

兵工学报

Acta Armamentarii

ISSN 1000-1093, CN 11-2176/TJ

《兵工学报》网络首发论文

题目: 基于动态联盟策略的无人机集群在线任务规划方法
作者: 王孟阳, 张栋, 唐硕, 许斌, 赵军民
收稿日期: 2022-04-11
网络首发日期: 2022-09-17
引用格式: 王孟阳, 张栋, 唐硕, 许斌, 赵军民. 基于动态联盟策略的无人机集群在线任务规划方法[J/OL]. 兵工学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20220916.1427.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于动态联盟策略的无人机集群在线任务规划方法

王孟阳^{1,2}, 张栋^{1,2}, 唐硕^{1,2}, 许斌³, 赵军民⁴

(1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2. 陕西省空天飞行器设计重点实验室, 陕西 西安 710072;

3. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072; 4. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710018)

摘要：针对复杂战场环境下无人集群任务规划所面临的高动态性、强不确定性以及多约束问题，提出一种基于动态联盟策略的分布式在线任务规划方法。描述无人机集群动态任务规划的典型场景，建立了异构无人机集群的多约束分布式任务规划数学模型；设计考虑集群动态拓扑约束的任务联盟组建策略，提出耦合 Dubins 航迹规划的改进蚁群算法，实现了多约束强不确定动态任务规划问题的在线求解；构建异构无人机集群察打评一体的任务仿真场景，通过数字仿真以及虚实结合的半实物仿真技术验证所提出的策略和算法的有效性。研究结果表明：该方法在动态任务规划过程中能够在损失较少任务完成时间的前提下可获得较优的系统效能，对于后续研究工作进一步走向工程化应用具有一定意义。

关键词：无人机；集群系统；任务联盟；任务规划；在线算法

中图分类号：V249

文献标志码：A

文章编号：1000-1093(202x)xx-xxxx-xx

DOI:10.12382/bgxb.2022.0247

UAV Swarm Cooperative Mission Planning Method Based on Dynamic Allocation Strategy

WANG Mengyang^{1,2}, ZHANG Dong^{1,2}, TANG Shuo^{1,2}, XU Bin³, ZHAO Junmin⁴

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Key laboratory of Aerospace Flight Vehicle Technology, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

3. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

4. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract: A distributed online task planning method based on a dynamic alliance strategy is proposed for the complex problem of high dynamics, strong uncertainty, and multiple constraints of unmanned system mission planning in a complex battlefield environment. Firstly, the typical scenarios of UAV swarm dynamic mission planning are described, and the mathematical model of heterogeneous UAV swarm multi-constraint distributed mission planning is established; Secondly, a task alliance formation strategy considering the dynamic topology constraints of UAV swarm is designed, and an improved ant colony algorithm coupled with Dubins flight path planning is proposed to realize the online solution of dynamic task planning with multiple constraints and strong uncertainties; Finally, a typical task simulation scenario of heterogeneous UAV swarm was constructed, and the effectiveness of the strategy and algorithm was verified by digital simulation and virtual-reality semi-physical simulation. The results show that the method proposed in this paper can achieve better system performance with less loss of task completion time in the dynamic task planning process, which is of some significance for further research work towards engineering applications.

Keywords: unmanned aerial vehicle; swarm system; mission allocation; mission planning; dynamic algorithm

1 引言

随着武器装备技术的发展以及作战样式的改变，作战逐渐向着网络化、智能化、集群化的方向发展，基于分布式自组网通信架构的无人机(UAV)集群作

收稿日期：2022-04-11

基金项目：国家自然科学基金重点项目(61933010)；国家自然科学基金青年科学基金项目(61903301)

作者简介：王孟阳(1997—)，男，博士研究生。E-mail: wangmengyang@mail.nwpu.edu.cn

通信作者：张栋(1986—)，男，副教授，博士。E-mail: zhangdong@nwpu.edu.cn

战技术是目前国内外学界研究热点^[1-2]。UAV 集群整合了无人技术优势和群体自组织特性，在原有基础上通过能力互补和协同行动实现无人作战分布式自主协同，具有自组织性、群体稳定性、高弹性和高效能等优势^[3-4]。由于战场环境动态变化，作战需求多样，作战任务复杂，集群飞行器异构、网络通信不稳定等因素，使得集群作战任务规划面临着巨大的挑战，因此，有必要研究更高效的集群协同方法，以最大限度地提高集群作战效能。

任务规划是 UAV 集群作战的关键技术，其研究重点是 UAV 集群、目标群和任务群之间的优化配置，实现集群任务分解、任务分配及航迹设计，是对集群有限资源的合理配置、分析和利用，进而实现多机高效协同地执行任务^[5]。通常将任务规划建模看作是一种组合优化问题，在特定的场景要求下对问题进行适当简化建立多约束模型，而后采用多组合优化问题模型进行求解，包括多旅行商问题模型^[6]、车辆路由问题模型^[7]、混合整数线性规划模型^[8]、网络流优化模型^[9]等。在任务规划求解方面，近年来诸如粒子群算法^[10]、差分进化算法^[11]、狼群算法^[12]、遗传算法^[13-14]、蚁群算法^[15]和萤火虫算法^[16]等启发算法因其简单有效的优势受到学者们的广泛青睐。其中蚁群算法自提出以来就被应用于各类复杂组合优化问题求解中，通过对自然界中真实蚁群觅食机制的模拟，建立人工蚁群，将问题解空间搜索中的启发信息表达为蚁群的信息素释放、挥发机制中，在搜索过程中引入正反馈机制，提高了算法的鲁棒性、灵活性和收敛速度^[17]。

分布式架构下集群依靠通信网络实现态势一致性，是任务规划的重要基础。针对任务规划过程中集群通信约束及通信故障等问题^[18]，文献[19]首次将多智能体系统中的“联盟”的概念引入到多 UAV 系统中，建立了组建最优联盟的数学模型，并采用粒子群算法进行求解，但是该方法需要预先知道任务环境的全部信息，算法存在实时性较低的问题；文献[20]提出了一种未知环境下的异构多 UAV 协同搜索打击中的联盟组建方法，但没有考虑到通信距离、通信时延等约束对任务联盟的影响；文献[21]研究了任务执行过程通信拓扑变化时，以距离为原则进行联盟划分的集群编队控制方法，但考虑的任务效能指标过少，不能最大化发挥集群优势；文献[22]提出了一种改进的合同网协议的目标分配方案解决 UAV 集群攻击任务的复杂性而导致分配不均匀的问题；文献[23]基于合同网算法构建多项式时间联盟构建方法，进行任务分配满足 UAV 联盟最快到达目标；文献[24]提出了一种异构多 UAV 协同任务联盟组建方法，用于解决存在通信距离、时间延迟等约束条件下的局

部任务分配问题，但在任务联盟组建过程中仅考虑任务资源没有以航迹效能作为 UAV 的投标信息，因此获得的任务效能与真实环境下的任务效能存在较大偏差。

由于战场环境的复杂多变，基于任务信息已知、环境变化可预测、UAV 集群和目标匹配关系固定的离线任务规划已不能适应作战要求。面对复杂多变、动态不确定的作战场景，UAV 集群需要在满足任务约束、执行能力约束、通信距离受限、实时网络通信结构不定、通信时延等多约束条件下实时调整任务序列和飞行航迹。

为解决以上问题，本文针对异构 UAV 集群执行“侦察-打击-评估”一体任务，提出一种**基于动态联盟组建策略**的集群在线任务规划方法。考虑 UAV 集群执行任务的能力约束、载荷约束、目标约束、任务约束、执行约束等多约束条件，构建了 UAV 集群的任务规划数学模型。针对复杂动态作战场景，**考虑到网络拓扑结构、通信距离和通信延迟**，设计了一种 UAV 集群动态联盟组建策略。任务联盟组建过程中针对任务序列与集群航迹的耦合问题，提出了能够最大化效能的任务规划求解算法。

2 场景问题描述

以 UAV 集群执行“侦察-打击-评估”一体任务为场景进行描述，具体描述为：场景区域内存在多架异构 UAV，UAV 可携带侦察、打击和评估任务载荷。初始状态下集群仅仅通过己方雷达**得知敌方目标的大致位置信息**，因此集群需要对区域内的目标进行协同侦察定位获得精确的目标信息，触发集群对目标打击和评估任务。在此过程中会**涉及到新的威胁、新的目标或者是新的任务出现**，如图 1 所示。当出现动态威胁时，要实现“**出现即避开**”的任务要求；当出现动态目标时，要实现“**出现即侦察**”，“**侦察即打击**”，“**打击即评估**”的任务要求，因此，UAV 集群执行任务过程中必须具有空间协同，时间协同和任务协同特性。

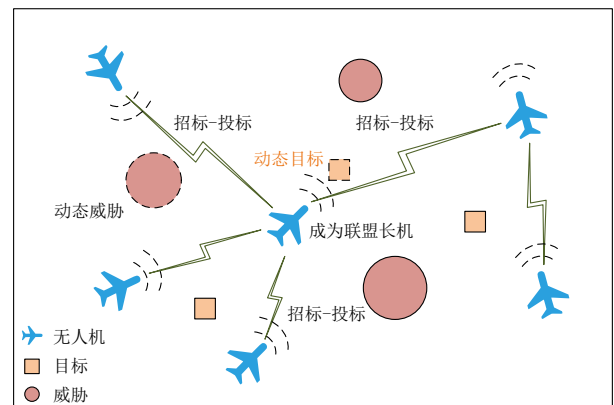


图 1 UAV 集群协同动态任务示意图

Fig.1 UAV swarm cooperative dynamic task diagram

UAV 为了实现上述动态过程，当携带探测设备的 UAV 发现新目标时，考虑到单架 UAV 不能满足对目标的任务资源约束，需要确定对该目标的最合理的 UAV 任务执行序列，使得任务效能最大化又能保持集群的稳定性和连通性，将该 UAV 序列称为任务联盟。由该 UAV 作为长机并向其通信范围内的 UAV 进行通信，通过招标、投标过程组建动态任务联盟，协调其余 UAV 进行协同任务规划，包括协同动态任务分配和动态航迹规划，为满足任务执行效能的最大化，联盟内 UAV 要求按照一定的时间间隔和进入角约束执行打击和评估任务。UAV 集群在动态战场环境内不断发现新目标并出发集群对目标的动态任务，直至完成对区域内所有目标的侦察、打击和评估。

集群任务执行过程中需要满足 UAV 单体飞行性能、目标状态，战场威胁、通信状态、战场环境、任务协同以及空间、时间约束等动态约束，因此战场环境的复杂性与动态性使得追求作战任务指标的全局最优通常是不现实的。当要求集群对动态战场环境做出敏捷性响应时，需要在任务指标的最优性和实时性之间找到一个平衡点，战场态势的变化要求 UAV 实时调整其任务计划，具备动态反馈机制和规划能力。针对该动态过程，本文的研究重点是建立动态任务规划多约束模型，结合协同任务执行过程中的特点，给出通信约束下的集群动态察打评一体任务的分配和航迹规划的耦合求解方法。

3 UAV 集群任务规划建模

3.1 UAV 及目标模型

根据上述的场景问题描述，建立 UAV 集群任务规划数学模型，其模型描述为如下五元组：

$$\{E, U, T, M, C\} \quad (1)$$

式中： E 为战场环境； $U = \{U_i | i = 1, 2, \dots, n_U\}$ 为 UAV 集合， n_U 为 UAV 数量； $T = \{T_j | j = 1, 2, \dots, n_T\}$ 为目标集合， n_T 为目标数量； $M = \{M_k | k = 1, 2, \dots, n_M\}$ 为待执行任务集合， n_M 为任务总数； C 为 UAV 执行任务的多约束集合。下面分别对各元素进行建模。

3.1.1 UAV 能力模型

UAV 安装有自动驾驶仪，为简化任务规划过程，假设 UAV 集群在执行任务过程中保持匀速定高飞行，集群规划路径可以通过高度分层实现相互避碰，集群航迹规划考虑二维平面内的航迹规划，UAV 运动的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \varphi \\ \dot{y} = v \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = W_\varphi (\varphi_c - \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

式中： (x, y) 为 UAV 位置； v 为 UAV 速度；

$\varphi \in (-\pi \text{ rad}, \pi \text{ rad}]$ 为 UAV 飞行航向角； W_φ 为自动驾驶仪增益； φ_c 为 UAV 控制指令。

UAV 执行任务需满足燃油约束，任务规划过程中燃油约束等效为 UAV 最大飞行航程，表示为

$$L_i \leq L_{i, \max}, i \in \{1, 2, \dots, n_U\} \quad (3)$$

式中： L_i 为 UAV U_i 飞行航程； $L_{i, \max}$ 为 U_i 最大飞行航程。

3.1.2 UAV 载荷模型

UAV 单体携带的载荷资源有限，UAV U_i 携带的载荷表示为一个三维向量：

$$C_i = \{C_i^r, C_i^s, C_i^e\}, i \in \{1, 2, \dots, n_U\} \quad (4)$$

式中： C_i^r 为侦察载荷，表示 U_i 探测目标半径； C_i^s 为打击载荷，表示 U_i 打击资源的数目； C_i^e 为评估载荷，表示 U_i 毁伤评估半径。UAV 执行任务过程中，侦察和评估载荷资源不随时间或使用次数增加而减少，打击载荷资源随打击目标次数消耗而减少。

3.1.3 目标模型

为了保证对目标的准确位置定位、打击及毁伤评估，目标 T_j 所需的任务载荷资源需求向量表示为

$$R_j = \{R_j^r, R_j^s, R_j^e\}, j \in \{1, 2, \dots, n_T\} \quad (5)$$

式中： $R_j^r = \{R_{j,1}^r, \dots, R_{j,n_r}^r, t_{j,1}^r, \dots, t_{j,n_r}^r\}$ 为目标 T_j 所需 n_r 次侦察任务资源， $\{R_{j,k}^r, t_{j,k}^r\}$ 分别表示第 k 次侦察任务起始角度及任务执行时间， $k \in \{1, 2, \dots, n_r\}$ ；当 UAV 侦察定位出目标 T_j ，确定 T_j 的 n_s 次打击资源约束 $R_j^s = \{R_{j,1}^s, \dots, R_{j,n_s}^s, t_{j,1}^s, \dots, t_{j,n_s}^s\}$ ， $\{R_{j,k}^s, t_{j,k}^s\}$ 表示第 k 次打击的角度和打击时间间隔 $k \in \{1, 2, \dots, n_s\}$ ； $R_j^e = \{R_{j,1}^e, \dots, R_{j,n_e}^e, t_{j,1}^e, \dots, t_{j,n_e}^e\}$ 为 T_j 所需 n_e 次评估任务资源， $\{R_{j,k}^e, t_{j,k}^e\}$ 分别表示第 k 次评估任务的起始角度及评估任务时间， $k \in \{1, 2, \dots, n_e\}$ 。

考虑到目标的资源需求，执行目标 T_j 对应任务的 UAV 联盟 $U_{\text{allocation}}$ 所需要的总资源表示为

$$\left(\sum_{\substack{U_{\text{allocation}} \subseteq U \\ U_i \in U_{\text{allocation}}}} C_i \right) \geq R_j, j \in \{1, 2, \dots, n_T\} \quad (6)$$

3.2 效能模型

在任务规划过程中，效能评价指标采用任务联盟内 UAV 集合规划完成的任务价值、完成任务的总路径长度及任务时间协同差值三类指标进行衡量。当准确定位出目标 T_j 时，针对 T_j 的待执行任务集合 M_j 组建任务联盟 $U_{\text{allocation}}$ ， M_j 与 T_j 所需的任务载荷资源 R_j 对应，表示为

$$\begin{cases} \mathbf{M}_j = \{\mathbf{M}_{j,1}, \mathbf{M}_{j,2}, \dots, \mathbf{M}_{j,n_m}\} \\ \mathbf{R}_{j,k} = \{R_{j,k}, f_{j,k}\} \\ \mathbf{R}_{j,k} = \{R_{j,k}^s, R_{j,k}^e\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_m 为目标 T_j 当前待执行的任务数目, $n_m = n_s + n_e$; $\mathbf{R}_{j,k}$ 为目标 T_j 执行的第 k 个任务所需资源, 包括打击和评估资源; $R_{j,k} \in \{R_{j,k}^s, R_{j,k}^e\}$ 为 $\mathbf{R}_{j,k}$ 对应的任务类型, $t_{j,k} \in \{t_{j,k}^s, t_{j,k}^e\}$ 为 $\mathbf{R}_{j,k}$ 执行时间; $f_{j,k}$ 为完成 $\mathbf{R}_{j,k}$ 对应的预期奖励价值^[24], 可表示为

$$f_{j,k} = F_{j,k} \times e^{-\beta_j \times t_{j,k}} \quad (8)$$

式中: $F_{j,k}$ 为 $\mathbf{R}_{j,k}$ 对应的初始任务价值, β_j 为任务价值衰减系数, $t_{j,k}$ 为 $\mathbf{R}_{j,k}$ 预计完成时间。对 T_j 联盟组建规划过程中覆盖任务奖励价值 $J_1(T_j)$ 的多少直接反映集群任务的完成程度, $J_1(T_j)$ 计算如下:

$$J_1(T_j) = \sum_{k=1}^{n_m} f_{j,k} \quad (9)$$

在约束条件下的 UAV 集群任务规划的优化评价指标之一就是使得 $J_1(T_j)$ 最大化, 即集群覆盖任务奖励最大化。

设 L_i 为 $\mathbf{U}_{\text{allocation}}$ 内 U_i 执行完成所有任务的预估航程值, 在实际应用和仿真计算指标中, 通常将航程效能指标表示为剩余航程最大化, 则集群的飞行航程效能指标 $J_2(T_j)$ 计算如下:

$$J_2(T_j) = \sum_{i=1}^{n_m} (L_{i,\max} - L_i) \quad (10)$$

任务规划目标是使得集群协同到达时间差最小化, 为了满足任务时间协同约束 t_j , 集群协同效能指标 $J_3(T_j)$ 计算如下:

$$J_3(T_j) = \sum_{k=1}^{n_m} |t_{k,p} - t_j| \quad (11)$$

式中: $t_{k,p}$ 为任务规划过程中 U_k 预估完成时间。任务联盟组建的目标是在满足 UAV 动态联盟和各类约束条件下使得效能指标最大化, 对目标 T_j 问题效能函数 $J(T_j)$ 为

$$J(T_j) = \omega_1 J_1(T_j) + \omega_2 J_2(T_j) - \omega_3 J_3(T_j) \quad (12)$$

式中: ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为 3 项任务指标的权重系数, 通过调整权重系数可以获得不同的任务执行效果。

3.3 多约束模型

对于 UAV 集群协同执行察打评一体动态任务, 建立多约束模型。

3.3.1 战场威胁模型

将战场环境中存在的威胁模型建立为空间中的

圆柱体模型, 仅考虑二维平面上的避障问题, 因此将威胁表示为如(13)式坐标向量:

$$\mathbf{P}_T = [x_T, y_T, r_T] \quad (13)$$

式中: (x_T, y_T) 是威胁平面的圆心; r_T 是威胁半径。规划过程中飞行航路必须在指定的飞行空间内, 不能进入威胁空间。

3.3.2 任务时序约束

如果不同的任务 \mathbf{M}_j 和 \mathbf{M}_k 之间存在绝对的先后顺序, 则称任务存在时序约束, 任务时序为一种偏序关系^[25]。如果 \mathbf{M}_k 必须在 \mathbf{M}_j 之前执行, 则称 \mathbf{M}_k 为 \mathbf{M}_j 的前序任务, \mathbf{M}_j 为 \mathbf{M}_k 的后继任务, 具体表达为

$$\begin{cases} \text{enforce}[\{\mathbf{M}_k, \mathbf{M}_j\}, <] \\ k, j = 1, 2, \dots, n_M \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\text{enforce}[\{\}, <]$ 表示绝对时序关系。

3.3.3 任务协同约束

任务执行过程中, 针对目标 T_j 的任务集合 \mathbf{R}_j 需要 UAV 联盟 $\mathbf{U}_{\text{allocation}}$ 协同完成, 用 $q_j \in \{0, 1\}$ 表示 \mathbf{R}_j 的执行变量。当 $\mathbf{U}_{\text{allocation}}$ 被分配执行完成任务集合 \mathbf{R}_j 时, $q_j = 1$, 否则 $q_j = 0$ 。

3.3.4 生成航迹约束

将 UAV 的航迹约束分为以下 3 个层面: 几何层面、任务层面和环境层面^[26]。

如图 2 所示为 3 架 UAV 对环境内两个目标执行侦察、打击和评估任务。对 T_1 依次由 U_1 执行侦察任务 $\{R\}$, U_2 和 U_3 执行双重打击任务 $\{S\}$, U_3 执行打击任务过程中, 避开环境中存在的威胁; 对目标 T_2 , 依次执行打击任务 $\{S\}$ 和评估任务 $\{E\}$ 。根据图 2 的几何表示, 几何层面的航迹约束条件清晰可见。设 $k_i(t)$ 为 U_i 在 t 时刻的轨迹曲率, $k_i(t)$ 应满足如(15)式约束:

$$k_i(t) \leq 1/r_{\min} \quad (15)$$

式中: r_{\min} 为 U_i 的最小转弯半径。

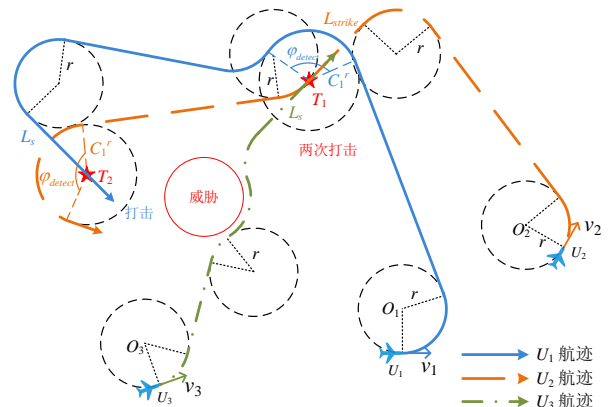


图 2 航迹约束的几何表示

Fig.2 Geometric representation of track constraints

任务层面为了保证对目标的准确定位与效果评估, T_j 的侦察和评估任务需满足执行时间约束 $t_{j,k}^r$ 、 $t_{j,k}^e$ 。以 U_1 对 T_1 执行侦察任务为例, 侦察段航迹为 Dubins 圆弧段航迹, 对应的初始和终端航向角分别为 φ_1 和 φ_2 , 则 U_1 的侦察时间 $t_{1,1}^r$ 约束为:

$$\begin{cases} \frac{|\varphi_2 - \varphi_1| \times C_1^r}{v} > t_{1,1}^r \\ \varphi_1 = R_{1,1}^r \end{cases} \quad (16)$$

如图 2 中 U_1 和 U_3 的打击段航迹所示, 为了实现目标协同全向打击, 生成航迹过程需满足目标 T_j 的打击任务约束 R_j^s 和 U_i 的打击载荷末制导距离 L_i^s 约束。

环境中存在未知威胁, U_i 的探测距离等于侦察半径 C_i^r , 二维平面上的威胁避障航迹应满足(17)式约束:

$$\sqrt{(x_i(t) - x_{j,T})^2 + (y_i(t) - y_{j,T})^2} \geq r_{j,T} \quad (17)$$

式中: $(x_i(t), y_i(t))$ 为 U_i 在 t 时刻位置; $(x_{j,T}, y_{j,T})$ 为威胁 j 圆心坐标, $r_{j,T}$ 为半径。

综上, 将异构 UAV 集群对新目标组建联盟的任务规划问题建模为多约束优化问题, 其效能函数为(12)式, 约束条件为(3)式~(6)式和(14)式~(17)式。

4 基于动态联盟组建策略的任务规划方法

由上述问题描述和建模可知, 当集群定位出目标时, 触发对目标的任务规划, 由于 UAV 一直处于机动状态, 通信范围有限, 集群内通信网络存在拓扑结构实时变化的情况。本节基于场景模型及约束, 设计了一种基于动态联盟组建策略的任务规划方法, 首先根据网络拓扑结构提出了动态联盟组建方法, 然后针对新目标的局部任务规划采用耦合 Dubins 航迹的分工机制蚁群算法进行任务规划求解。该方法能够有效求解动态网络拓扑结构、UAV 模型、目标模型、多约束模型、通信范围和通信时延约束下的任务规划问题。

4.1 网络拓扑结构

UAV 集群自组网采用 UAV 间双向通信的方式, 既能支持信息的传输与共享, 又能使成员得知其在任务中所处的地位^[27]。矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示 UAV 之间的通信关系, a_{ij} 表示 U_i 和 U_j 之间是否进行通信, $a_{ij} = 1$ 表示通信连接, $a_{ij} = 0$ 则通信断开, $a_{ij} = a_{ji}$, 信息可以在 UAV 之间双向传递。本文采用的自组网通信对应的结点拓扑关系是时变的, 如图 3 所示。

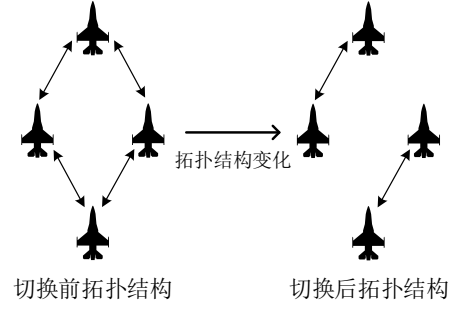


图 3 网络通信拓扑

Fig.3 Network communication topology

当集群内某架携带侦察载荷的 UAV 发现目标时, 触发针对此目标的动态任务规划。实际任务过程中 UAV 一直处于飞行状态, 考虑到 UAV 的通信距离 r_n 和通信时延约束 Δt_d , 信息交流只能发生在通信相互连通的 UAV 之间。对于任意一架 U_i , 能与其通信连接的其他 UAV 称为 U_i 的邻域 UAV, 表示为 $Ls(U_i)$, 图 4 为集群通信结构示意图。

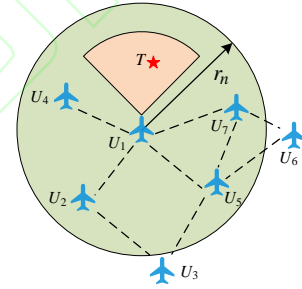


图 4 UAV 集群的通信示意图

Fig.4 Communication diagram of UAV swarm

在图 4 中共有 7 架 UAV, 绿色区域表示 U_1 的通信范围, 虚线表示 UAV 之间的网络连接, U_1 的邻域 UAV 为 $Ls(U_1) = \{U_2, U_4, U_5, U_7\}$, U_1 发现目标 T 并将其信息发送至 $Ls(U_1)$ 内 UAV, 由于通信时延的作用, U_1 及其邻域之间的通信均经过 Δt_d 后才能相互传达。

4.2 基于 Dubins 算法的航迹生成

Dubins 曲线能够将两个曲率有限的点按照一定方向连接起来。由于 Dubins 曲线长度容易计算, 因此本文使用 Dubins 曲线来生成飞行路径。

通常有 6 种 Dubins 曲线: 两条内切曲线、两条外切曲线和两条外切圆。设曲线起点位置和终点位置分别为 $P_s(x_s, y_s)$ 和 $P_f(x_f, y_f)$, 起点和终端速度分别为 v_s 和 v_f , 航向角分别为 φ_s 和 φ_f , 起始和终端圆半径分别为 r_s 和 r_f , Dubins 曲线的解的构造过程可用向量 L_s 和 L_f 表示为

$$L_s(x_s, y_s, \varphi_s, r_s) \rightarrow L_f(x_f, y_f, \varphi_f, r_f) \quad (18)$$

如果曲线路径上没有威胁，使用简单的 Dubins 曲线平滑地连接起始点和终端点。当检测到威胁时，且覆盖 UAV 原有飞行路径，则重新规划以避免威胁。路径的重规划可看作在原有起始点和终端点中间选择一个安全点 $P_1(x_1, y_1)$ 或 $P_2(x_2, y_2)$ ，如图 5 所示，虚线 γ 为原始路径，以曲线长度最短为原则选择两个安全点中离原始路径较近的点 P_1 作为中点，根据中点速度方向与安全圆相切确定中点航向角 ϕ_1 ，安全圆 D 半径为 $r_D = \kappa r_T$ ，其中 r_T 为威胁半径， κ 为安全系数， $\kappa > 1$ 。由此将路径重新规划问题看作是 Dubins 曲线的二段解。第 1 段是 $L_s(x_s, y_s, \phi_s, r_s) \rightarrow L_1(x_1, y_1, \phi_1, r_D)$ ，第 2 段是 $L_1(x_1, y_1, \phi_1, r_D) \rightarrow L_f(x_f, y_f, \phi_f, r_f)$ ，得到实线 γ_1 是基于 Dubins 曲线生成的避开环境中威胁的飞行路径。

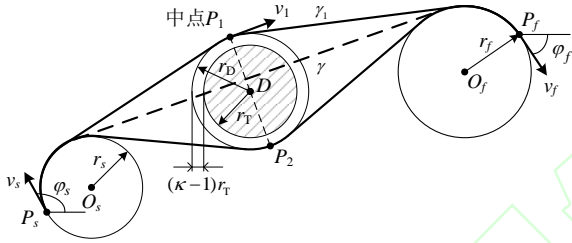


图 5 威胁规避路径示意图

Fig.5 Threat avoidance path diagram

为实现多机终端时间一致的协同航迹规划，文献[28]基于 Dubins 曲线航迹提出一种空间协同约束下的多机打击快速航迹规划方法，通过对曲线半径参数的优化实现多机航迹同步，以某一 UAV 参考航迹为基准，对其余 UAV 的 Dubins 曲线半径进行求解，得到满足终端时间一致性要求的多机航迹。本文采用文献[28]提出的方法实现多机协同航迹计算。

4.3 基于动态网络拓扑的任务联盟组建

考虑到 UAV 的探测距离和通信时延等约束，根据目标状态及任务要求，机间相对距离和通信半径的相对关系，UAV 携带资源载荷的差异，将动态任务联盟的组建分为 4 个步骤：招标发布、投标申请、联盟组建和航迹规划及执行，对应的状态转移规则和通信交流规则如图 6 所示。

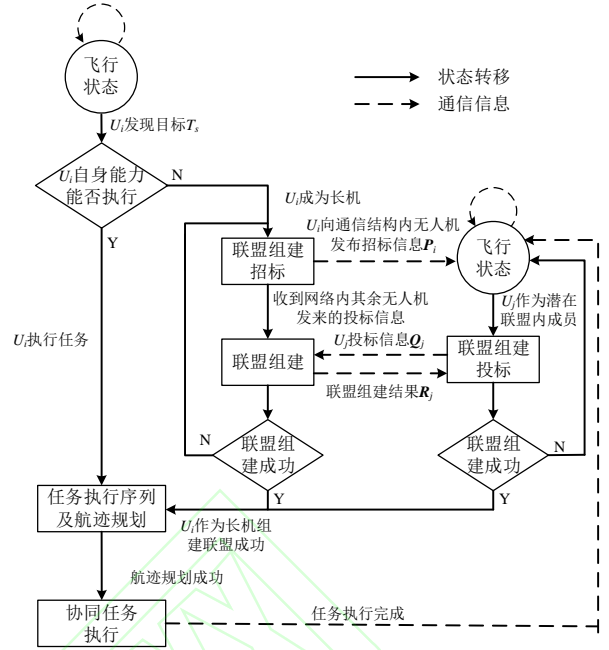


图 6 状态及通信转移规则

Fig.6 Status and communication transition rule

招标发布阶段，由发现目标的 UAV 作为联盟长机向其通信范围内的 UAV 发布招标信息；投标申请阶段，具有稳定通信和资源能力的 UAV 向长机发送投标信息；在联盟组建阶段，长机根据收到的投标信息进行任务分配确定联盟成员，并发送授权结果；航迹规划及执行阶段，联盟成员根据需求约束进行航迹重规划执行任务。

4.3.1 招标发布

每架 UAV 状态均为飞行状态，当 U_i 发现新目标 T_s 时， U_i 完成对目标的准确定位及评估，若 T_s 不需要执行协同任务，则由 U_i 对其执行任务；若对 T_s 需要执行多机协同任务，则 U_i 自动成为联盟长机，进入联盟组建招标发布状态，向其邻域内的 UAV 发布招标信息。联盟长机发送的招标信息用向量 P_i 表示：

$$P_i = \{U_i, N_s^t, T_s, M_s, t_0\} \quad (19)$$

式中： N_s^t 为目标序号； t_0 为联盟组建招标发布时刻。

为保证招标信息的一致性，招标过程中存在一种情况：同一通信局域网内的不同 UAV 同时发现多个目标，此时通信网络内存在多个招标信息。为避免系统冲突和资源浪费，需要对同一通信局域网内的招标信息达成一致，即若 U_i 发布招标信息的同时接收到来自 U_k 的招标信息，此刻 U_i 比较 P_i 和 P_k 中任务奖励信息大小：若 P_k 中奖励信息大于 P_i ，则 U_i 对 P_k 进行任务投标并将招标信息 P_i 储存待任务执行完毕后再行招标；反之继续执行对 P_i 的联盟组建过程，从而实现集群内信息一致性。

4.3.2 投标申请

UAV 之间存在通信范围 r_n 、通信时延 Δt_d 、联

盟组建计算时间 t_{TA} ，因此联盟组建不是瞬时完成的。在此阶段集群处于持续飞行状态，在联盟组建的过程中集群通信拓扑动态变化，可能会导致部分 UAV 超出距离无法接收到长机信息的情况。根据招标发布-投标申请-联盟组建过程中的三次信息交流，计算联盟组建过程耗时最大值 δ_{\max} 为

$$\delta_{\max} = 3 \cdot \Delta t_d + t_{TA} + \delta_t \quad (20)$$

式中： $3 \cdot \Delta t_d$ 表示三次通信信息传递过程； δ_t 为设置的通信耗时裕值。则目标 T_s 的联盟构建完成时刻 t_e^s 可表示为

$$t_e^s = t_0 + \delta_{\max} \quad (21)$$

$Ls(U_i)$ 内的其余 U_j 收到 U_i 的招标信息后，首先判断自身是否存在未完成的任务，若处于飞行状态则判断当前剩余任务能力 C_j 是否满足招标任务信息资源要求，若满足 U_j 成为竞标 UAV。 U_j 根据 UAV 运动学模型(2)式估计自身 $[t_0, t_e^s]$ 时刻内的位置，如果一直处于长机 U_i 的通信范围内则称 U_j 为潜在联盟 $U_{\text{potential}}$ 成员， U_j 将投标信息 Q_j 发送给联盟长机，等待长机的联盟组建结果信息。 Q_j 表示为

$$Q_j = \{U_j, N_j^t, v_j, \varphi_j, E_j, C_j, L_j, ETA_j\} \quad (22)$$

式中： U_j 为竞标 UAV 信息； v_j 为速度信息； φ_j 为航向角信息； $E_j(x_j, y_j, h_j)$ 为 t_e^s 时刻预估位置； C_j 为当前剩余任务能力； L_j 为当前剩余航程，包括 UAV 当前剩余航程和当前任务资源估计； ETA_j 为预估最快到达目标时间，表示任务执行代价。由于存在 UAV 通信时延和联盟组建计算时间，联盟潜在成员应以 t_e^s 为统一时刻计算预估最快到达目标时间 ETA_j 。 ETA_j 为无终端速度方向约束下的 Dubins 轨迹，即 $\psi_e = free \in [0^\circ, 360^\circ)$ ，计算如(23)式所示：

$$ETA_j = t_e^s + \min(L_s \rightarrow L_e) / v_j \quad (23)$$

为避免通信资源浪费， U_j 在一次投标过程中不再参与另一局域网内 UAV 的招标过程，直至其自身联盟组建失败或任务执行完成。

4.3.3 联盟组建

联盟长机收到所有潜在联盟成员的联盟投标信息后，综合所有成员的投标信息组建联盟，若投标信息满足任务 M_s 执行约束，则联盟组建成功，否则联盟组建失败，长机重新进行联盟组建招标提议。以最优执行任务为前提，长机在满足联盟成员数目的约束下，采用分工机制蚁群算法从联盟潜在成员集合 $U_{\text{potential}}$ 中选择任务预估完成时间较少的 UAV 组成任务联盟 $U_{\text{allocation}}$ ：

$$U_j = \arg \min_{U_i \subseteq U_{\text{potential}}} (ETA_j), \forall U_j \subseteq U_{\text{allocation}} \quad (24)$$

如果联盟组建成功长机也作为联盟成员进行任务分配，将任务分配结果 D_j 作为联盟结果反馈给联盟成员 U_j 。联盟结果信息包括联盟成员编号 N_U ，每个联盟成员执行任务的角度 α 及预估任务执行时间 λ_j ，作为航迹生成的约束进入航迹规划状态。联盟组建结果 D_j 表示为

$$D_j = \{N_U, T_s, M_{j,s}, \alpha_j, \lambda_j\} \quad (25)$$

式中： $M_{j,s}$ 为 U_j 对目标 T_s 的任务信息； α_j 为 U_j 的分配任务执行角度。

4.3.4 航迹规划及执行

联盟内的每个成员需要根据自身当前状态、联盟组建结果信息 D_j 、预估任务执行时间 λ_j 和目标任务信息 $M_{j,s}$ 和 α_j 重新规划自身航迹执行任务，以此达到集群协同涌现效果。航迹规划完成后，进入对目标 T_s 的协同任务执行状态。当任务执行完成后，相应地减少自身的任务资源，重新进入飞行状态等待新的任务联盟组建并执行分配任务。

4.4 分工机制蚁群算法

基于动态联盟组建策略，本文采用分工机制的蚁群算法^[29]和 Dubins 航迹生成耦合方法进行任务规划的求解。对 U_i 建立与其对应的人工蚂蚁子群 $A_i^c = \{A_{i,1}, A_{i,2}, \dots, A_{i,m}\}$ ， $i=1, 2, \dots, n_U$ ， m 为子群 A_i^c 包含的蚂蚁数量， $A_{i,j}$ 为第 i 个子群 A_i^c 中的第 j 个人工蚂蚁， $A^c = \{A_1^c, A_2^c, \dots, A_{n_U}^c\}$ 为人工蚂蚁子群集合，所有子群大小相同。将构成 UAV 集群的满足各种约束条件且来自不同蚂蚁子群的 n_U 个蚂蚁称为人工蚂蚁簇 $A_j^G = \{A_{1,j}, A_{2,j}, \dots, A_{n_U,j}\}$ ， $j=1, 2, \dots, m$ ，人工蚂蚁簇满足 $\bigcup_{j=1}^m A_j^G = A^c$ 。联盟长机在每次迭代构造联盟任务执行计划时，按照投标信息中个体能力大小选择一只人工蚂蚁 $A_{i,j}$ 进行状态转移确定后续任务，被选中的概率为

$$p_{i,j}^k(c) = \frac{C_{i,j}^k(c)}{\sum_{i=1}^{n_U} C_{i,j}^k(c)} \quad (26)$$

式中： $p_{i,j}^k(c)$ 为人工蚂蚁 $A_{i,j}$ 在第 c 次迭代过程中进行第 k 次状态转移时被选中的概率； $C_{i,j}^k(c)$ 为 $A_{i,j}$ 投标信息中当前剩余任务能力； $\sum_{i=1}^{n_U} C_{i,j}^k(c)$ 为人工蚂蚁簇 A_j^G 中所有投标蚂蚁剩余任务能力总和。 $C_{i,j}^k(c)$ 计算公式为

$$\begin{cases} C_{i,j}^k(c) = L_{i,j}^k(c) \times \max(\tau) \times \frac{N_{allowed_{i,j}}}{N_{task}} \times (N_{max}(U_i) - N_{cur_{i,j}}^k(c)) \\ L_{i,j}^k(c) = \frac{L_{max}(U_i) - L_{cur_{i,j}}^k(c)}{L_{max}(U_i)} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $L_{i,j}^k(c)$ 为 U_i 当前剩余航程权重系数; $L_{max}(U_i)$ 为 U_i 最大飞行距离; $L_{cur_{i,j}}^k(c)$ 为 U_i 当前已消耗的飞行距离; $\max(\tau)$ 为转移到下一目标点路径上信息素浓度; $N_{allowed_{i,j}}$ 为 $A_{i,j}$ 当前剩余任务能力数目, $allowed_{i,j}$ 为 $A_{i,j}$ 当前允许执行的任务; $N_{max}(U_i)$ 为 U_i 最大任务能力数目; $N_{cur_{i,j}}^k(c)$ 为 U_i 已执行的任务计划数目, $cur_{i,j}$ 为 $A_{i,j}$ 当前已执行的任务。 $\forall A_{i,j} \in A^c$, c 时刻 $A_{i,j}$ 从任务 M_u 到任务 M_v 按(28)式进行状态转移:

$$s = \begin{cases} \arg \max_{v \in allowed_{i,j}} \left\{ \left[\tau_{u,v}^\alpha(c) \right] \times \left[\eta_{u,v}^\beta(c) \right] \right\}, q \leq q_0 \\ \frac{\tau_{u,v}^\alpha(c) \eta_{u,v}^\beta(c)}{\sum_{k \in allowed_{i,j}} \tau_{u,k}^\alpha(c) \eta_{u,k}^\beta(c)}, q > q_0 \text{ \& } v \in allowed_{i,j} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $q_0 \in (0,1)$ 为使用先验知识和概率探索的分界线; $\tau_{u,v}(c)$ 为当前时刻 M_u 转移到 M_v 路径上的信息素量; $\eta_{u,v}(c) = 1/V_{u,v}^{(i,j)}(c)$ 为 $A_{i,j}$ 状态转移时的启发因子; α 和 β 分别为信息素和启发因子所对应的重要程度; $V_{u,v}^{(i,j)}(c)$ 为 $A_{i,j}$ 当前时刻从任务 M_u 转移到任务 M_v 的代价:

$$\begin{aligned} V_{u,v}^{(i,j)}(c) &= \omega_1 Cd_{u,v} + \omega_2 Ct_{u,v} \quad (29) \\ Cd_{u,v} &= \frac{L(R_{u,v}) - \min_{\substack{l,k=1,2,\dots,n_m \\ l \neq k}} (L(R_{l,k}))}{\max_{\substack{l,k=1,2,\dots,n_m \\ l \neq k}} (L(R_{l,k})) - \min_{\substack{l,k=1,2,\dots,n_m \\ l \neq k}} (L(R_{l,k}))} \quad (30) \\ Ct_{u,v} &= \begin{cases} 1, & M_v \text{ 无时间约束} \mid |t_v^{(i,j)}| \leq t_s^v \\ \frac{t_e^v - t_v^{(i,j)}}{t_e^v - t_s^v}, & \text{其他} \end{cases} \quad (31) \\ t_v^{(i,j)} &= t_u^{(i,j)} + \frac{L(R_{u,v})}{v_{i,j}} \end{aligned}$$

式中: $L(R_{u,v})$ 为 U_i 从任务 M_u 转移至 M_v 所需的航程; $t_v^{(i,j)}$ 为 M_v 的执行时刻, $t_u^{(i,j)}$ 为任务 M_u 的完成时刻; t_s^v 、 t_e^v 为执行任务 M_v 的最早时间约束和最晚时间约束; ω_1 、 ω_2 为状态转移权重参数; $v_{i,j}$ 为 U_i 飞行速度。当所有蚂蚁完成任务联盟组建, 按(32)式更新信息素:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(c+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(c) + \Delta \tau_{ij}(c, c+1) \\ \Delta \tau_{ij}(c, c+1) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(c, c+1) \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\rho \in [0,1]$ 为信息素挥发系数, 包括局部信息素挥发系数 ρ_{local} 和全局信息素挥发系数 ρ_{global} 。

任务联盟组建完成后, 根据(7)式~(12)式计算当前代任务执行效能 J , 并与全局任务最优执行效能 J_{best} 进行比较, 若优于全局最优任务执行效能, 则更新联盟成员全局最优执行计划 M_{best} 和执行效能 J_{best} 。

基于动态联盟的异构 UAV 集群在线任务规划的算法伪代码见算法 1, 具体描述如下:

1) 任务联盟招标-投标。UAV 发现目标成为长机, 向其领域内的其余 UAV 发布任务招标信息, 进行“招标-投标”任务联盟组建过程(算法 1 的 4~6 行);

2) 任务分配。初始化蚁群算法并建立人工蚂蚁簇(算法 1 的 7~10 行), 对人工蚂蚁簇内的蚂蚁分别进行任务分配计算, 其中蚂蚁任务转移路径长度按照 Dubins 航迹进行约束规划(算法 1 的 14 行)。比较每代任务执行效能 J 与全局任务最优效能 J_{best} (算法 1 的 20~24 行), 迭代结束得到任务最优执行序列和集群航迹。

3) 任务联盟组建及飞行航迹规划。输出任务规划最优方案并由长机释放任务联盟组建结果信息(算法 1 的 28~29 行), 联盟成员根据任务联盟组建及任务分配结果进行航迹规划(算法 1 的 30 行)。

4) 集群任务执行。联盟成员按照最优航迹飞行执行任务, 任务执行结束等待下一次任务联盟组建(算法 1 的 31~32 行)。

算法 1 UAV 集群 U 的在线任务规划算法

- 1: **Input:** U : UAV 集合; T : 目标集合; M_k^t : 目标 k 对应的任务集合; 仿真基本参数: $\omega_1, \omega_2, \alpha, \beta, q_0, \rho_{local}, \rho_{global}, \rho_{local}$
- 2: **Output:** 最优任务方案 M_{best} 和任务航迹
- 3: **Begin**
- 4: UAV 发现目标并成为长机
- 5: UAV 长机根据(19)式发布招标信息
- 6: 长机通信范围内的其余 UAV 根据(22)式进行任务投标
- 7: 任务联盟组建过程
- 8: $c \leftarrow 0$
- 9: 分工机制蚁群算法初始化 $\leftarrow (A_i^c, i=1, 2, \dots, n_U, A_j^G, j=1, 2, \dots, m)$
- 10: 平均分配给每架 UAV 由 m 只蚂蚁组成的人工蚂蚁簇
- 11: **while** $c < c_{max}$ **do**
- 12: 执行分工机制蚁群算法计算
- 13: **for each** $A_{i,j} \in A_j^G$ **do**
- 14: 对各投标 UAV 进行按式(18)进行 Dubins 路径规划
- 15: 根据(26)式~(31)式计算 AC 状态转移

```

16:      End
17:      AC 局部信息素更新
18:      AC 根据(32)式全局信息素更新
19:      AC 根据(7)式~(12)式计算评价指标  $\leftarrow J$ 
20:      if  $J > J_{best}$  do
21:           $J_{best} = J$ 
22:           $M_{best} = M$ 
23:      End
24:      迭代更新
25:      每个 UAV 分配新一代人工蚂蚁簇
26:       $c \leftarrow c+1$ 
27:  End
28:  输出最佳解决方案  $M_{best}$ 
29:  集群长机根据(25)式发布任务分配结果
30:  联盟内 UAV 根据任务协同指标进行 Dubins 航迹规划
31:  UAV 集群协同飞行
32:  UAV 集群任务结束后等待组建形成新的任务联盟
33:  End

```

5 仿真与分析

为了验证基于动态联盟的集群在线任务规划方法,本节分别对 UAV 集群执行察打评一体任务的动态任务规划和通信约束下的算法性能进行了仿真分析。在 4.1 节中以典型的察打评一体化的任务场景为例来仿真 UAV 集群动态联盟组建任务规划全过程;在 4.2 节中通过 Monte Carlo 仿真分析不同联盟组建算法性能并进行对比;在 4.3 节中通过 Monte Carlo 仿真分析不同通信延迟和通信裕度时间对集群任务执行效能的影响;并在 4.4 节通过虚实结合半实物仿真对本文提出的方法有效性进行验证。

5.1 UAV 集群察-打-评任务典型场景仿真

为了便于仿真效果展示, UAV 集群包括 32 架 UAV, 分别由 11 架携带察打评一体载荷的 UAV、11 架携带打击载荷的 UAV 和 10 架携带侦察评估载荷的 UAV 构成。任务区域内存在 3 个目标, 待执行察打评一体任务, 环境中存在若干威胁。初始时刻 UAV 集群随机分布在任务环境中, UAV 的位置、最大航程、载荷资源和任务能力如表 1 所示, UAV 初始航向角不同, 打击载荷资源末端打击距离均为 200 m, 任务能力表示 UAV 是否携带侦察 R、打击 S 和评估载荷 E。目标初始参数如表 2 所示。数据链通信参数为: 机间通信距离为 1500 m, 机间通信延迟为 $\Delta t_d = 0.2$ s, 联盟组建计算时间为 $t_{TA} = 0.5$ s, 通信耗时裕值 $\delta_t = 0.3$ s。

表 1 初始时刻各 UAV 的信息

Table 1 The initial information of the UAVs

UAV	初始位置/m	最大航	飞行速	任务能	打击载
-----	--------	-----	-----	-----	-----

编号		程/m	度	力	荷数量
/(m s ⁻¹)					
U_1	(2200, 2000, 300)	18000	50	(R,S,E)	2
U_2	(4000, 1900, 300)	18000	50	(R,S,E)	2
U_3	(2500, 5000, 300)	18000	50	(R,S,E)	2
U_4	(3000, 5500, 300)	18000	50	(R,S,E)	2
U_5	(4000, 4000, 300)	18000	50	(R,S,E)	2
U_6	(5000, 4500, 300)	18000	50	(R,S,E)	2
U_7	(6500, 3000, 300)	18000	50	(R,S,E)	1
U_8	(5800, 2300, 300)	18000	50	(R,S,E)	1
U_9	(5200, 3800, 300)	18000	50	(R,S,E)	1
U_{10}	(6700, 4200, 300)	18000	50	(R,S,E)	1
U_{11}	(5500, 2000, 300)	18000	50	(R,S,E)	1
U_{12}	(5000, 1000, 500)	26000	60	(S)	4
U_{13}	(1000, 1000, 500)	26000	60	(S)	4
U_{14}	(6000, 6000, 500)	26000	60	(S)	4
U_{15}	(5900, 6500, 500)	26000	60	(S)	4
U_{16}	(2800, 2000, 500)	26000	60	(S)	4
U_{17}	(1600, 1600, 500)	26000	60	(S)	4
U_{18}	(3000, 3050, 500)	26000	60	(S)	4
U_{19}	(2500, 2800, 500)	26000	60	(S)	4
U_{20}	(5600, 5800, 500)	26000	60	(S)	4
U_{21}	(1800, 3550, 500)	26000	60	(S)	4
U_{22}	(2800, 2100, 500)	26000	60	(S)	4
U_{23}	(6000, 2000, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{24}	(1000,2000, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{25}	(8000, 7000, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{26}	(1500, 3800, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{27}	(3000, 4500, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{28}	(3000, 2800, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{29}	(2800, 4000, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{30}	(3800, 2100, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{31}	(2200, 2500, 400)	20000	50	(R,E)	0
U_{32}	(2800, 1800, 400)	20000	50	(R,E)	0

表 2 初始时刻各目标的信息

Table 2 The initial information of the targets

目标编号	初始位置/m	待执行任务列表	侦察时间/s
1	(3500, 2800, 1)	(R, S, E)	20
2	(1000, 500, 1)	(R, S, E)	30
3	(4500, 5000, 1)	(R, S, E)	30

仿真时刻 $t=43.92$ s 时, U_1 完成对目标 T_1 的 20s 持续定位, 确定目标 T_1 需要 8 架携带打击载荷的 UAV 分别从 $R_1^s = \{15^\circ, 60^\circ, 105^\circ, 150^\circ, 195^\circ, 240^\circ, 285^\circ, 330^\circ\}$ 方向时间一致打击, 并且需要 2 架

携带评估载荷 C_i^s 的 UAV 对协同打击效果进行评估。此时 U_1 作为联盟长机进入联盟招标状态, U_1 的邻域 UAV 为 $Ls(U_1) = \{U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8, U_9, U_{11}, U_{13}, U_{14}, U_{16}, U_{17}, U_{19}, U_{20}, U_{22}, U_{24}, U_{27}, U_{30}, U_{31}\}$ U_1 及其邻域 UAV 状态如图 7 所示, 绿色区域为 U_1 通信范围, U_1 末端圆弧段为对 T_1 的 20s 侦察航迹, 满足对 T_1 侦察起始角度 90° 约束。

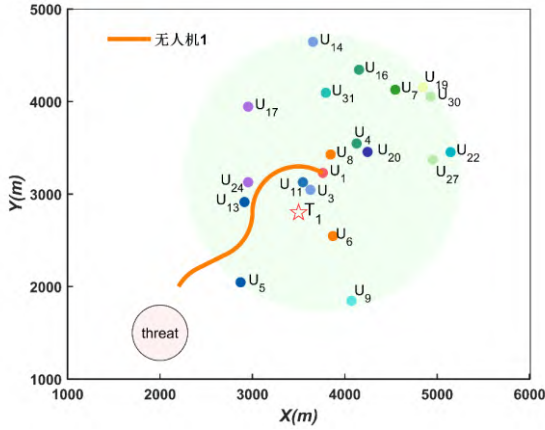
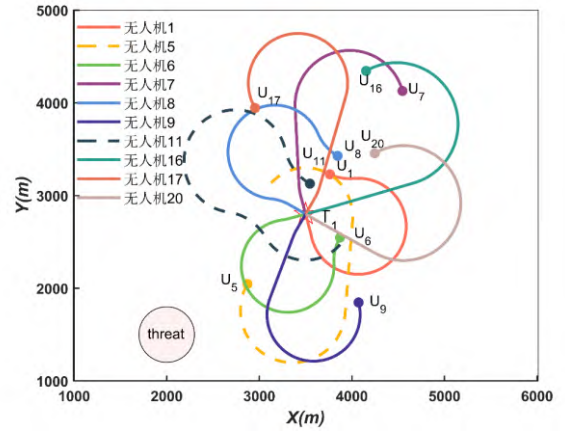


图 7 U_1 招标状态

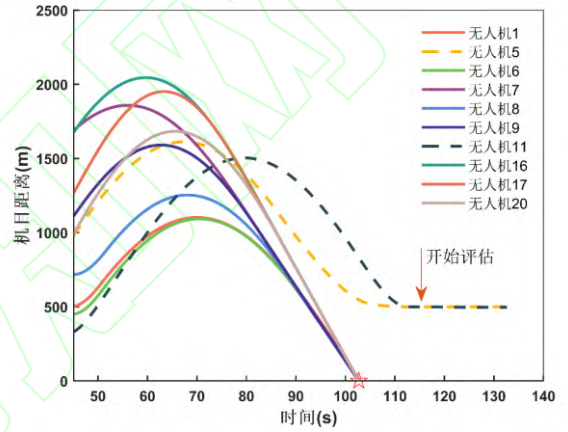
Fig.7 Tender status of U_1

邻域 UAV 判断在联盟组建过程中能否一直处于 U_1 的通信范围内, 得到联盟潜在成员 $U_{\text{potential}} = \{U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8, U_9, U_{11}, U_{13}, U_{14}, U_{16}, U_{17}, U_{19}, U_{20}, U_{22}, U_{24}, U_{27}, U_{30}, U_{31}\}$ 。联盟潜在成员向长机进行任务投标, 长机评估任务资源和任务效能, 构建任务联盟 $U_{\text{allocation}} = \{U_1, U_5, U_6, U_7, U_8, U_9, U_{11}, U_{16}, U_{17}, U_{20}\}$ 执行对目标 T_3 的打击和评估任务, 考虑到爆炸烟雾等对评估任务效能的影响, 评估任务须在打击完成 10s 后开始执行, 且评估任务执行时间为 20s。联盟内 UAV 的任务航迹如图 8 (a) 所示, 联盟内 UAV 与目标之间距离如图 8 (b) 所示。从图中可以看出, 其中 $\langle U_1, U_6, U_7, U_8, U_9, U_{16}, U_{17}, U_{20} \rangle$ 被分配在不同终端打击角度的约束下同时打击目标 T_1 , 预计打击时刻为 101.44 s。UAV $\langle U_5, U_{11} \rangle$ 在时间约束条件下于 111.44 s 执行对目标 T_1 打击效果的评估, 持续时间为 20 s, 图 8 (b) 中空五星为对 T_1 的打击时刻。



(a) UAV 联盟针对目标 T_1 任务航迹

(a) UAV Alliance mission path against T_1



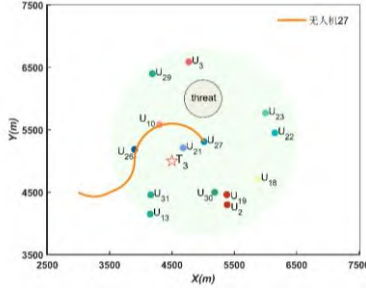
(b) 联盟内成员与目标 T_1 相对距离

(b) Relative distance between members of the alliance and T_1

图 8 $t=43.92s$ 时 UAV 联盟针对目标 T_1 的任务规划结果

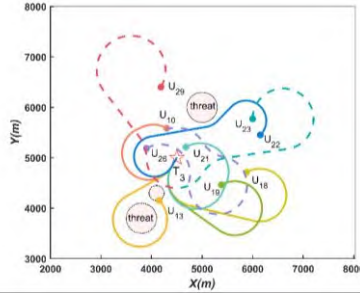
Fig.8 When $t=43.92s$, the mission planning result of UAV allocation for target T_1

U_{27} 于 $t=54.23$ s 完成对目标 T_3 的 30 s 持续侦察定位, 确定目标 T_3 需要 4 架携带打击载荷的 UAV 分别从 60° 方向等时间间隔打击, 时间差为 5 s, 需要 3 架 UAV 评估。 U_{27} 的潜在任务联盟成员为 $U_{\text{potential}} = \{U_2, U_3, U_{10}, U_{13}, U_{18}, U_{19}, U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{26}, U_{29}, U_{30}, U_{31}\}$, U_{27} 侦察航迹及其招标状态如图 9(a)所示, 绿色双箭头线条表示集群间的通信结构。



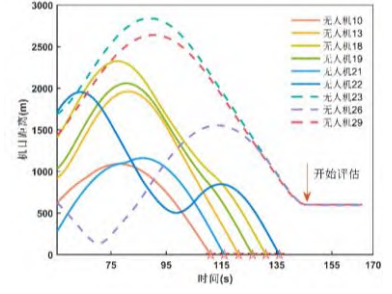
(a) U_{27} 招标状态

(a) Tender status of U_{27}



(b) UAV 联盟针对目标 T_3 任务航迹

(b) UAV Alliance mission path against T_3



(c) UAV 联盟与目标 T_3 距离

(c) Relative distance between members of the alliance and T_3

图 9 $t=54.23s$ 时 UAV 联盟针对目标 T_3 的任务规划结果

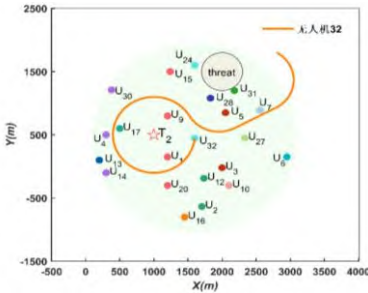
Fig.9 When $t=54.23s$, the mission planning result of UAV allocation for the target T_3

构建任务联盟 $U_{\text{allocation}} = \{U_{10}, U_{13}, U_{18}, U_{19}, U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{26}, U_{27}, U_{29}\}$ 执行对目标 T_3 的打击和评估任务, 此时环境中出现多个动态威胁, 联盟执行任务过程中需对所有的动态威胁和静态威胁进行规避, 任务联盟的任务航迹、联盟 UAV 成员与目标之间距离分别如图 9(a)和图 9(b)所示, 虚线威胁表示动态威胁。任务联盟中 6 架携带打击载荷的 UAV $\langle U_{10}, U_{13}, U_{18}, U_{19}, U_{21}, U_{22} \rangle$ 均从 60° 方向序贯依次打击目标, 满足打击目标的 5s 时间间隔, 打击时刻分别为 $\langle 111.2s, 121.2s, 131.2s, 126.2s, 116.2s, 136.2s \rangle$ 。考虑到爆炸烟雾等的影响, 评估任务时间约束为打击任务结束 10s 后开始执行, $\langle U_{23}, U_{26}, U_{29} \rangle$ 从 3 个方向开始评估任务, 持续时间均为 20s, 从图 9(b)可以看出, $\langle U_{23}, U_{26}, U_{29} \rangle$ 在满足时间约束的条件下于 166.25s 完成对目标 T_2 的评估任务。UAV 联盟皆在满足其最大飞行航程的约束下完成对目标 T_3 的察-打-评一体任务。

U_{32} 于 $t=104.17s$ 完成对目标 T_2 的 30s 持续侦察定位, 确定目标 T_2 需要 6 架携带打击载荷的 UAV 分别从 $R_2^s = \{0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ\}$ 方向时间一致

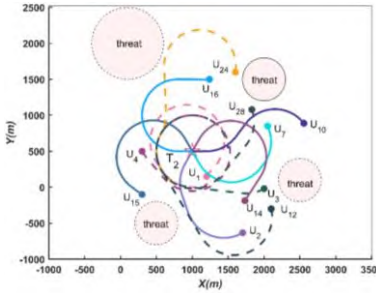
打击, 并需要六架评估 UAV 沿相同的方向对打击效果进行评估, 打击任务和评估任务时间间隔为 15s, 评估任务时长为 15s。

$t=104.17s$ 时, 此时潜在任务联盟成员为 $U_{\text{potential}} = \{U_3, U_5, U_{20}, U_{31}\}$ 无法满足目标 T_2 的任务需求, 无法构建任务联盟, 此时由 U_{32} 对目标 T_2 进行持续封控监测并发布招标命令, 等待任务联盟组建。 $t=142.28s$ 时, U_{32} 的潜在联盟成员为 $U_{\text{potential}} = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_9, U_{10}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}, U_{16}, U_{17}, U_{20}, U_{24}, U_{27}, U_{28}, U_{30}, U_{31}\}$, U_{32} 侦察航迹及其招标状态如图 10(a)所示, 组成任务联盟 $U_{\text{allocation}} = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_7, U_{10}, U_{12}, U_{14}, U_{15}, U_{16}, U_{24}, U_{28}, U_{32}\}$ 执行对目标 T_2 的打击和评估任务, 由 $\langle U_2, U_7, U_{10}, U_{14}, U_{15}, U_{16} \rangle$ 执行打击任务, $\langle U_1, U_3, U_4, U_{12}, U_{24}, U_{28} \rangle$ 执行评估任务, 评估时长为 15s, 联盟航迹及成员目标之间的距离分别如图 10(b)和图 10(c)所示。从图 10 中结果可知, 联盟中的 UAV 能够在满足任务约束条件下到达目标, 且为其规划的路径满足曲率连续和范围约束。



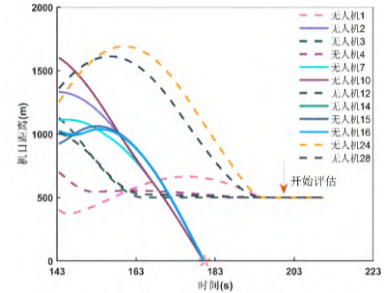
(a) U_{32} 招标状态

(a) Tender status of U_{32}



(b) UAV 联盟针对目标 T_2 任务航迹

(b) UAV Alliance mission path against T_2



(c) UAV 联盟与目标 T_2 距离

(c) Relative distance between members of the alliance and T_2

图 10 $t=142.28s$ 时 UAV 联盟针对目标 T_2 的任务规划结果

Fig.10 When $t=142.28$ s, the mission planning result of UAV allocation for the target T_2

由于引入通信距离约束和“招标-投标”任务联盟组建过程，相对于领域内所有 UAV 参与规划，任务规划过程的计算量得到一定程度的减少。针对 3 个目标的任务联盟规划的仿真耗时分别为 0.45s, 0.4s 和 0.72s。图 11 显示了 UAV 群的任务顺序，每架 UAV 的飞行时间分为联盟等待时间、必要飞行时间和任务执行时间，根据任务类型，任务执行时间可分为侦察任务、打击任务和评估任务执行时间。



图 11 UAV 集群任务序列

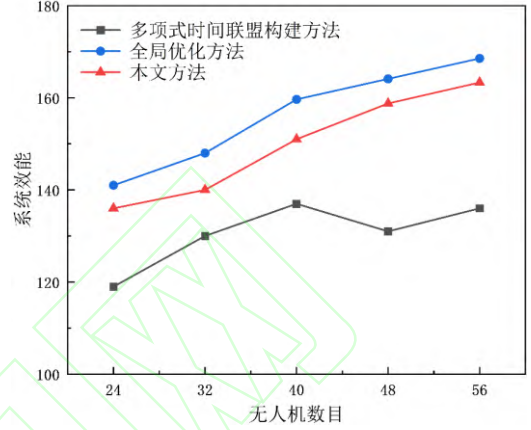
Fig.11 The task sequences of UAV swarm

5.2 典型任务联盟方法仿真对比

联盟组建过程中的关键步骤为长机对投标信息选择执行任务的联盟成员的过程，基于本文的任务场景设计及分布式框架，仿真对比本文联盟构建方法与不考虑通信约束和联盟构建的集群全局优化方法、任务多项式时间联盟^[23]构建方法性能。

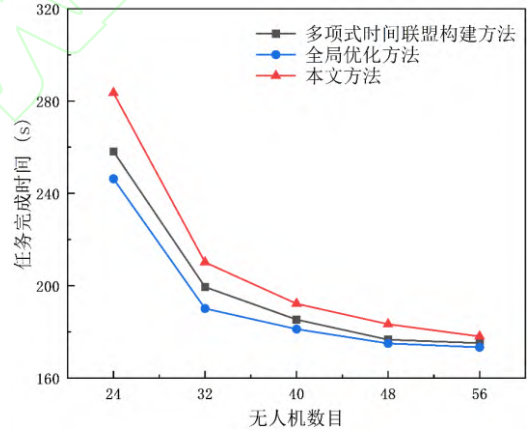
仿真条件采用 4.1 节中设定的目标参数及 UAV

通信约束参数，每个目标需要不同次数的打击任务和评估任务，设置多组 Monte Carlo 仿真实验对比当 UAV 数量分别为 24、32、40、48、56 情况下的集群任务规划性能，初始时刻 UAV 散布在任务区域内，在未发现目标时执行侦察任务，使用不同联盟算法的任务分配效能和任务执行平均时间如图 12 所示。



(a) 联盟任务效能平均值

(a) UAV Alliance mission value average



(b) 联盟任务执行平均耗时

(b) Average time spent on alliance mission execution

图 12 UAV 数目变化时，联盟组建算法性能对比

Fig.12 Performance comparison of three coalition formation algorithms with increasing number of UAV

图 12 (a) 为 UAV 数目变化时系统效能对比，图 12 (b) 为联盟执行任务平均耗时对比，可以看出本文方法系统效能明显优于多项式时间联盟构建方法，但任务完成时间略长，这是由于多项式时间联盟构建方法在构建任务联盟时，以任务完成耗时最短为唯一指标。因此随着 UAV 数目增加，多项式时间联盟构建方法系统效能有下降趋势，这是由于多项式联盟组建方法随着 UAV 数目增加，邻域内 UAV 数

目增加,但该方法不考虑的集群任务的协同效能,导致联盟代价增大,效能降低。同时由于全局优化方法在任务规划过程中不考虑集群通信结构约束,问题转换为当前场景下全部可用 UAV 节点的任务优化配置,仿真结果显示系统效能相对于本文方法任务完成时间减少,任务效能提升,但是此类情况下的任务规划不符合应用过程中的实际在线状态条件,且随着优化节点数据的增多,算法优化计算量增大,计算时间增长,因此全局优化方法不适合于动态场景下的在线任务规划方法,适合于全场景态势信息明确,全链路连通,对目标任务类型及约束想定,任务规划时间裕度大的任务预规划情况。综合比较可得,本文方法在动态任务规划过程中损失较少任务完成时间的前提下可获得较优的系统效能。

5.3 通信约束下的场景仿真

UAV 集群执行任务过程中,任务效能还受集群内机间通信约束的影响,本节通过设置不同的通信距离 R_{\max} 和通信延迟裕度 δ_i ,考虑到随着通信距离的增加,机间通信时延 Δt_d 增大,导致联盟潜在成员投标预估位置和预计任务完成时间 ETA 不同。采用本文任务规划方法考虑 UAV 在不同通信距离 R_{\max} 和通信延迟裕度 δ_i 时间约束下对集群任务效能的影响。

采用 4.1 节中仿真的仿真初始参数,UAV、目标以及环境的初始参数保持一致。分别设置 UAV 的通信距离 r_n 分别为 1000 m、1500 m、2000 m、2500 m 状态,对应的通信时延 Δt_d 分别为 0.2 s、2 s 和 3.5 s 和 5.5 s,联盟组建计算时间 t_{TA} 为 0.5 s,通信延迟裕度 δ_i 分别为 0.3 s、1.0 s 和 3.0 s。对联盟组建过程分析,并采用 Monte Carlo 仿真实验方法对比当 UAV 通信距离变化对动态联盟任务规划的效能影响,在相同参数配置下,进行 50 次仿真时延并对结果取平均值。集群的任务平均效能值随 UAV 的通信距离和通信延迟的影响如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,当 UAV 的通信时延固定时,随着机间通信距离的增加,UAV 集群执行任务效能持续增大,这是因为随着通信距离的增大,任务联盟的潜在联盟成员增加,联盟长机会获得更多的任务投标信息,在此基础上筛选得出集群最优任务执行序列和任务航迹,这表明更容易获得效能更优的任务联盟。然而随着通信半径的增加,当通信距离为 2500 m 时,任务联盟总效能降低,这是因为随着通信距离的增大,通信延迟相应增加,联盟稳定的潜在成员数目减少,因此任务协同完成时间增加,协同性能降低,系统总效能降低。从图 13 中的结果同样表明随着机间通信距离的增大,即使通信延迟增加,也能保证任务联盟的组建和任务的执行。

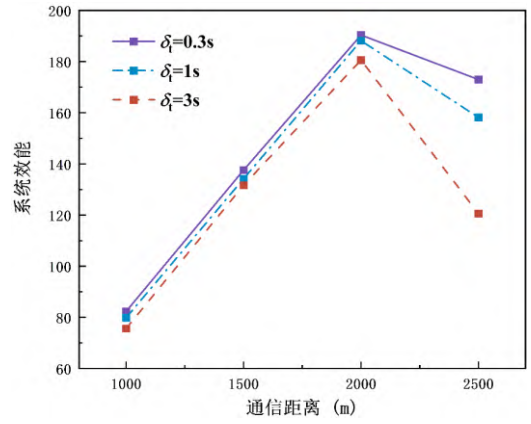


图 13 通信约束对任务效能方法的影响

Fig 13 The influence of communication constraints on the proposed mission planning method

5.4 虚实结合的集群半实物仿真

为了进一步对本文方法进行验证,本节在仿真实验的基础上,进一步开展了相关的半实物仿真测试。由于飞控硬件数量的限制,采用“虚实结合”的方法,包括 5 套半实物仿真子系统,和 27 套虚拟仿真子系统,各系统之间采用自组网数据链路实现联盟组建过程中的数据通信,通信链范围为 1500 m。半实物仿真实验布置如图 14 所示。

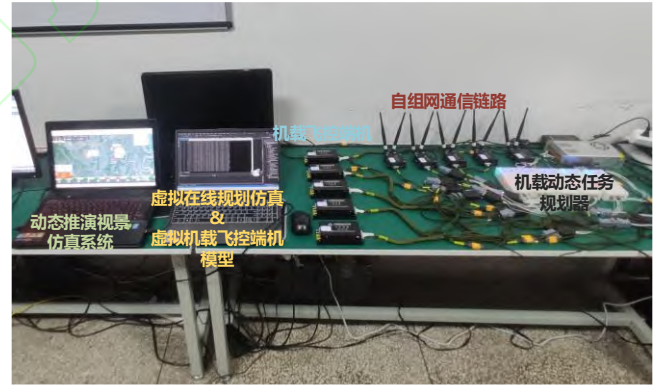


图 14 虚实结合半实物仿真实验布置

Fig.14 Hardware-in-the-loop (HIL) simulation with virtual and reality experimental arrangement

32 架机集群虚实结合半实物仿真流程如下:

- 1) 确定半实物 UAV 集群飞行原点经纬坐标为 $(105.044327^\circ, 31.522062^\circ)$, 将 UAV 集群航迹点结果从相对坐标系下进行坐标转换为经纬度坐标。
- 2) 32 架机从初始位置出发,按照固定方向飞行,集群飞行轨迹按照 6 自由度模型模拟,当集群内有 UAV 发现目标时,通过自组网数据链与其邻域内的其与 UAV 进行联盟组建规划任务。
- 3) 联盟组建成功后,联盟内 UAV 上集群规划器进行动态航迹规划并装订,由机载飞控端机按照

动态航迹飞行。

4) 将 UAV 飞行过程中的遥测信息(飞行信息、姿态信息)通过通信数据链路返回至动态推演视景仿真系统进行显示,虚实结合半实物仿真系统示意图如图 15 所示。

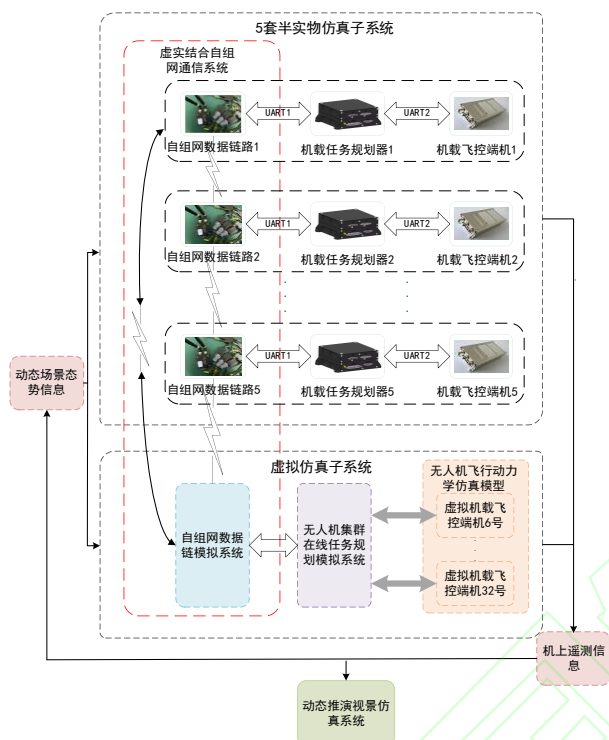
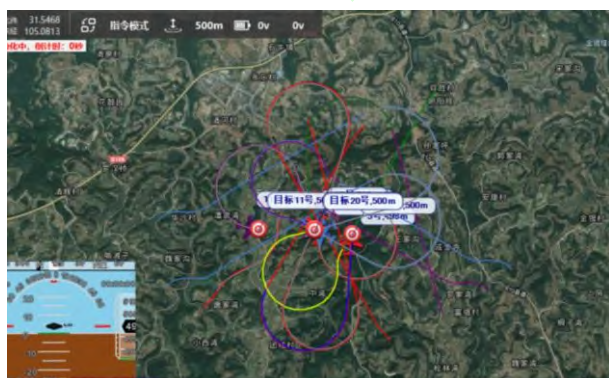


图 15 集群虚实结合半实物仿真系统示意图

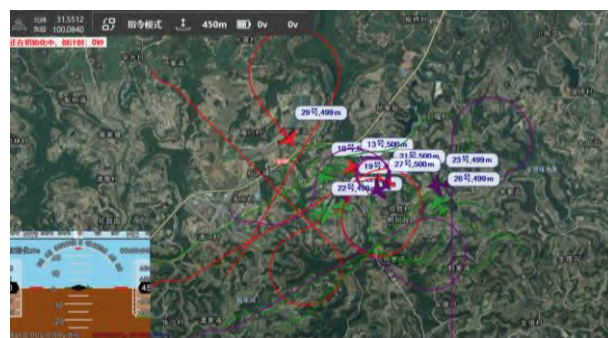
Fig.15 Schematic diagram of the UAVs HIL simulation with virtual and reality system

采用 4.1 节仿真参数,半实物仿真 UAV 飞行速度为 50 m/s 和 60 m/s,对 4.1 节仿真结果进行半实物仿真验证,为清晰展示验证效果,将 3 个联盟组建过程的集群飞行效果在动态推演视景仿真系统中的二维验证分别显示如图 16(a)、图 16(b)和图 16(c)。



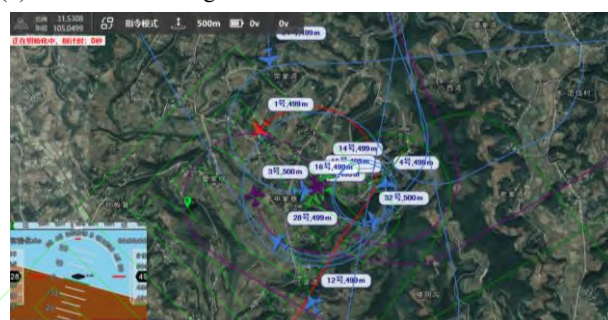
(a) 联盟 1 虚实结合半实物仿真飞行效果

(a) Alliance 1 HIL flight simulation result with virtual and reality



(b) 联盟 2 虚实结合半实物仿真飞行效果

(b) Alliance 2 HIL flight simulation result with virtual and reality



(c) 联盟 3 虚实结合半实物仿真飞行效果

(c) Alliance 3 HIL flight simulation result with virtual and reality

图 16 半实物仿真飞行效果二维展示

Fig.16 Two-dimensional display of HIL simulation flight effects

从半实物仿真试验结果可以看出,本文所提出的联盟组建算法满足 UAV 集群飞行过程中动态任务需求,并生成引导 UAV 到任务终点位置的期望航线。UAV 在跟踪动态航线执行多种任务过程中,能满足任务时空约束,在期望的时刻以期望的角度完成任务,充分说明了所提出算法的有效性。

6 结论

本文提出了一种基于动态联盟策略的 UAV 集群在线任务规划方法,针对动态任务规划过程中的环境、通信拓扑和任务不确定等问题,建立了集群任务规划数学模型,设计了一种动态联盟组建策略,提出了耦合 Dubins 航迹规划的多子群蚁群任务规划方法,解决了多约束不确定场景下的 UAV 集群在线任务规划问题,并通过虚实结合的半实物仿真系统进行了验证。得出以下主要结论:

1)以 UAV 集群执行察打评一体的典型任务场景为例,仿真验证表明本文方法可以解决多不约束不确定场景的在线任务规划问题。对比分析得出本文方法优于多项式时间联盟构建方法的系统效能,稍差于全局优化方法,但全局优化方法不适合于动态场景下的在线任务规划问题。综合可得动态任务规划过程中本文方法可在损失较少任务完成时间的前

提下可获得较优的系统效能。

2)通过仿真分析了在考虑通信距离和通信时间延迟约束的集群任务规划的效能,结果表明通过增大 UAV 的通信距离和减少通信时延,能够一定程度上增加系统任务效能。

3)通过虚实结合的半实物集群仿真验证了本文提出方法对 UAV 集群半实物模型具备良好的适应能力,对于后续研究工作进一步对于走向工程化应用具有一定指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 4-14.
JIA Y N, TIAN S Y, LI Q. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S1): 4-14. (in Chinese)
- [2] NIU W, HUANG J Q, MIU L F. Research on the concept and key technologies of unmanned aerial vehicle swarm concerning naval attack[J]. Command Control & Simulation, 2018, 40(1): 20-27.
- [3] MAVROVOUNIOTIS M, LI C, YANG S. A survey of swarm intelligence for dynamic optimization: algorithms and applications[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2017, 33: 1-17.
- [4] 甄子洋, 江驹, 孙绍山, 等. 无人机集群作战协同控制与决策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2022: 1-35.
ZHEN Z Y, JIANG J, SUN S S, et al. Cooperative control and decision of UAV operations[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022: 1-35. (in Chinese)
- [5] 贾高伟, 王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 43(1): 13.
JIA G W, WANG J F. Research review of UAV swarm mission planning method. [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 99-111. (in Chinese)
- [6] DHEIN G, NETO A F K, DE ARAÚJO O C B. The multiple traveling salesman problem with backup coverage[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2018, 66: 135-142.
- [7] MINH A N, GIANG T D, MINH H H, et al. The mincost parallel drone scheduling vehicle routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 229(3): 910-930.
- [8] AFONSO R, MAXIMO M, GALVÃO R. Task allocation and trajectory planning for multiple agents in the presence of obstacle and connectivity constraints with mixed - integer linear programming[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(14): 5464-5491.
- [9] KONG X Q, LU N, LI B. Optimal scheduling for unmanned aerial vehicle networks with flow-level dynamics[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(3): 1186-1197.
- [10] 朱云冲, 梁彦刚, 黎克波, 等. 基于 PSO 和 RRT 的智能弹群任务分配算法[J/OL]. 航空学报. (2022-07-12)[2022-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220710.1634.028.html>.
ZHU Y C, LIANG Y G, LI K B, et al. Algorithm to solve the task assignment problem of intelligent missile swarm based on PSO and RRT[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. (2022-07-12)[2022-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220710.1634.028.html>. (in Chinese)
- [11] 李桂亮, 毕海洋, 洪雪健, 等. 基于 DE-DPSO-GT-SA 算法的协同多任务分配[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(1): 90-96.
LI G L, BI H Y, HONG X J, et al. Cooperative multi-task assignment based on DE-DPSO-GT-SA algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(1): 90-96. (in Chinese)
- [12] CHEN Y, YANG D, YU J. Multi-UAV task assignment with parameter and time-sensitive uncertainties using modified two-part wolf pack search algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(6): 2853-2872.
- [13] WANG Z, LIU L, LONG T, et al. Multi-UAV reconnaissance task allocation for heterogeneous targets using an opposition based genetic algorithm with double-chromosome encoding[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(2): 339-350.
- [14] JIA Z Y, YU J Q, AI X L, et al. Cooperative multiple task assignment problem with stochastic velocities and time windows for heterogeneous unmanned aerial vehicles using a genetic algorithm[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 112-125.
- [15] XIA C, LIANG Y T, YUAN L Y, et al. Cooperative task assignment and track planning for multi-UAV attack mobile targets[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 100(3): 1383-1400.
- [16] WANG J, ZHANG M, SONG H, et al. Improvement and application of hybrid firefly algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 165458-165477.
- [17] WANG M, MA T, LI G, et al. Ant colony optimization with an improved pheromone model for solving MTSP with capacity and time window constraint[J]. IEEE Access, 2020, 8: 106872-106879.

- [18] KIM K-S, KIM H-Y, CHOI H-L. A bid-based grouping method for communication-efficient decentralized multi-UAV task allocation[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2020, 21(1): 290-302.
- [19] SUJIT P, GEORGE J, BEARD R. Multiple UAV task allocation using particle swarm optimization[C]//*Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. Honolulu, HI, US:AIAA, 2008: 6837.
- [20] 刘重, 高晓光, 符小卫, 等. 未知环境下异构多无人机协同搜索打击中的联盟组建[J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2284-2297.
- LIU Z, GAO X G, FU X W, et al. Coalition formation of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles in cooperative search and attack in unknown environment[J]. *ACTA Armamentarii*, 2015, 36(12): 2284-2297. (in Chinese)
- [21] 符小卫, 魏可, 李斌, 等. 基于联盟的无人机集群编队控制方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(11): 2559-2572.
- FU X W, WEI K, LI B, et al. Formation control method of UAV cluster based on alliance[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(11): 2559-2572. (in Chinese)
- [22] ZHEN Z Y, WEN L D, WANG B L, et al. Improved contract network protocol algorithm based cooperative target allocation of heterogeneous UAV swarm[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 119(6): 107054.
- [23] SUJIT P B, MANATHARA J G, GHOSE D, et al. Decentralized multi-UAV coalition formation with limited communication ranges[J]. *Handbook of unmanned aerial vehicles*, 2014: 2021-2048.
- [24] 陈璞, 严飞, 刘钊, 等. 通信约束下异构多无人机任务分配方法[J]. *航空学报*, 2021, 42(8): 313-326.
- CHEN P, YAN F, LIU Z, et al. Heterogeneous unmanned aerial vehicles task allocation with communication constraints[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(8): 313-326. (in Chinese)
- [25] DENG Q B, YU J Q, WANG N F. Cooperative task assignment of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles using a modified genetic algorithm with multi-type genes[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(5): 1238-1250.
- [26] WU W, WANG X, CUI N. Fast and coupled solution for cooperative mission planning of multiple heterogeneous unmanned aerial vehicles[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 79: 131-144.
- [27] 吴钟博, 易建强. 无人机编队支撑网络的协同通信中继策略[J]. *航空学报*, 2020, 41(S2): 187-194.
- WU Z B, YI J Q. Cooperative communication relay selection method for UAV formation support networks[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S2): 187-194. (in Chinese)
- [28] 陈清阳, 辛宏博, 王玉杰, 等. 一种多机协同打击的快速航迹规划方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 48(7):1145-1153.
- CHEN Q Y, XIN H B, WANG Y J, et al. A rapid path planning method for multiple UAVs to cooperative strike[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 48(7):1145-1153. (in Chinese)
- [29] 苏菲, 陈岩, 沈林成. 基于蚁群算法的无人机协同多任务分配[J]. *航空学报*, 2008, 29(S1): 184-191.
- SU F, CHEN Y, SHEN L C. UAV cooperative multi-task assignment based on ant colony algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(S1):184-191. (in Chinese)