J]. IEEE Access, 2020, 8: 51770–51785.
- [16] LUO Z H, LIU Z, SHI J M. A two-echelon cooperated routing problem for a ground vehicle and its carried unmanned aerial vehicle[J]. Sensors, 2017, 17(5): 1144.
- [17] 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. (in Chinese)
- [18] 韩敏, 闫阔, 秦国帅. 基于改进 KAZE 的无人机航拍图像拼接算法[J]. 自动化学报, 2019, 45(2): 305–314.  
HAN M, YAN K, QIN G S. A mosaic algorithm for UAV aerial image with improved KAZE [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(2): 305–314. (in Chinese)
- [19] CABREIRA T M, BRISOLARA L B, FERREIRA P R, Jr. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles[J]. Drones, 2019, 3(1): 4.
- [20] FOSIN J, CARIĆ T, IVANJKO E. Vehicle routing optimization using multiple local search improvements [J]. Automatika, 2014, 55(2): 124–132.