

doi: 10.7690/bgzdh.2018.04.002

基于防御雷达监控的多无人机协同侦察优化模型

孙 魏¹, 伍度志²

(1. 陆军勤务学院基础部, 重庆 401331; 2. 重庆工商大学融智学院 重庆 401320)

摘要: 针对多无人机协同侦察路径优化问题, 构建一种分步求解有防御雷达监控的多无人机协同侦察优化模型。通过聚类分析的方法对待侦察目标点进行目标群的划分, 运用 TSP 算法求出目标群内各目标点之间的最优侦察路径并对无人机进行任务分配。根据相关约束条件, 建立以无人机在敌方雷达监控范围内的滞留时间最短为目标的 MMTSP 优化模型。运用蚁群算法对所建模型进行求解, 并进行实例分析。分析结果表明: 该模型和方法具有可行性和有效性, 可为多无人机协同侦察提供参考。

关键词: 雷达监控; 多无人机; 协同侦察; 聚类分析; 蚁群算法; MMTSP

中图分类号: TP312 **文献标志码:** A

Model Optimization of Multi-UAV Cooperative Reconnaissance with Defense Radar Monitoring

Sun Wei¹, Wu Duzhi²

(1. Department of Basic, Army Logistic University of PLA, Chongqing 401331, China;
2. Rongzhi College of Chongqing Technology & Business University, Chongqing 401320, China)

Abstract: A decomposition solving model for multi-UAV cooperative reconnaissance with defense radar monitoring is built to realize the path optimization of multi-UAV cooperative reconnaissance. Firstly, the target of investigation is divided by clustering analysis, secondly, the TSP algorithm is used to find the optimal detection path between each target point in the target group and assign the task to the UAV. Then, according to related constraint conditions, the MMTSP optimal model which goal is that the least sum of time about UAV trapped in enemy radar reconnaissance area is built. Finally, by solution of the model through ant colony algorithm and the example analysis is made. The illustration results show that the model and method is feasible and effective, and it provides reference for multi-UAV cooperative reconnaissance.

Keywords: radar monitoring; multi-UAV; cooperative reconnaissance; clustering analysis; ant colony algorithm; MMTSP

0 引言

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 具有使用灵活、载荷配置多样化、训练维修成本低、经济实用、武器平台性能不受人类生理条件限制以及生存概率高等优点。如今, 无人机已被各国列装于作战部队, 其在目标侦察^[1-2]、中继通信^[3]、火力攻击^[4-5]以及战场毁伤评估^[6]等军事领域都得到了成功运用。然而, 面对日益复杂的现代战场环境和多样化的需求, 单架无人机的应用还是具有局限性; 因此, 在未来的战场环境下, 无人机更多的将是以机群的方式进行协同作战。目前也有一些国内外和军内外的学者针对无人机侦察路径规划问题进行了相关研究^[7-11], 但是大多数过于抽象化。笔者针对多无人机协同侦察问题, 具体探究了在待侦察目标部署有防御监控雷达的情形下, 如何为无人机进行路径规划和拟制调度策略, 以保证无人机在敌方雷达监控

范围内滞留时间最短的问题。

1 问题描述

无人机既能自主飞行, 又可独立作战。作为现代战争中的一种新型作战力量, 其出色的表现已在中东冲突、海湾战争、波黑战争、科索沃战争、车臣战争、阿富汗战争中得到了证明。一般而言, 无人机作战部队会配属多个无人机基地, 而每个基地会部署一定数量的各型号无人机。假设用于目标侦察和目标指示的无人机, 其巡航飞行速度为 200 km/h, 最长巡航时间为 10 h, 巡航飞行高度为 1 500 m。

现在根据作战前任务侦察需要, 要对敌方多处设施进行侦察, 但待侦察的每个目标均配属有防御监控雷达, 且每个雷达对无人机的最远有效监控距离为 70 km。一旦有不明飞行物进入敌方某一雷达探测范围内, 各待侦察目标所配属的雷达就会开机对空警戒并进行搜索, 同时还会采取相应对策进行

收稿日期: 2017-11-27; 修回日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61372194); 重庆市前沿与应用基础研究计划项 (CSTC2014jcyjA00002)

作者简介: 孙 魏 (1994—), 男, 湖南人, 硕士, 从事系统建模和信息融合研究。

自我防卫。所以我方侦察无人机滞留敌方防御雷达监控范围内的时间越长，其被摧毁的可能性就越大；因此，无人机如何完成对所有目标的侦察任务并寻找相应的最佳路径和拟定调度策略，以保证无人机在敌方雷达监控范围的滞留时间总和最小与总的飞行距离最短就显得尤为重要。

2 多无人机协同侦察优化模型

多无人机协同侦察问题是要在满足各项技术指标的前提下，按照一定的原则将任务集合分解为一系列可以由无人机执行的任务，进而为每架无人机分配相应的任务，同时使无人机以最小的代价得到最大化的任务效能。笔者主要考虑无人机的总飞行时间以及无人机在完成返回原基地的前提下，滞留于敌方雷达监控范围内的时间最短。

2.1 模型假设与符号说明

2.1.1 模型假设

1) 不考虑无人机在起飞和降落阶段的时间，忽略无人机在飞行过程中爬升、俯冲等机动动作的影响；2) 不考虑天气等突发状况因素对无人机和雷达性能的影响；3) 无人机经过目标点上空，或目标点在无人机侦察半径范围内即可实现对目标的侦察；4) 在敌方雷达 70 km 的探测半径范围内，对无人机的探测搜索效果相同；5) 无人机在执行任务的过程中没有损失，不会因故障、碰撞以及被导弹击中而损毁。

2.1.2 符号说明

p 表示第 p 个无人机基地， $1 \leq p \leq P$, P 为无人机基地数量； q 为按照基地顺序对无人机的编号， $1 \leq q \leq Q$, Q 为无人机的数量； k 表示第 k 个目标群， K 为目标群数目； i 和 j 分别表示第 i 个和第 j 个目标， N 为目标总数量； N_p 表示基地 P 的无人机数量； x_{ij} 表示无人机是否从 i 飞到 j ，且 x_{ij} 为 0,1 变量； t_{ij} 表示无人机从 i 飞到 j 的时间， d_{ij} 为从 i 飞到 j 的距离(欧氏距离)； N^k 表示第 k 个目标群所包含的目标点数目； N_s^k 表示第 k 个目标群 TSP 连线的起点和终点所构成的集合， $N_s^k = \{N_1^k(\text{起点}), N_2^k(\text{终点})\}$ ； R 为敌方雷达侦察半径； v 表示无人机的巡航速度； T 为无人机最长巡航时间。

2.1.3 模型构建

第 1 步，先通过聚类分析的方法，将各目标点

根据距离远近分为合适的几个目标群，同时为了保证各无人机飞行时间的均衡性，可以对聚类后各目标群中的目标点数量进行微调，然后对各目标群分别采用 TSP 方法求解出最优路径，这样可以保证各无人机在敌方雷达探测半径范围内的滞留时间之和 t_1 最短；第 2 步，根据第 1 步确定的各目标群中无人机侦察路线，可以反推离各目标群最近的无人机基地，然后对无人机进行任务分配；第 3 步，根据无人机的转弯半径以及相关约束条件对得到的航迹进行优化。

假设通过聚类分析后，各目标点被分成了 K 个目标群，每个目标群中所包含的目标点个数为 N^k 。经过分析可知：只有当无人机在目标群内的飞行时间最短，且在雷达探测半径外以距离 R 直接进入侦察第一个目标点和以半径 R 飞离目标群时，各无人机在敌方雷达监控范围内的滞留时间才会最短，故目标函数可表示为

$$\min t_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N^k} \sum_{j=1}^{N^k} x_{ij} t_{ij} + K \frac{2R}{v} \quad (1)$$

式中 x_{ij} 为决策变量，其表示为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (2)$$

式中：当 $i \neq j$ 时， $x_{ij}=1$ 表示无人机飞行路径经过目标点 i 和目标点 j ；当 $i = j$ 时， $x_{ij}=0$ 表示无人机不会重复侦察一个点。

综上所述，可构建第 1 步无人机在雷达监控范围内的滞留时间模型，具体如下：

$$\min t_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N^k} \sum_{j=1}^{N^k} x_{ij} t_{ij} + K \frac{2R}{v}; \quad (3)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v}; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N^k} x_{ij} = 1, \quad 1 \leq j \leq N^k. \quad (5)$$

上述模型中：式(3)表示无人机在敌方雷达探测半径内的滞留时间 t_1 最短；式(4)表示无人机从 i 飞到 j 的时间；式(5)表示每个目标点都能被侦察到。

经过第 1 步的计算，可以得到无人机在各目标群内的飞行路线，至此可以找出每条路线的起点和终点，然后根据每条路线的起点和终点到各基地的距离，可对无人机进行任务分配，拟定出最佳调度策略。

假设第 k 个目标群中飞行路线起点和终点构成的集合为 N_s^k , $N_s^k = \{N_1^k(\text{起点}), N_2^k(\text{终点})\}$, 决策变量 x_{pi}^q 表示无人机 q 是否从基地 p 到第 k 个目标群内的飞行起点或终点, 在第 2 步中, 目标函数无人机在雷达监控范围外的最短飞行时间 t_2 可表示为:

$$\min t_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P \sum_{i=1, i \in N_s^k}^n x_{pi}^q t_{pi}^q - K \frac{2R}{v}; \quad (6)$$

$$x_{pi}^q = \begin{cases} 1, & p \neq i \\ 0, & p = i \end{cases}; \quad (7)$$

$$t_{pi} = \frac{d_{pi}}{v}; \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1, i \in N_s^k}^2 x_{pi}^q \leq N_p; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{N^k} \sum_{j=1, j \in N_s^k}^{N^k} t_{ij}^q + \sum_{i=1, i \in N_s^k}^2 t_{pi}^q \leq T; \quad (10)$$

$$T_{\text{总}} = t_1 + t_2. \quad (11)$$

上述模型中: 式(6)无人机在雷达监控范围外的最短飞行时间 t_2 ; 式(7)表示无人机是否从基地 p 到目标点 i ; 式(8)表示无人机从基地到目标群飞行起点或终点的时间; 式(9)表示每个基地执行任务的无人机数目不超过该基地所拥有的无人机数目; 式(10)表示每架无人机的航行时间不能超过其最大航行时间; 式(11)表示无人机从基地出发到执行完侦察任务返回基地的总时间。

3 模型求解

3.1 目标群的划分

首先应用系统聚类分析法中的最长距离法^[12], 可以把各目标点大致划分为几个目标群。在最长距离法中, 其合并准则为类与类之间距离最长的 2 类进行合并。假设有 N 个目标点, d_{ij} 表示第 i 个目标点与第 j 个目标点之间的距离, 用 G_1, G_2, \dots, G_N 表示初始类, 用 D_{pq} 表示类 G_p 与类 G_q 之间的距离, 规定

$$\begin{cases} D_{pq} = \max \left\{ d_{ij} \right\}, & p \neq q \\ & \begin{matrix} i \in G_p \\ j \in G_q \end{matrix} \\ \text{当 } p = q \text{ 时, } D_{pq} = 0 \end{cases}.$$

最长距离法的聚类步骤为:

1) 计算 N 个目标点两两之间的距离 d_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, N$, 得对称矩阵 $\mathbf{D}(0) = (d_{ij})$, 初始时每

个目标点各成一类, 即 $\mathbf{D}_{pq} = d_{pq}$ 。

2) 选择 $\mathbf{D}(0)$ 中最大元素, 设为 d_{pq} , 于是将 G_p 、 G_q 并类, 记为 G_r 。

3) 计算新类 G_r 与其他类之间的距离:

$$D_{rk} = \max_{i \in G_r} \left\{ d_{ij} \right\} = \max \left\{ \max_{i \in G_r} \left\{ d_{ij} \right\}, \max_{j \in G_k} \left\{ d_{ij} \right\} \right\}.$$

将 $\mathbf{D}(0)$ 中的第 p 、 q 行及第 p 、 q 列上的元素按照 2) 合并成一个新类, 记为 G_r , 对应于新行、新列得到的矩阵记为 $\mathbf{D}(1)$ 。

4) 对 $\mathbf{D}(1)$ 重复 1)、2) 的做法, 得到 $\mathbf{D}(2)$ 。

5) 重复上述步骤, 直到所有元素归为一类。

经过聚类分析, 可把各目标点划分为几个目标群, 这样 MMTSP 问题就转化为了几个子 TSP 问题了, 降低了直接求解 MMTSP 问题的难度, 同时也减少了计算量和计算时间。

3.2 模型问题求解

笔者采用蚁群算法^[13-15]进行求解, 其基本流程如图 1 所示。

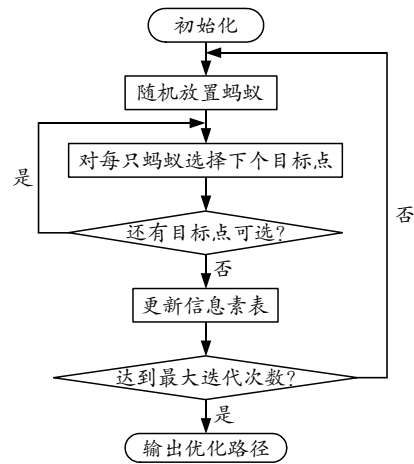


图 1 蚁群算法基本流程

具体算法设计步骤如下:

1) 将各目标点的位置坐标从数据文件读入程序, 并根据两点间距离公式, 求出目标点之间的距离矩阵。另外, 为保证启发函数的分母不为 0, 对距离矩阵对角线上的 0 元素进行修正, 根据数据的数量级判断, 将对角线上 0 元素修正为 10^{-3} 。

2) 设置最大迭代次数 $iter_max$, 并令初始值 $iter_max=0$, 初始化各参数, 同时为了加快程序的执行速度, 对于程序中设计的一些过程变量进行预分配其存储容量。

3) 设蚁群规模为 m , 并将 m 只蚂蚁随机放在 n

个顶点(目标点)上。

4) 对每只蚂蚁 $k(k=1, 2, \dots, m)$ 根据转移概率公式, 选择下一个要去的顶点(目标点) j , 并将顶点(目标点) j 置于禁忌表 $tabuk$ 中。

5) 判断禁忌表 $tabuk$ 是否满, 若为否, 则返回 4); 否则, 继续 5)。

6) 对信息素进行全局更新, 重复执行 3) 到 5), 直到达到最大迭代次数 $iter_max$ 或找到的解满足一定的精度为止。

7) 输出结果。

通过上述蚁群算法可以将目标群划分到相应基地, 同时也可以对 TSP 算法进行路径优化。

4 算例分析

根据相关作战任务需要, 我方无人机部队需完成对敌 10 个目标的侦察作战任务, 现需为无人机拟制调度策略和规划路径, 以保证我方无人机在敌方雷达监控范围的滞留时间最短。各目标的位置信息如表 1 所示, 无人机基地位置及配置数量如表 2 所示。

表 1 各目标的位置信息 km

点位名称	(X,Y)坐标	点位名称	(X,Y)坐标
A01	(265,715)	A06	(96,304)
A02	(225,605)	A07	(10,451)
A03	(168,538)	A08	(162,660)
A04	(210,455)	A09	(110,561)
A05	(120,400)	A10	(105,473)

表 2 无人机基地位置及配属数量

基地名称	(X,Y)坐标/km	无人机配属数量
P01	(368,319)	2
P02	(392,220)	2
P03	(392,275)	2
P04	(256,121)	2

4.1 目标群划分

利用上文提到的系统聚类分析法中最长距离法, 先对各个目标进行聚类, 得到的分配结果如图

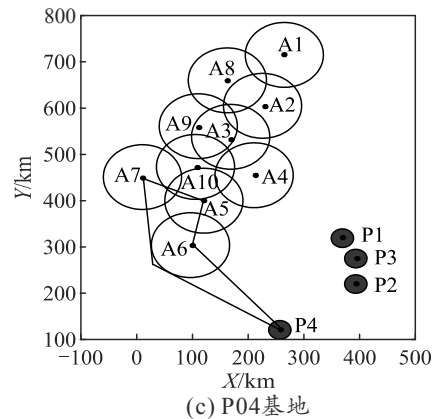
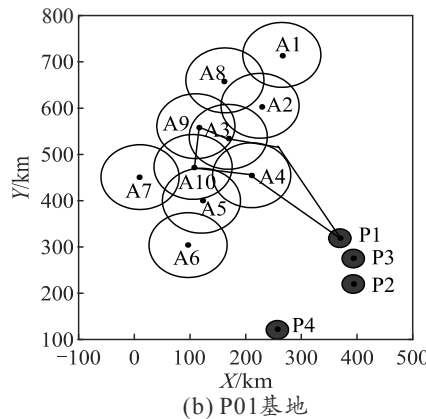
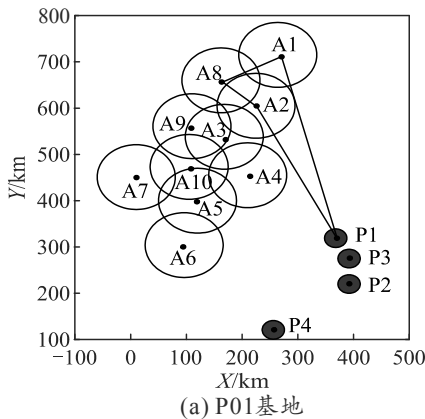


图 3 各无人机航迹

2 所示。

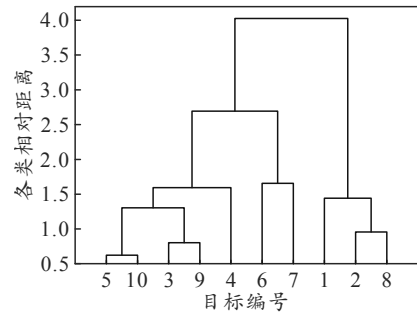


图 2 各目标点的聚类

根据目标的分布位置以及为保证各无人机执行任务时间的均衡性, 笔者对目标群中的目标数目进行微调, 将 5 号目标与 6 号、7 号划分为一个目标群。最终划分结果为: 3、4、9、10 号目标为目标群 1; 5、6、7 号目标为目标群 2; 1、2、8 号目标为目标群 3。

4.2 算例求解

利用上面所建立的模型及求解方法, 将 3 个目标群分配到相应的基地并进行路径规划, 可以得到分配结果: 目标点 A01、A02、A08 为一组, 无人机从基地 P01 出发; 目标点 A03、A04、A09、A10 为一组, 无人机从基地 P01 出发; 目标点 A06、A05、A07 为一组, 无人机从基地 P04 出发。通过计算可以得到: 各架无人机协同完成侦察任务的往返总时间之和为 13.741 h, 在敌方雷达监控范围内的滞留时间之和为 5.495 h。具体的各无人机最优调度方案以及航迹分别如表 3 和图 3 所示。

表 3 最优调度方案 h

基地名称	往返总的飞行时间	敌方雷达范围内滞留时间	侦察目标及次序(可反向)
P01	4.643	1.697	A01→A02→A08
P01	3.812	1.983	A03→A09→A10→A04
P04	5.286	1.815	A06→A05→A07

从图3中可以看出:通过系统聚类分析法中最长距离法对目标群的划分是比较合理的,基本上按上中下分为3个组,且各目标群内的目标都相对比较集中,最大可能地避免了无人机进行大范围的绕行;另外,各无人机也是尽可能地绕着敌方雷达监控半径的边界进行飞行,以尽量减小在敌方雷达监控范围内的滞留时间,这也充分说明了文中提出的模型与方法的有效性。

5 结束语

笔者以无人机在敌方雷达监控范围内的滞留时间最短为目标,构建了多基地、多无人机协同侦察路径优化模型,并通过聚类分析的方法对各目标点进行了目标群的划分,然后将问题转化为有返回的多出发点的多旅行商问题,降低了直接求解问题的难度,最后运用蚁群算法进行求解,取得了比较好的效果。当然,文中的建模没有考虑目标点的侦察时间窗,也忽略简化了其他相关约束,因此如何建立更加贴近实战化的多无人机协同侦察模型将是后续工作的重点研究方向。

参考文献:

- [1] TOUSSAINT G J, DE L P, PACK D J. localizing rf targets with cooperative unmanned aerial vehicles[M]. American Control Conference, New York, 2007: 5928-5933.
- [2] KIM T H, SUGIE T. Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy[J]. Automatica, 2007, 43(8): 1426-1431.
- [3] 邹湘伏, 何清华, 贺继林. 无人机发展现状及相关技术[J]. 飞行力学, 2009, 27(5): 1-5.
- [4] ALIGHANBARI M, HOW J P. Cooperative task assignment of unmanned aerial vehicles in adversarial environments [C]. American Control Conference, 2005: 4661-4666.
- [5] 郑晓辉. 无人机协同作战的目标分配算法研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(3): 16-18, 31.
- [6] 沈延航, 周洲. 无人机目标搜索/识别/攻击作战效能评估方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 608-613.
- [7] NAGARAJAN R, SOLAIRAJU A. Computing improved fuzzy optimal Hungarian assignment problems with fuzzy costs under robust ranking techniques[J]. Computing, 2010, 6(4): 6-13.
- [8] 戚泽明, 王强, 黄英杰. 多无人机侦察打击任务分配建模仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 142-146.
- [9] 姚敏, 王绪芝, 赵敏. 无人机群协同作战任务分配方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(5): 723-727.
- [10] 王芳, 李昆鹏. 基于人工势场法优化的蚁群无人机航路规划[J]. 西安航空学院学报, 2014, 32(5): 64-68.
- [11] 林娜, 李天啸. 基于双向 A*算法的城市无人机航路规划[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(4): 55-60.
- [12] 赵静, 但琦, 吴松林. 数学建模与数学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 233-243.
- [13] 李增, 顾文灿, 张宏亮, 等. 基于混合多种群自适应蚁群算法的无人机航路规划[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(5): 1751-1753, 1757.
- [14] 程琪, 荆涛, 亏志游. 利用三次样条改进蚁群算法的无人机航路规划[J]. 计算机与测量控制, 2016, 24(8): 272-274, 293.
- [15] 税薇, 葛艳, 韩玉. 基于混合蚁群算法的无人机航路规划[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(3): 574-576, 597.