

载荷性能约束下的无人机区域探测 航路规划算法研究

李屹东¹, 吴晨阳¹, 于竞婷¹, 王 鹏²

(1. 中航(成都)无人机系统股份有限公司, 成都 611730;

2. 西安因诺航空科技有限公司, 西安 710075)

摘要: 无人机区域探测航路规划算法可广泛应用在搜索救援, 监测勘察和环境监测等领域; 为了解决无人机在载荷性能约束下的航路规划问题, 以光电传感器(EO)为主载荷, 结合无人机飞行特性, 给出了一种基于无人机载荷约束下的区域探测航路规划算法; 主要包括区域最小跨度的确定、块区分割线的生成、块区进出点分配和过渡圆弧轨迹生成等内容, 利用这些步骤可快速完成对整个区域的全覆盖探测; 通过对特定区域的探测航路规划仿真实验, 验证了该算法在满足载荷约束、飞控性能约束以及任务区域限制的情况下实现了区域全覆盖探测, 且航路最短的目的, 并在对比仿真实验中验证了所提出的算法的优势; 该算法的可迁移性较好, 对于二维和三维区域探测都具有重要参考价值。

关键词: 无人机; 载荷; 区域覆盖; 区域探测; 航路规划

Research on Route Planning Algorithm for Area Detection of UAVs with Load Performance Constraint

LI Yidong¹, WU Chenyang¹, YU Jingting¹, WANG Peng²

(1. AVIC (Chengdu) UAS Co., Ltd., Chengdu 611730, China;

2. Xi'an INNNO Aeronautics Technologies Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Route planning algorithms for the area detection of unmanned aerial vehicles (UAVs) can be widely used in search and rescue, investigation, environmental monitoring and other fields. In order to solve route planning problem of UAVs with the constraint of load performance, considering electro-optical (EO) sensors as main load, and combining the flight characteristics of UAVs, a route planning algorithm for area detection based on the load constraint conditions of UAVs is proposed. The algorithm includes the determination of the minimum span of target area, generation of block area, allocation of entry and exit points for block area, and generation of transitional arc trajectory, and uses these methods to quickly achieve full coverage detection of whole area. Through several area detection route planning experiments for a specific area, it is verified that the proposed algorithm achieves full coverage of area and the shortest route with the constraints of load performance, flight controller performance, and limited task area. Moreover, the advantages of the proposed method are verified in the comparison experiment. The algorithm has high transferability, which is of great significance for detecting two-dimensional and three-dimensional areas.

Keywords: UAV; load; area coverage; area detection; route planning

0 引言

无人机区域探测航路规划算法是无人机应用领域中的一个重要研究方向, 它涉及如何有效地使用无人机所

携带的载荷来搜索特定区域, 以满足各种应用需求, 如搜索与救援、监测与勘察、农业和环境监测等^[1]。无人机区域覆盖算法的研究在国内外都取得了显著的进展, 涉及了路径规划、传感器布局、协同控制、自动化决

收稿日期:2023-11-30; 修回日期:2024-01-13。

作者简介:李屹东(1966-),男,硕士,研究员。

通讯作者:王 鹏(1995-),男,硕士,工程师。

引用格式:李屹东,吴晨阳,于竞婷,等. 载荷性能约束下的无人机区域探测航路规划算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2):168-174.

策、能量效率、通信通道建模以及应用等多个方面^[2-6]。无人机区域覆盖算法的研究目的在于最大程度地提高覆盖效率, 实现更好的区域覆盖性能。

现有关于无人机区域探测航路规划算法的研究大多围绕航路覆盖区域和轨迹规划展开。文献 [7-8] 提出了一种将凹多边形转变为凸多边形的方法, 使无人机高效地完成对指定区域的无遗漏覆盖搜索; 文献 [9] 提出了一种有效解决无人机在凸多边形区域中的覆盖航迹规划问题的方法; 文献 [10] 通过考虑机载传感器的视场或感知半径的方法, 解决了异构无人机的精确单元分解和海岸区域划分问题; 文献 [11] 为混乱城市环境下的单架或多架无人机系统设计了两种有效的覆盖路径规划和避碰算法; 文献 [12] 研究针对多架无人机的自主区域覆盖任务, 提出了从操作员输入到电机指令的完整软硬件架构; 文献 [13] 提出了一种生成最优轨道数的方法, 使无人机在完成时耗时最少, 转弯次数最少; 文献 [14] 提出了一种利用配备图像传感器的无人机群对地面区域进行最小时间覆盖的解决方案; 文献 [15] 设计了协调的多无人机网络解决无人机通信问题, 研究具有可扩展性; 文献 [16] 采用遗传算法 (GA)、蚁群优化器 (ACO)、Voronoi 图和聚类方法等人工智能方法, 解决了自主无人机在目标覆盖问题中的路径规划问题; 文献 [17-18] 将深度强化学习引入无人机覆盖算法研究, 减少了无人机覆盖过程所需的时间, 提高了覆盖算法的效率。上述文献中对无人机区域覆盖算法的研究多集中在覆盖区域和轨迹规划方面, 并没有考虑到载荷性能对无人机执行区域覆盖任务的影响。

对于载荷而言, 一般指的是无人机所携带的传感器, 它主要用来协助无人机在飞行过程中搜集各种目标的信息。考虑到载荷性能的限制, 无人机区域探测规划算法研究在众多领域具备一定的现实意义^[19], 它主要体现在图像分辨率、传感器采样频率、通信范围等载荷性能参数的限制下^[20], 如何规划出一条既满足载荷性能约束, 又满足飞机性能约束的航线。由此可见, 研究载荷性能约束下的无人机区域探测规划算法对于提高无人机应用的效能和效率具有重要意义。

鉴于以上分析, 本文提出了一种载荷性能约束下的无人机区域探测航路规划算法。该算法旨在根据给出的目标侦察区域, 如何规划出一条符合多种约束 (载荷性能约束、飞控性能和任务场景约束) 的航线。算法采用了纯几何方法, 针对任意凸多边形目标区域可规划出符合其几何特性的航线, 该航线满足了以上提到的各种约束, 同时也保证了飞机航程最短、探测范围最大, 并且具备实时性强的特点, 可适用于纷繁复杂的战场环境。综上, 本文提出的区域探测航路规划算法具备以下几个优势:

- 1) 对于任意形状的多边形可规划出符合目标区域几何特性的航线;
- 2) 规划出的航路满足无人机飞控性能约束和载荷性能约束;
- 3) 保证无人机掉头次数最少, 解决了无人机飞行路径最短的问题;
- 4) 若载荷在飞机执行区域探测任务期间正常工作, 则载荷的探测范围可达到最大, 从而实现对目标区域的有效搜索;
- 5) 由于采用纯几何方法, 本文所提出的区域探测规划算法可迅速规划出航路, 因此具备实时性强的特点。

1 问题描述

无人机在现代战争中起着举足轻重的作用, 为了搜集敌方信息, 一般利用无人机搭载传感器对敌方特定区域进行探测。为了有效完成整个探测任务, 需规划出一条符合无人机载荷性能和飞控性能的航路, 该航路需满足无人机执行探测任务时间最短、航路规划时间最短以及探测范围最大等条件, 这些条件也是无人机区域探测航路规划中亟须解决的问题。以下对这几个问题进行介绍。

1.1 区域探测任务完成时间最短

区域探测任务完成时间指的是无人机在进入扫描航段后执行完探测任务退出探测区域所需要的时间。根据所提供的无人机飞行速度, 以及规划出的航路总航程, 便可计算出任务完成时间。为了保证任务完成时间最短, 需确保总航程最短。在载荷性能以及无人机性能的约束下, 当前区域探测规划算法可确保载荷工作范围全部覆盖目标区域的同时航程最短。由于整个区域探测航段由直线段 (有效扫描航段) 和圆弧段 (过渡航段) 组成, 因此区域探测任务完成时间 t 可由如下数学关系式表示:

$$\begin{cases} t = \frac{\sum_{i=1}^{N+1} \text{第 } i \text{ 条有效扫描航段距离} + \pi \times \frac{\text{载荷幅宽}}{2} \times N}{\text{无人机飞行速度}} \\ N = \text{区域最小跨度} / \text{载荷幅宽} - 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: N 代表无人机掉头次数。

1.2 区域探测航路规划时间最短

区域探测航路规划时间指的是在输入接口输入参数后, 运行程序直至规划结果输出所需要的时间。区域探测规划时间最短的现实意义在于, 现代战争中无人机所处的作战场景复杂且危险, 无人机因此会受到多方面的干扰, 为了确保飞机能够有效且及时地完成探测任务, 需保证航路以最短的时间输出, 以便于控制模块对其进行跟踪。如果航路规划时间过长, 无人机控制模块无法及时获得航路信号, 导致航路执行失败, 从而对整个探

测任务造成不利影响。

1.3 区域探测范围最大

在对目标区域进行探测过程中，无人机利用所携带的载荷以飞“S”型航线的方式对目标区域进行扫描，如果载荷工作正常，其探测范围能够达到 100%，目标区域信息则会得到充分的搜集。载荷探测范围与无人机的有效探测航段和载荷幅宽相关，载荷探测范围 r 可表示为：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N+1} \text{第 } i \text{ 条有效探测航段长度} \times \text{载荷幅宽}}{\text{探测区域面积}} \times 100\% \quad (2)$$

其中：有效探测航段指的是载荷在工作状态时无人机所飞过的航线，载荷幅宽指的是载荷的有效搜索范围。飞机目标区域上空飞行时，可利用载荷的搜索特点完成对整个目标区域的探测。

在考虑以上指标的同时，还需注意在执行区域探测任务时，地面目标区域的几何特性、飞机本身的机械特性以及载荷特性等因素的限制。在这些因素的限制下，需实现如下功能：

- 1) 能够使载荷作用范围全面覆盖目标区域，保证优先完成探测任务；
- 2) 在完成侦查任务的同时能够保证飞机航路最短，任务完成时间最短；
- 3) 飞机在执行侦查任务的同时，能够确保航线满足飞机的最小转弯半径约束；
- 4) 飞机在执行航线时，可确保在指定航点处下发不同的载荷操作指令和控制参数，以确保侦察任务的顺利执行。

2 载荷性能分析

无人机所携带的光电传感器 (EO)，在地理信息系统、环境监测、军事情报、地质勘探、灾害管理和农业等领域均有广泛的应用^[21]，尤其在军事侦察任务中，其特有的目标搜索功能对侦察任务的完成起着关键作用。EO 的工作方式与其性能参数有着不可分割的关系，比如其照射方向与水平方向存在一定的夹角，造成其在飞机前方产生了一定范围的扫描盲区，导致飞机在执行侦察任务时为了能够全面搜索目标区域，不得不在盲区范围外对其进行扫描侦察。EO 的性能参数主要包括扫描角度范围、照射距离以及工作准备时间，参数具体值如表 1 所示。

表 1 EO 性能参数表

光电稳定平台	角度范围	$n \times 360^\circ$
		俯仰: $-110 \sim +20^\circ$
	照射距离	按俯仰角 60° , 通过无人机高度计算
工作准备时间		2 min

在 EO 模式下，飞机所执行的航线中存在任务点，即扫描点（在该航点处无人机向任务机发送姿态调整指令，使无人机机头对准目标，以便扫描任务的展开）。当飞机搭载 EO 执行侦察任务时，EO 的扫描范围在飞机正前方呈现出一片扇形区域，且其扫描方向会来回左右摆动，从而对目标进行充分地侦察。其具体工作方式如图 1 所示。

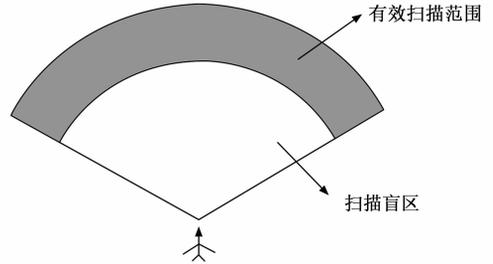


图 1 EO 工作方式示意图

由图 1 可知，EO 在执行探测任务时，探测范围有限，并存在一定的扫描盲区，因此在设计区域探测航路规划算法时，应充分考虑该特性，确保飞机在执行航路时 EO 能够扫描到所有探测目标。

3 区域探测航路规划算法设计

根据给定的任务区域、载荷参数以及飞机的最小转弯半径，可规划出满足这些要求的航线，具体执行过程如图 2 所示。首先，对于不规则形状的目标区域，在执行探测任务之前首先需要考虑整个区域的尺寸，确保无人机在执行航线时掉头次数最少，从而保证路径最短；其次，考虑到 EO 扫描特性，需在扫描盲区的影响下确定局部区域的进出点；最后，考虑目标区域几何特性，需在初始分配的进出点的基础上对其进行向外延伸，保证 EO 在进入工作状态后能够扫描到目标区域。

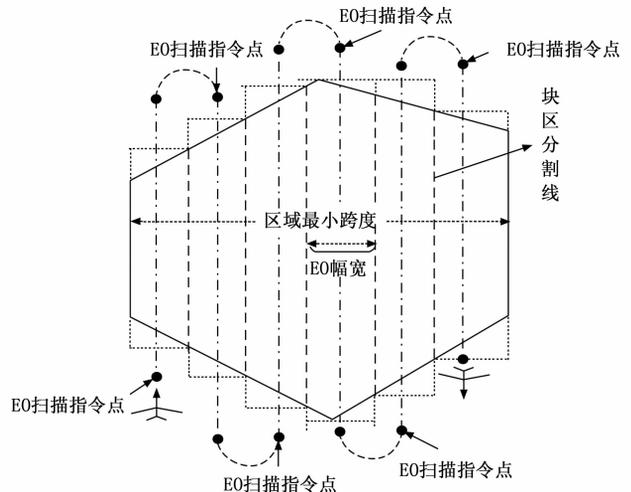


图 2 区域探测规划示意图

在 EO 为主载荷下, 飞机的侦察航路如图 2 所示, 在确定区域的任务航点后, 飞机从距离其最近的航点切入, 开始执行区域探测任务。为了确保 EO 能够对探测区域内的目标物进行充分的探测, EO 的扫描方向是沿着其飞行方向左右摆动, 在前方形形成一片扇形扫描区域, 使目标物被扫描区域所覆盖, 从而达到探测目标物的目的。另外, 鉴于 EO 独特的载荷特性, 每当飞机要执行直线段航线 (即有效扫描阶段) 时, 飞机需在该航段的起始点位置接收 scan+ 调整指令, 用于调整载荷位置, 以便使 scan+ 扫描效果达到最佳。区域探测航路规划算法根据不同的功能总共分为 4 个步骤, 分别是区域最小跨度的确定、块区分割线的生成、块区进出点的分配、和块区过渡轨迹的生成。

3.1 区域最小跨度的确定

区域最小跨度即过目标区域某个顶点, 垂直于该顶点另一侧的一条线段, 该线段存在的意义在于确保飞机以最少的掉头次数执行“S”型航线, 并且保证目标区域全被探测到。确定区域最小跨度的目的在于确保无人机飞行过程中掉头次数最少, 这是保证飞行轨迹最优的基础。确定多边形每条边的最大跨度, 即除每条边两端的顶点外剩余多边形顶点到该边的距离, 从这些距离中筛选出最大值, 即为边的最大跨度, 如图 3 所示。从每条边筛选出来的最大跨度中, 再度筛选出最小值, 即为整个多边形区域的最小跨度; 筛选过后, 区域最小跨度为线段 BE, 边 CD 为最小跨度对应的边, 顶点 B 为最小跨度对应的顶点, 如图 4 所示。需要注意的是, 若区域跨度计算有误, 有可能导致部分区域不会被载荷覆盖, 或者出现航线冗余, 使飞行路径达不到最优。

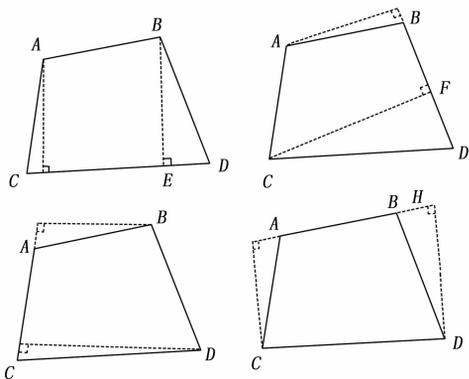


图 3 边的最大跨度示意图

3.2 块区分割线的生成

块区分割线的生成的目的在于将扫描区域利用分割线划分为若干宽度为载荷幅宽的块区, 便于无人机载荷的探测范围全面覆盖整个目标区域。难点在于, 由于目标区域形状的不确定性, 块区分割线的直线方程难以确

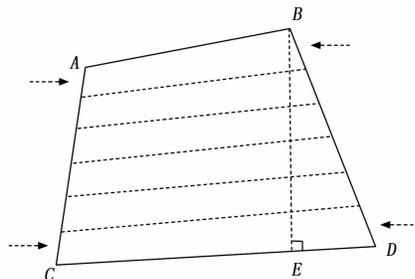


图 4 区域最小跨度示意图

定。另外, 相邻分割线间的间距必须保证与载荷作用范围相等, 目的在于飞机在执行扫描任务时, 需保证整个扫描区域被雷达的照射范围覆盖到。为了解决这些难题, 给出如下解决思路: 首先, 获得最小跨度对应的边 (如图 4 线段 CD 所示) 的两个端点 (点 C、D), 将点 C、D 按指向其相邻分割线的方向进行投影 (如图 5 所示)。获得投影点后计算两点连线所在的直线方程, 因此得到分割线直线方程。

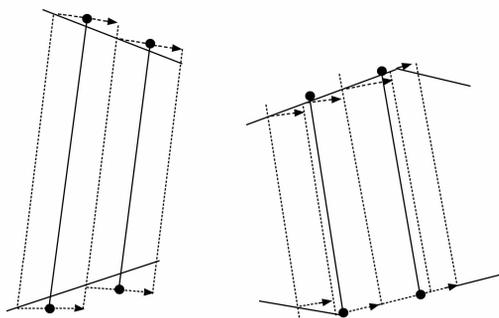


图 5 点投影示意图

3.3 块区进出点分配

块区进出点分配的目的在于获得相邻块区间过渡轨迹的起点和终点, 且保证无人机载荷探测范围对目标区域无任何遗漏。主要方法为, 计算出每条分割线与多边形的边的交点, 将每条分割线与边的交点在下一条分割线上进行投影获得若干投影点, 筛选出距离最远的两个端点 (如图 6 中的 A、B 点所示)。考虑到 EO 存在扫描盲区, 需对该两个端点进行再度分配 (分配后的点如图 6 中的 A'、B' 点所示), 以避免扫描盲区导致的漏扫情况发生。块区进出点重分配如图 6 所示。

另外, 还需考虑到的一种极端情况 (如图 7 所示), 即由于多边形顶点 N_1, N_2 的存在, 如果直接根据上述方法进行局部块区进出点分配, 分配结果会落在当前块区内部, 这样会造成部分区域无法被扩充后的矩形覆盖掉, 从而导致无人机在执行航线时载荷作用范围无法完全覆盖该区域。针对该情况, 需做进一步的特殊处理, 具体解决方案如下:

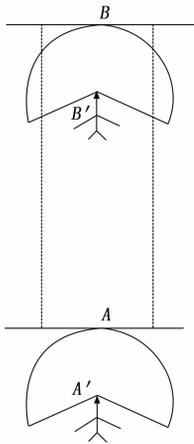


图 6 块区进出点分配示意图

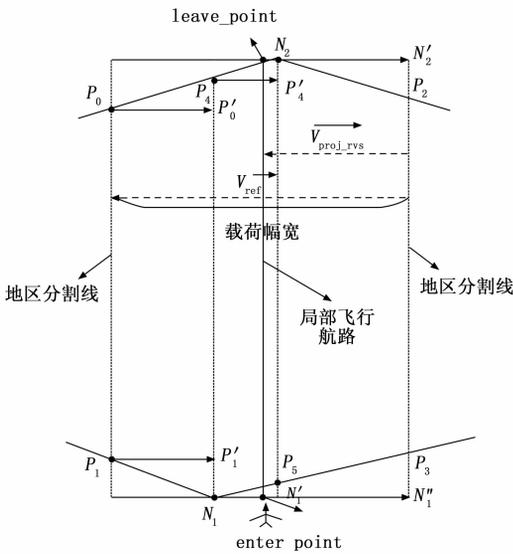


图 7 局部块区极端情况

首先，需在相邻块区分割线间作过多边形顶点 (N_1, N_2) 与分割线平行的直线段 $\overline{N_1P_4}$ 和 $\overline{N_2P_5}$ ，然后利用分割线 $\overline{P_0P_1}$ 的两个端点 P_0 和 P_1 向直线段 $\overline{N_1P_4}$ 上投影并得到投影点 P'_0 和 P'_1 。由于 P'_0 和 P'_1 都在线段 $\overline{N_1P_4}$ 上，选择 N_1 和 P_4 向直线段 $\overline{N_2P_5}$ 投影并获得投影点 N'_1 和 P'_4 。同样地，鉴于 N'_1 在线段 $\overline{N_2P_5}$ 外、 P'_4 在线段 $\overline{N_2P_5}$ 上，选择 N'_1 和 N_2 再向块区分割线 $\overline{P_2P_3}$ 投影并获得投影点 N''_1 和 N'_2 ，至此，投影点求解完毕。紧接着，利用反向投影向量 \vec{V}_{proj_rvs} 将最终获得的投影点 N''_1 和 N'_2 投影到当前块区的中央线段上，便得到当前块区的进出点 `enter_point` 和 `leave_point`。其中，反向投影向量 $\vec{V}_{proj_rvs} = \vec{V}_{ref}/2$ ，参考向量 \vec{V}_{ref} 可通过最小跨度对应的点和边计算获得，且该向量模长为载荷作用范围。利用该方法，可保证飞机在执行航线时 SAR 雷达的作用范围能够全面覆盖目标区域，不会存

在任何死角。

另外，考虑到载荷信息，需对初始分配的进出点进行重新分配，但经过重分配的块区出点有可能无法与下个块区的进点生成标准的半圆弧过渡轨迹。因此，同时考虑到雷达载荷和半圆弧过渡轨迹产生的约束条件，需要对块区进出点执行两次重分配操作。

3.4 块区间过渡轨迹的生成

块区过渡轨迹的生成目的在于将块区进出点连接成一条满足无人机动力学特性的弧线，考虑到航点输出个数的限制，块区间的过渡轨迹为一半圆弧（如图 8 所示）。首先，分配的当前块区进出点分别为 A 和 A' ，下一个块区的进出点分别为 B' 和 B'' 。其次，将 A' 延伸至 B ， B 与 B' 之间可以形成标准半圆弧。利用区域跨度对应的顶点和边构造出一个参考向量 \vec{V}_{ref} ，该向量与向量 $\overline{BB'}$ 平行，因此满足关系式： $\vec{V}_{ref} = \lambda \overline{BB'}$ ，其中 $|\overline{BB'}| = \omega$ ， ω 表示载荷幅宽。确定向量 $\overline{BB'}$ ，计算出点 B 坐标。

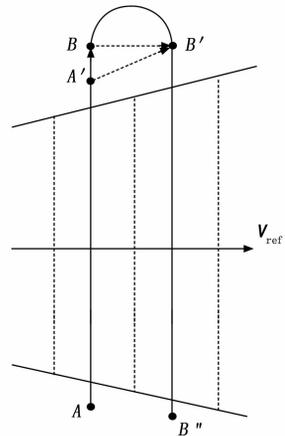


图 8 块区过渡轨迹示意图

以上区域探测航路规划算法针对任意形状的凸多边形，可规划出航路最短、探测范围最广的航路，且规划时间保持在毫秒级别，具备实时性强的特点，因此可实现对任意特定目标区域的有效探测。

4 实验结果与分析

为验证本文提出的算法的有效性，对所提出的区域探测规划算法进行仿真验证。仿真实验分为 3 部分，分别是 EO 为主载荷下的区域探测规划算法仿真、不规则多边形区域探测规划算法仿真以及载荷探测范围仿真验证等。该算法采用 C++ 语言编写，仿真平台为无人机地面站软件。

4.1 EO 为主载荷的区域探测航路规划算法仿真

无人机在 EO 为主载荷的情况下对目标区域探测的仿真如图 9 所示，其中 1 号航点是为了确保无人机能够

以压线的形式切入 2 号航点 (EO 扫描指令点) 的一个过渡航点, 无人机在进入 2 号航点时会接收到扫描指令, 用于调整载荷位置, 以便对区域内的目标进行有效探测。接下来, 无人机每在进入有效扫描阶段 (即执行直线段航线) 时, 都会在指定航点 (如图 1 中的 2、4、6、8 等航点) 处发送 EO 扫描指令, 以对区域内的目标进行侦查。另外需要注意的是, 考虑到 EO 扫描模式下无人机的正前方存在一定距离的扫描盲区, 无人机需在进入目标区域之前的扫描盲区处提前发送载荷调整指令, 以避免因扫描盲区导致部分区域漏扫的情况。在最后一个航点 (即 17 号点) 处, 由于 EO 前方扫描盲区的存在, 无人机此时已完成对其前方区域的侦查, 因此无人机可在该航点处驶离目标区域。

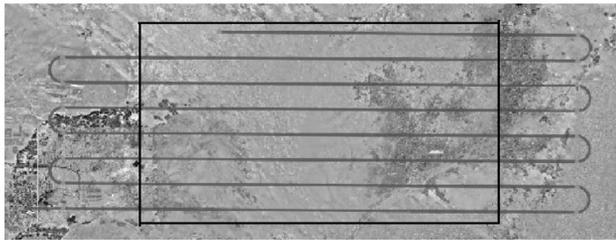


图 9 区域探测航路

4.2 不规则多边形区域探测航路规划算法仿真

不规则多边形区域探测航路如图 10 所示。从仿真结果来看, 由于 EO 的扫描范围位于飞机正前方, 因此为了保证其能够精准覆盖目标区域, 飞机必须位于目标区域上方执行“S”型航线。另外, 考虑到目标区域形状为不规则的五边形, 可以看出本文所提出的区域覆盖算法充分契合了目标区域的几何特性, 这一点从航线整体轮廓近似呈现出五边形可以看出, 说明飞机在载荷性

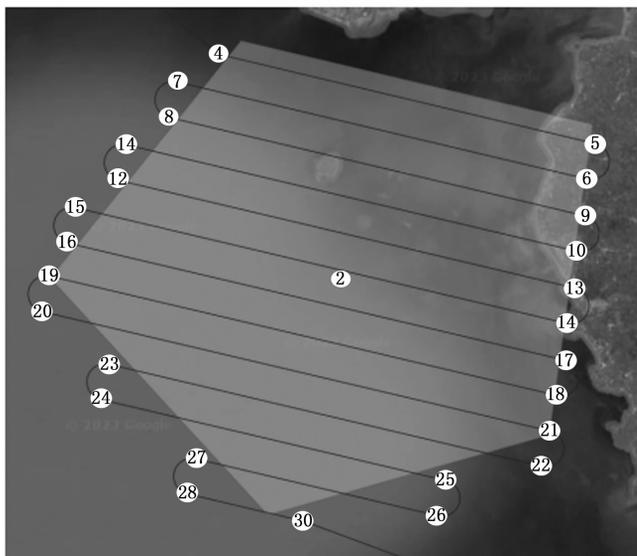


图 10 不规则多边形区域探测航路示意图

能约束下, 其航程未出现任何冗余, 达到了航程最短的目的, 且载荷的搜索范围完全覆盖了目标区域, 实现了对目标区域的全覆盖探测。

4.3 载荷探测范围验证

载荷探测范围如图 11、12 所示, 展示的是飞机在 EO 为主载荷下对多个目标区域进行侦察的过程; 图 12 展示的是 EO 的探测范围。从仿真结果来看, 载荷 EO 对所有目标区域成功实现了全覆盖, 如果在任务执行过程中载荷能够正常工作, 那么其作用范围便可全面探测整个目标侦察区域, 从而完成对目标区域信息的搜集。

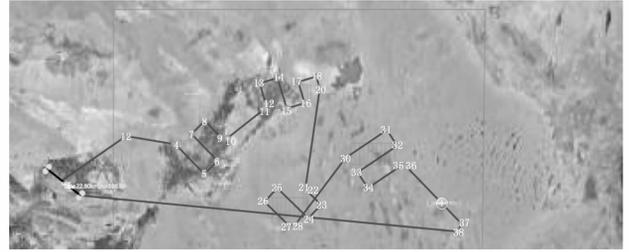


图 11 载荷作用范围覆盖示意图 1 (灰色矩形框为目标侦察区域)

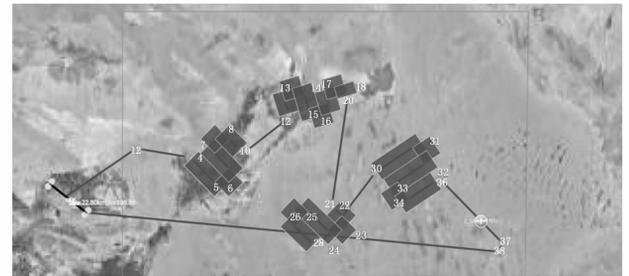


图 12 载荷作用范围覆盖示意图 2 (深色矩形部分为载荷覆盖范围)

4.4 对比仿真实验

经过所提出的区域探测航路规划算法优化前后的航路如图 13 所示, 其中图 13 (a) 为优化前, 图 13 (b) 为优化后。优化前航路算法的大致思路是: 对原三角区域进行几何重构, 即利用一个最大限度贴合其初始区域几何形状的矩形框将其覆盖, 得到一个新的矩形区域, 利用矩形区域规则的几何特性, 便可轻易计算出覆盖目标区域的任务航路。虽然得到的航路满足了对目标区域全覆盖的要求, 但由此产生了冗余航路 (如航点 8-9-10-11), 对比图 13 (b) 优化后航路的同等航段, 优化前的航程明显更长, 而经过所提出的区域探测算法优化后, 冗余航路得到了极大的缩短, 并且在保证飞机所携带的载荷完全覆盖目标区域的同时, 任务航路最短。

以上所有仿真实验中, 无人机航路规划时间均保持在 500 ms 以内, 实现了区域探测航路的快速规划, 有

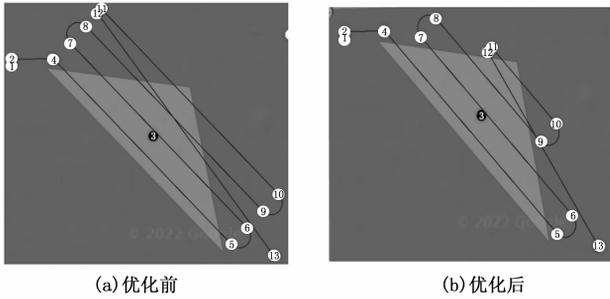


图 13 优化前后区域覆盖航路示意图

利于无人机对航路的执行,提高了区域探测任务的执行效率。

5 结束语

针对载荷性能约束下的无人机区域探测航路规划问题,本文采用纯几何方法,设计了一种区域探测航路的生成算法,其中包括区域最小跨度的确定、块区分割线的生成、块区进出点分配、过渡圆弧轨迹生成等。该算法在满足载荷性能约束、飞控性能约束以及任务场景限制的情况下,可规划出一条航程最短、区域探测范围最大的航路。该算法运算效率高、实时性强,可适用于复杂的战场环境,有助于高效完成侦察任务。

参考文献:

[1] CABREIRA T M, BRISOLARA L B, FERREIRA P R. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles [J]. *Drones*, 2019, 3 (1): 1-4.

[2] DAI, RUI, FOTEDAR, et al. Quality-aware UAV coverage and path planning in geometrically complex environments [J]. *Ad Hoc Networks*, 2018: 95-105.

[3] LI X, YAO H, WANG J, et al. A near-optimal UAV-aided radio coverage strategy for dense urban areas [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68 (9): 9098-9109.

[4] HUANG S, TEO R S H, LEONG W W L, et al. Coverage control of multi unmanned aerial vehicles: a short review [J]. *Unmanned Systems*, 2018, 6 (2): 1-14.

[5] PAULL L, THIBAUT C, NAGATY A, et al. Sensor-driven area coverage for an autonomous fixed-wing unmanned aerial vehicle [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014, 44 (9): 1605-1618.

[6] 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.

[7] 王自亮, 罗德林, 吴顺祥, 等. 凹多边形区域覆盖无人机航迹规划方法 [J]. *航空兵器*, 2019, 26 (1): 95-100.

[8] 王红星, 马学娇, 张长森. 一种凹多边形区域的无人机覆

盖路径规划算法 [J]. *航空兵器*, 2021, 28 (6): 46-52.

[9] 陈海, 王新民, 焦裕松, 等. 一种凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划算法 [J]. *航空学报*, 2010 (9): 1802-1808.

[10] BALAMPANIS F, MAZA I, OLLERO A. Coastal areas division and coverage with multiple UAVs for remote sensing [J]. *Sensors*, 2017, 17 (4): 808.

[11] MUÑOZ J, LÓPEZ B, QUEVEDO F, et al. Multi UAV coverage path planning in urban environments [J]. *Sensors*, 2021, 21 (21): 7365.

[12] HONG Y, JUNG S, KIM S, et al. Autonomous mission of multi-UAV for optimal area coverage [J]. *Sensors*, 2021, 21 (7): 2482.

[13] ARAUJO J F, SUJIT P B, SOUSA J B. Multiple UAV area decomposition and coverage [C] //2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA). IEEE, 2013: 30-37.

[14] AVELLAR G S C, PEREIRA G A S, PIMENTA L C A, et al. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time [J]. *Sensors*, 2015, 15 (11): 27783-27803.

[15] KHUWAJA A A. Optimum deployment of multiple UAVs for coverage area maximization in the presence of co-channel interference [J]. *IEEE Access*, 2019 (99): 85203-85212.

[16] PEHLIVANOGLU Y V, PEHLIVANOGLU P. An enhanced genetic algorithm for path planning of autonomous UAV in target coverage problems [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 21: 112-129.

[17] MOU Z, ZHANG Y, GAO F, et al. Deep reinforcement learning based three-dimensional area coverage with UAV swarm [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39 (10): 3160-3176.

[18] THEILE M, BAYERLEIN H, NAI R, et al. UAV coverage path planning under varying power constraints using deep reinforcement learning [C] //2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2020: 1444-1449.

[19] 肖友刚, 满香娜, 伍国华, 等. 考虑地形起伏的机载 SAR 测绘航线规划方法 [J]. *航空学报*, 2023, 44 (17): 218-234.

[20] BORDONI F, KRIEGER G, YOUNIS M. Multifrequency subpulse SAR: exploiting chirp bandwidth for an increased coverage [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 16 (1): 40-44.

[21] DONG J, SHEN Q, JIANG L, et al. An analysis of spatiotemporal baseline and effective spatial coverage for lunar-based SAR repeat-track interferometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12 (9): 3458-3469.