

任务-中继无人机协同路径规划模型方法研究

张国辉¹, 张雅楠¹, 高昂², 林俊余³, 许奥宇⁴

(1. 陆军装甲兵学院, 北京, 100072; 2. 国防大学联合作战学院, 北京, 100091; 3. 93617 部队, 北京, 101400;
4. 93176 部队, 辽宁大连, 116000)

摘要 为了实现多源节点与地面控制站连续的远程通信, 提出了一种基于人工势场法的中继无人机动态路径规划模型求解方法。中继簇计算模块根据密度最大值聚类对中继簇进行动态划分, 并实现中继节点数量的动态调整。中继节点动态路径规划模块根据人工势场法的思想, 使中继无人机根据势场合力机动到合适位置, 并具有动态避障和防碰撞的能力。对构建的模型在不同任务载荷设置下独立进行仿真实验, 结果表明, 中继无人机能够在多源节点与 GCS 之间完成可靠的多跳中继, 在源节点数量不大于 10 且对空威胁区的数量不大于 7 的情况下通信链路的联通率均不小于 99.83%。该方法能够有效地解决任务无人机远程通信中继的问题, 为未来无人装备的发展和运用提供重要技术支撑。

关键词 无人机; 路径规划; 通信中继; 人工势场法; 最大值密度聚类

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.014

中图分类号 V279; TP391.9 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0094-09

Research on the Method of Collaborative Path Planning for Task-Relay Unmanned Aerial Vehicles

ZHANG Guohui¹, ZHANG Yanan¹, GAO Ang², LIN Junyu³, XU Aoyu⁴

(1. Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China;
2. Joint Operations College, Beijing 100091, China; 3. Unit 93617 of PLA, Beijing 101400, China;
4. Unit 93176, Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract In order to achieve continuous remote communication between multiple source nodes and the Ground Control Station (GCS), a solution method is proposed for dynamic path planning of relay unmanned aerial vehicles based on the artificial potential field method. The relay cluster computation module is to dynamically divide the relay clusters according to the maximum density clustering, realizing the dynamic adjustment of the number of relay nodes. The dynamic path planning module for relay nodes employs in accordance with the concept of artificial potential fields, enabling the relay drones to mobilize to suitable positions based on the resultant force of the potential field while possessing dynamic obstacle avoidance and collision prevention capabilities. The simulation experiments are conducted on the constructed model with different task payload settings. The results demonstrate that the relay unmanned aerial vehicles can reliably achieve multi-hop relaying between multiple source nodes and the GCS, with a connec-

收稿日期: 2023-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20428)

作者简介: 张国辉(1980-), 男, 山东鱼台人, 副教授, 研究方向为智能指挥决策。E-mail: zgh8002@126.com

引用格式: 张国辉, 张雅楠, 高昂, 等. 任务-中继无人机协同路径规划模型方法研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(3): 94-102. ZHANG Guohui, ZHANG Yanan, GAO Ang, et al. Research on the Method of Collaborative Path Planning for Task-Relay Unmanned Aerial Vehicles [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 94-102.

tivity rate of communication links being no less than 99.83%, the number of source nodes being no greater than 10, and the number of threat zones in the airspace being no greater than 7.

Key words UAV; path planning; communication relay; artificial potential field; maximum density clustering

21 世纪以来,无人装备进入快速发展期,在无人装备的智能感知、自主规划和指挥控制等领域涌现了大量成果^[1]。在无人机等无人装备的实际使用过程中,无人装备(简称源节点)收集的数据,通常需要传输到 GCS,以便实时地进行报告、监视和控制,因此保持无人装备之间的通信链路畅通至关重要。然而,无人装备的机动性、无线传输的衰落效应以及实际环境中的障碍物遮挡可能导致通信过程出现严重延迟、范围受限、通信质量受损及任务性能不佳等问题。为避免上述情况,需要在源节点到 GCS 之间的路径上部署通信中继无人机,建立无人机到无人机的链路,实现高质量远程数据传输。如何进行路径规划使中继无人机能够自主地机动到合适位置,以维持稳定的通信链路是解决这个问题的关键。

近年来,大量学者对静态源节点和动态源节点的中继无人机路径规划分别开展了研究。

静态源节点通常指不会移动或者移动缓慢的源节点,其路径规划相对来说比较容易,因为无人机可以在固定位置悬停或者沿着预定路径巡航,提供稳定的通信覆盖。但仍然需要解决如何最优地选择无人机的位置和轨迹、如何协调多个无人机之间的通信协作等问题。文献[2]在 5G 辅助的多无人机环境下针对灾难场景使用卫星确定了所需的无人机数量,并使用基于动态定位的 Soft Actor-Critical 算法对无人机进行定位,以实现最大吞吐量;采用动态窗口方法的洗牌牧羊犬优化算法对无人机进行路径规划,以降低能耗。针对空地通信的中继规划,文献[3]分别对大规模集群的时序性多任务点中继通信问题和复杂场景下单任务机的空地通信链路保持问题进行研究,对机间网络的通信质量保持问题提出了中继初始部署以及在线实时规划算法。

动态源节点的中继无人机路径规划则更具有挑战性,因为通信源的位置和速度会随时间变化,需要实时跟踪并调整无人机的位置和速度,以保持通信链路的稳定性。同时,动态源节点通常也存在运动不可预测、信号干扰等问题,这些都需要进行考虑并提出恰当的解决方案。文献[4]针对城市环境中无人机对移动的地面无人车和 GCS 进行通信中继的场景,提出了一种无人机中继辅助联合通信运动规划方法,以最小化城市地区的总能量消耗文献[5]针对车载用户在基站信号覆盖范围内的单向路段进行

上行通信的场景,提出移动无人机中继以辅助信号较差的边缘用户进行通信,联合车辆聚类、无人机轨迹优化和各节点功率分配,最大限度地降低通信过程中断概率。文献[6]针对单源节点借助多架无人机以多跳方式将感知数据传输到地面控制站的场景,提出了一种弹性中继网络构建方法,并验证了该方法在总中断时间和吞吐量方面的优越性。

如今对动态源节点中继无人机路径规划的研究中,对多动态源节点通常采用单跳无人机中继的方式。在面对多个动态源节点的情况下,使用单跳无人机中继的方式可能无法满足需求,因为其距离有限,无法覆盖较大的区域。而多跳无人机中继的方式可以扩大网络的覆盖范围,提高网络的弹性,适用于更为复杂的场景。

针对不同应用场景下无人机的路径规划的研究中,涌现出了大量的算法思想,主要有传统算法、图形学算法和智能算法。人工势场法(artificial potential field, APF)是由 Oussama Khatib 在 1985 年提出的一种经典的机器人路径规划和避障方法^[7]。本文选用人工势场法进行中继无人机动态路径规划,主要是考虑到人工势场法具有以下优势:①计算量较小,容易实现和调试;②实时性强;③能够避障;④多目标寻优。

因此本文针对多源节点和多对空威胁区的场景,构建了基于人工势场法的中继无人机动态路径规划模型,并给出了该模型的求解方法。

1 问题模型

本文假设 N_U 架搭载传感器的小型旋翼侦察无人机由 GCS 出发至多个目标点执行侦察任务,在任务结束后返回 GCS。在整个任务过程中,侦察无人机需要实时保持与 GCS 的通信链路畅通, N_R 架小型旋翼中继无人机负责将任务无人机收集的数据中继给 GCS。在任务场景中,敌方在固定阵地配备便携防空导弹可能对无人机造成威胁,存在 N_O 个圆形的对空威胁区作为障碍物,中继无人机需要规避对空威胁区。在这种情况下,任务无人机的集合表示为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_{N_U}\}$,即为本系统的动态源节点;中继无人机的集合表示为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_{N_R}\}$,即为本系统中继节点。对空威胁区集合表

示为 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_{N_O}\}$ 。假设如下:①对空威胁区在无人机执行任务的过程中位置固定;②所有的中继无人机都在一个固定的高度 H 飞行,避开地形或建筑物;侦察无人机在机动过程中同样在固定高度 H 飞行,在抵进目标侦察时根据需要自行调整高度;③每架无人机都能够获得全局节点的实时准确信息。中继节点可以向其邻居传输数据的最大距离是 r_{\max} 。④无人机在本系统中飞行速度恒定,任务无人机的速度为 v_U ,中继无人机的速度为 v_R 。

模型中,每个中继节点随着源节点移动,GCS和源节点之间的链路是动态保持的。

在给定高度 H 的情况下,任务区域可以用二维坐标系进行表示,以 GCS 的位置作为原点, $P^G = (0, 0)$ 。为了便于描述,任务持续时间 T 被离散成 M 个等间距的时隙,即 $T = M\Delta t$, Δt 表示基本时隙长度,无人机的方向可以被假设为在每个时隙内近似恒定。。

模型的求解流程见图 1,划分中继簇计算模块和中继节点动态路径规划模块。

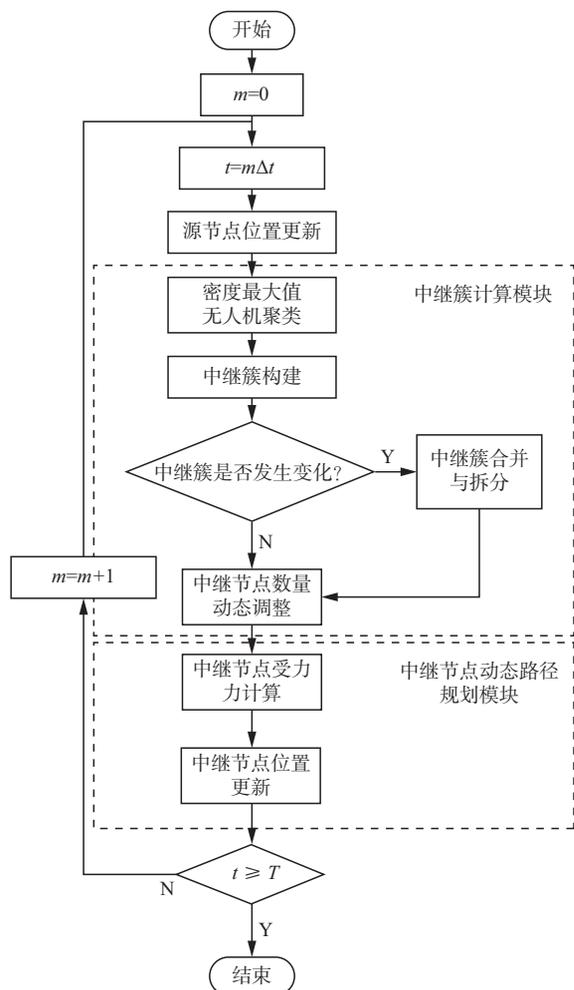


图 1 模型求解流程图

在每一个时隙,先将更新位置后的源节点进行聚类分簇,根据源节点簇对中继簇进行构建,若中继

簇内源节点相较上个时隙发生了变化,则进行中继簇的拆分与合并,而后对中继节点的数量进行动态调整,再对中继节点进行受力分析,最后更新中继节点的位置。

2 中继簇计算模块

在面向多源节点的场景中,源节点的分布通常并不均衡,存在多个密集源节点群和孤立源节点,若对每一个源节点均独立进行通信链路的构建,无疑是对中继无人机资源的浪费。为了减少中继无人机数量,提高无人机资源的利用率,本文引入了中继簇的概念。中继簇是管理和优化中继节点动态数量、任务分配和路径规划的有效单元。中继簇由源节点簇、中继节点簇以及对应的边界集合所构成,其中:源节点簇指的是将源节点按其位置和通信需求进行聚类分簇,所形成的密集或孤立的源节点集合,如图 2 所示;中继节点簇指的是被分配服务于同一源节点簇的中继节点的集合;边界集合根据源节点簇中源节点与 GCS 的位置关系所形成,如图 2 所示,主要用于约束并引导中继节点的移动。采用中继簇来管理和优化无人机网络,具有以下优势:①提高资源利用率;②简化计算复杂性;③强化局部优化能力。

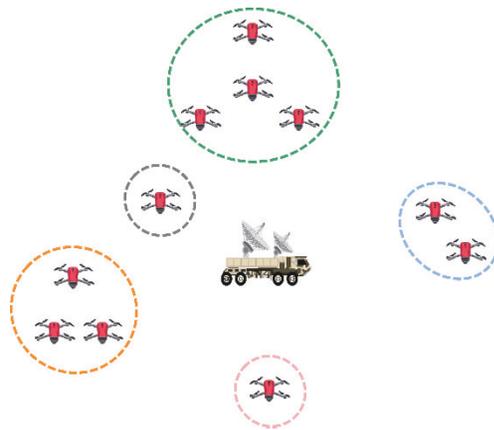


图 2 源节点簇示意图

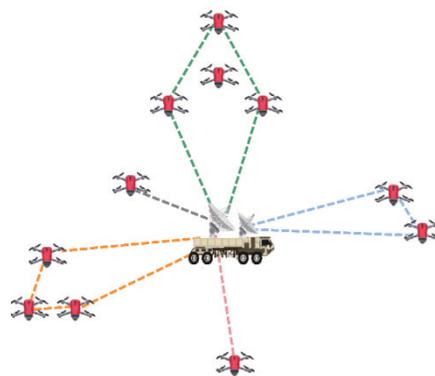


图 3 中继簇边界示意图

2.1 密度最大值无人机聚类算法

密度最大值聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)^[12]是一种基于密度的聚类算法,被广泛应用于数据挖掘和机器学习领域。相比于传统的基于距离的聚类算法,如 K-means^[13]和层次聚类^[14],DBSCAN 算法不需要事先指定聚类的数量,能够有效发现任意形状的簇、自动识别稀疏点,符合本文划分密集源节点和稀疏源节点的需要。具体步骤参照相关文献。通过 DBSCAN 可以得到源节点簇集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。

2.2 中继簇构建算法

根据源节点簇可以进行中继簇的构建。

若第 i 个源节点簇 C_i 中只包含一个源节点 U_j , 中继簇 Ω_i 的边界 B_i 则为该源节点此时刻位置到 GCS 位置这两点连接成的线段:

$$B_i = \{P^G, U_j\} \quad (1)$$

若第 i 个源节点簇 C_i 中包含多个源节点 $C_i = \{U_j, U_k, \dots, U_n\}$, 中继簇 Ω_i 的边界 B_i 构建方法为:将 GCS 的位置 P^G 加入 C_i , 求解 C_i 中节点的凸包。其中,凸包是指在一个平面上,包含给定点集的最小凸多边形,可以看作是将给定点集的所有点用一个橡皮筋圈住所得到的结果^[15],如图 4 所示。求解凸包的方法有很多种,包括 Quickhull^[16]、Graham Scan^[17]、Chan's Algorithm^[18]等,本文不进行详细赘述。

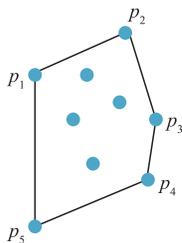


图 4 凸包示意图

通过求解 C_i 中节点的凸包,得到中继簇边界 B_i 如式(2)所示,为不规则多边形。

$$B_i = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (2)$$

构建中继簇 $\Omega_i = \{C_i, A_i, B_i\}$, 其中 A_i 表示中继节点簇。

循环处理源节点簇集 C 中所有簇,得到中继簇集 $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$ 。

2.3 中继节点数量动态调整算法

随着侦察无人机任务执行过程中远离或靠近 GCS, 中继无人机根据侦察无人机的位置和链路状态自动起飞或返航,自适应地调整中继节点数量。在 m 时隙,中继簇 $\Omega_i (i \leq n)$ 中的源节点簇为 C_i 。中继无人机区分待命状态、工作状态和返航状态。待命状态下,中继无人机位于 GCS 内准备就绪,接

收并等待来自 GCS 的指令,可以根据需求随时起飞。工作状态下,中继无人机已经起飞并在空中根据源节点自主机动,为源节点搭建通信链路。在此过程中,中继无人机会实时调整其位置以保持最佳的通信效果。除了负责中继任务外,同时需要确保自身的飞行安全。返航状态是中继无人机完成其中继任务后或当其存在超出需求时的状态。在返航状态下,中继无人机会停止当前的中继任务并返回 GCS。在返回过程中,无人机需要避开可能的对空威胁区,并根据 GCS 的指令准确着陆。中继无人机在着陆后进入待机状态。中继节点簇 A_i 中工作状态的中继节点集合为 E_i , 返航状态的中继节点集合为 D_i , 集合 E_i 中继节点数量为 n_i 。

设定一个略小于最大传输距离 r_{\max} 的距离阈值 θ , 如果中继簇内 C_i 和 E_i 中的所有节点到 GCS 的距离均大于 θ , 则集合 E_i 中需要增加 1 架中继无人机。

在集合 E_i 需要增加中继节点时, 优先检查集合 D_i : 若 D_i 不为 \emptyset , 则选取最后加入 D_i 的中继无人机加入 E_i , 并将节点从 D_i 中删除; 否则, 由 GCS 施放 1 架待命状态的中继无人机加入集合 E_i 。

同时, Ω_i 内的中继节点最小数量 n_{\min} 应满足式(3):

$$n_{\min} = \frac{\sqrt{(x_{\max} - x_{\min})^2 + (y_{\max} - y_{\min})^2}}{r_{\max}} \quad (3)$$

式中: $x_{\max}, y_{\max}, x_{\min}, y_{\min}$ 表示中继簇边界 B_i 在 X 轴和 Y 轴的最大值和最小值。

若 $n_i < n_{\min}$, 则集合 E_i 中需要增加 $n_{\min} - n_i$ 架中继无人机, $n_i = n_{\min}$;

若 $n_i > n_{\min}$, 且 $\exists R_j \in E_i$, 都有 $\text{Dist}(R_j, P^G) < \theta$, 则将 R_j 从集合 E_i 中删除, 并放入集合 D_i 。

中继节点数量动态调整算法可以确保在中继任务期间始终有足够数量的中继无人机处于工作状态, 以提供稳定的信号传输或数据转发。同时, 将超出需求的中继无人机设置为返航状态可以有效管理资源, 节省中继无人机资源。

2.4 中继簇合并与拆分算法

在侦察无人机动态执行任务过程中, 它们的稀疏或密集关系在不断变化, 中继簇必然也将不断经历拆分和合并的过程。如图 5 所示, 第 m 个时隙的中继簇 Ω_1 在第 $m+1$ 个时隙拆分成了 Ω_1^* 和 Ω_2^* ; 第 m 个时隙的中继簇 Ω_2 和 Ω_3 在第 $m+1$ 个时隙合并成了 Ω_3^* 。

2.4.1 合并算法

中继簇 Ω_i 和 Ω_j 合并为 Ω_k , 则工作状态的中继节点集合 $E_k = E_i \cap E_j$, 返航状态的中继节点集合 $D_k = D_i \cap D_j$ 。

2.4.2 拆分算法

中继簇 Ω_k 拆分为 Ω_i 和 Ω_j , 则循环检查集合 E_k 中的中继节点 U_i^R 。如果中继节点在 B_i 或 B_j 所围成的区域内, 则直接加入 E_i 或 E_j ; 若不在中继簇边界区域内, 则计算节点到中继簇边界最近的欧式距离 $\text{Dist}(B_i, R_j)$, 将该节点加入距离较近的中继簇的工作状态中继节点集合。

返航状态的中继节点集合 D_k 参照工作状态的中继节点集合 E_k 拆分方法执行。

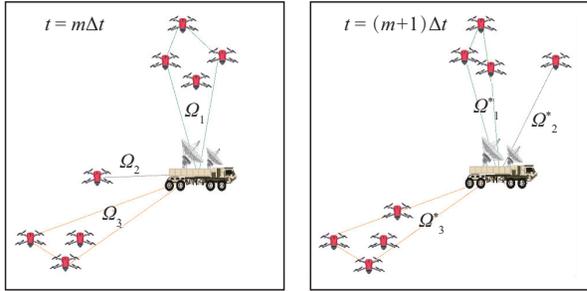


图5 中继簇拆合并示意

3 中继节点动态路径规划模块

3.1 中继节点力场设计

采用人工势场法进行中继无人机路径规划的基本原理是: 构造一个复杂的势场, 在其中引入合适的斥力和引力, 从而实现中继无人机路径规划。将中继无人机所处的空间视为一个二维的平面, 源节点、GCS 和其他中继节点分别对应着不同势能大小的区域, 引入对空威胁区、中继簇边界等因素, 可以构造出一个复杂的势场。在第 m 个时隙, 有中继簇 Ω_i 中工作状态中继节点集合 E_i 中的中继节点 R_j , R_j 会受到势场中各种力的作用, 根据合力 $\mathbf{F}(R_j)$ 动态调节中继无人机位置实现中继无人机路径规划, R_j 位置向量表示为 \mathbf{r}_j 。

3.1.1 源节点对 R_j 的力

中继簇 Ω_i 内的源节点 U_k 的位置向量表示为 \mathbf{u}_k , 为便于表示令 $\mathbf{e}_u = \mathbf{u}_k - \mathbf{r}_j$ 方向由 R_j 指向 U_k 。 U_k 对中继节点 R_j 施加的力如式(4)。若源节点 U_k 和中继节点 R_j 之间的距离 $\|\mathbf{e}_u\|$ 大于距离阈值 θ , 则源节点给中继节点施加引力, 与传统人工势场法不同, 引力大小与距离成反比, 有助于维持中继节点与其距离较近的源节点的稳定链路; $\|\mathbf{e}_u\|$ 小于距离阈值 θ 且源节点 U_k 与 GCS 的距离大于距离阈值 θ , 则源节点给中继节点施加斥力, 防止中继节点距离源节点过近, 造成无人机之间的碰撞和中继节点过于聚集导致的资源浪费。

$$\mathbf{F}(U_k, R_j) =$$

$$\begin{cases} \frac{\eta_U \hat{\mathbf{e}}_u}{\|\mathbf{e}_u\|}, \|\mathbf{e}_u\| > \theta \\ \frac{k_U - (\hat{\mathbf{e}}_u)}{\|\mathbf{e}_u\|^2} \left(\frac{1}{\|\mathbf{e}_u\|} - \frac{1}{\theta} \right), \|\mathbf{e}_u\| < \theta \wedge \|\mathbf{u}_k\| > \theta \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

式中: η_U 为源节点的引力系数; $\hat{\mathbf{e}}_u$ 为 \mathbf{e}_u 的单位向量; k_U 为源节点的斥力系数, $-\hat{\mathbf{e}}_u$ 为方向由 U_k 指向 R_j 的单位向量。

3.1.2 中继节点对 R_j 的力

中继簇 Ω_i 工作状态中继节点集合 E_i 中有中继节点 R_n , 令 $\mathbf{e}_r = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_j$ 。 R_n 对中继节点 R_j 施加的力如式(5)。若 $\|\mathbf{e}_r\|$ 大于距离阈值 θ , 则中继节点 R_n 给中继节点 R_j 施加引力, 引力大小与距离的平方成反比; 若 $\|\mathbf{e}_r\|$ 小于距离阈值 θ , 则中继节点给中继节点施加斥力。

$$\mathbf{F}(R_n, R_j) = \begin{cases} \frac{\eta_R \hat{\mathbf{e}}_r}{\|\mathbf{e}_r\|^2}, \|\mathbf{e}_r\| > \theta \\ \frac{k_R (-\hat{\mathbf{e}}_r)}{\|\mathbf{e}_r\|^2} \left(\frac{1}{\|\mathbf{e}_r\|} - \frac{1}{\theta} \right), \|\mathbf{e}_r\| < \theta \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中: η_R 为中继节点的引力系数; k_R 为中继节点的斥力系数。

在中继簇 Ω_i 中, 只有工作状态的中继无人机会对其他中继无人施加力, 返航状态的中继无人不会对其他中继无人造成影响。

3.1.3 GCS 对 R_j 的力

GCS 对中继节点 R_j 施加的力如式(6)。若中继节点 R_j 到 GCS 的距离 $\|\mathbf{r}_j\|$ 大于距离阈值 θ , 则 GCS 给中继节点施加引力, 引力大小和距离成反比; 否则, GCS 不对 R_j 施加力。

$$\mathbf{F}_G(R_j) = \begin{cases} \frac{\eta_G \hat{\mathbf{r}}_j}{|\mathbf{r}_j|}, \|\mathbf{r}_j\| > \theta \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中: η_G 为 GCS 引力系数。

3.1.4 中继簇边界对 R_j 的力

中继簇 Ω_i 的边界 B_i 对中继节点 R_j 施加的力如式(7)。若中继节点 R_j^m 在中继簇边界 B_i 外, 则中继簇边界对中继节点产生一个斥力; 若中继节点 R_j^m 在中继簇边界 B_i 内, 则中继簇边界对中继节点不施加力。

$$\mathbf{F}(B_i, R_j^m) = \begin{cases} k_B (p_{\min} - \mathbf{r}_j), R_j \notin B_i \\ 0, R_j \in B_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: k_B 为中继簇边界的斥力系数; 中继簇 Ω_i 边界

上的点 p_{\min} 与中继节点 R_j 的连线为 R_j 到中继簇边界的最短距离。

3.1.5 对空威胁区对 R_j 施加的力

对空威胁区 O_l 的位置向量表示为 \mathbf{o}_l , 半径表示为 r_l^o , 令 $\mathbf{e}_o = \mathbf{o}_l - \mathbf{r}_j$ 。 O_l 对中继节点 R_j 施加的力如式:

$$\mathbf{F}(O_l, R_j) = \begin{cases} \frac{k_o \mathbf{F}_{O_l}}{\|\mathbf{e}_o\|^2} \left(\frac{1}{\|\mathbf{e}_o\|} - \frac{1}{br_l^o} \right), & \|\mathbf{e}_o\| \leq br_l^o \\ 0, & \|\mathbf{e}_o\| > br_l^o \end{cases}$$

$$\mathbf{F}_{O_l} = \begin{cases} \mathbf{F}_{O_1}, \mathbf{F}(R_j) \cdot \mathbf{F}_{O_1} \geq 0 \\ \mathbf{F}_{O_2}, \mathbf{F}(R_j) \cdot \mathbf{F}_{O_2} > 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{F}_{O_1} = \mathbf{e}_o \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{O_2} = \mathbf{e}_o \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: k_o 为对空威胁区斥力系数; b 为对空威胁区的作用范围系数, 略大于 1, br_l^o 为对空威胁区的作用范围, 略大于对空威胁区半径 r_l^o 。若 $\|\mathbf{e}_o\|$ 大于 br_l^o , 则不对中继节点施加力, 否则计算当前中继节点 R_j 的合力 $\mathbf{F}(R_j)$ 与 \mathbf{F}_{O_1} 和 \mathbf{F}_{O_2} 的点积, 若点积大于 0 则说明 $\mathbf{F}(R_j)$ 与该向量夹角为锐角, 对空威胁区对 R_j 施加的力 $\mathbf{F}(O_l, R_j)$ 等于 k_o 倍的该向量, 如图 6 所示。

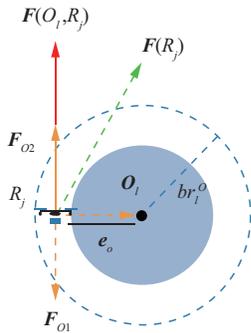


图 6 对空威胁区斥力示意图

3.2 中继节点位置更新算法

工作状态中继节点集合 E_i 中中继节点 R_j 在第 m 个时隙受到的合力 $\mathbf{F}(R_j)$ 如式:

$$\mathbf{F}(R_j) = \sum_{k=1}^{N_U} \mathbf{F}(U_k, R_j) + \sum_{n=1}^{N_R} \mathbf{F}(R_n, R_j) + \mathbf{F}_G(R_j) + \mathbf{F}(B_i, R_j) + \sum_{l=1}^{N_O} \mathbf{F}(O_l, R_j) \quad (9)$$

若 R_j 处于返航状态, 则中继节点只受 GCS 的引力和对空威胁区的斥力, 如式:

$$\mathbf{F}(R_j) = \frac{\eta_G \hat{r}_j}{|r_j|} + \sum_{l=1}^{N_O} \mathbf{F}(O_l, R_j) \quad (10)$$

中继节点在第 $m+1$ 个时隙的位置计算方式如式:

$$\mathbf{r}_j[m+1] = \mathbf{r}_j[m] + \hat{\mathbf{F}}(R_j^m) v_R \Delta t \quad (11)$$

4 仿真实验

本文分别在 $120 \text{ km} \times 120 \text{ km}$ 的地图上, 验证本文提出的中继无人机动态路径规划方法。任务无人机路径规划算法详见文献[19], 仿真所用参数见表 1, 引力斥力系数为多次实验后的经验值。

表 1 参数说明

参数	值
侦察无人机的速度 v_u /(m/s)	20
中继无人机速度 v_R /(m/s)	26
最大传输距离 r_{\max} /km	20
基本时隙长度 Δt /s	30
距离阈值 θ /km	15
源节点的引力系数 η_U	8
源节点的斥力系数 k_U	6 000
中继节点的引力系数 η_R	2
中继节点的斥力系数 k_R	8 000
起点引力系数 η_G	2
中继簇边界的斥力系数 k_B	1
对空威胁区的斥力系数 k_o	10 000
对空威胁区的作用范围系数 b	1.2

本文设定若 2 个节点之间的距离小于最大传输距离 r_{\max} , 则认为这节点间能够进行通信。本文联通率指源节点到 GCS 的通信连接成功率的平均值。联通率计算方法为:

$$P = \frac{C}{MN_T} \quad (23)$$

式中: C 为每个时隙每架侦察无人机连接成功次数的总和。

4.1 单源节点的中继无人机动态路径规划

总任务时长 $T = 9\ 690 \text{ s}$, 被分为 $M = 323$ 个时隙, 共出动了 4 架中继无人机。在整个实验过程中, 侦察无人机到 GCS 的联通率为 100%。

图 7 显示了侦察无人机和中继无人机的路径规划结果, 可以看出每架中继无人机都能在保证通信链路的前提下规避对空威胁区, 且在任务结束后返回 GCS。图 8 显示了每一个时隙无人机到 GCS 的距离, 可以看出在大多数情况下, 无人机与其他节点之间会保持适当距离, 既保证了链路的通信质量, 也避免了无人机之间发生碰撞的可能; 在规避对空威胁区的过程中, 中继无人机可能会因为对空威胁区施加的力导致其位置距离其他无人机较近, 但无人机之间的斥力会保证无人机之间不会发生碰撞。中继节点数量动态调整算法能够根据源节点与 GCS

的链路需求,自主控制中继无人机的起飞或返航,保证中继无人机的资源利用率。

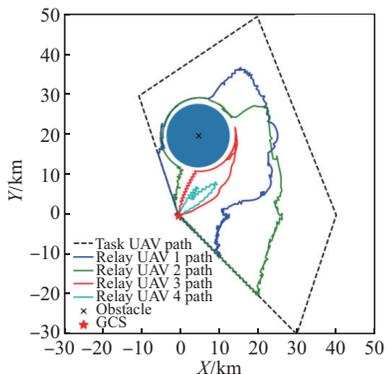


图7 单源节点中继无人机路径图

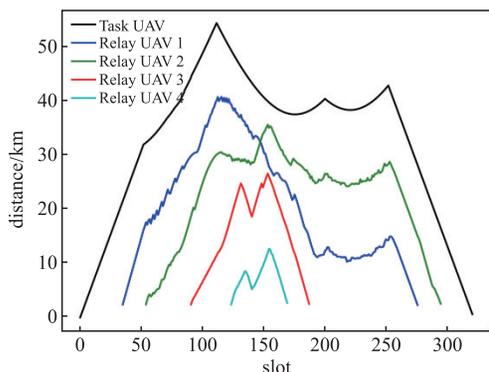
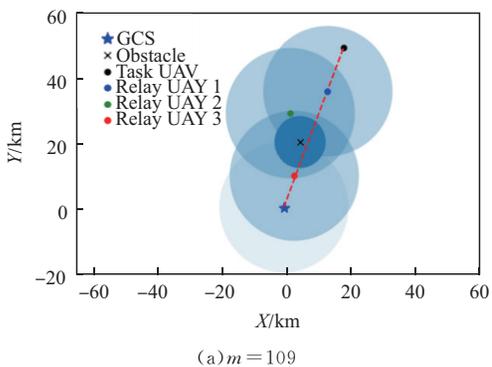
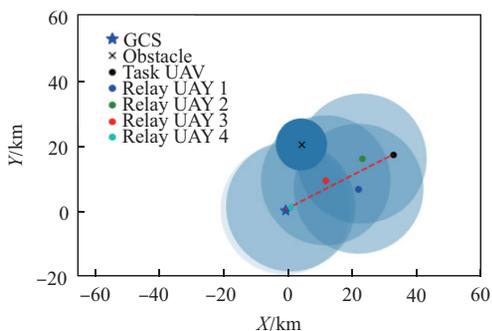


图8 GCS与无人机距离图

图9为无人机的动态分布图,图中红色虚线表示中继簇的边界,蓝色圆形区域为中继无人机和GCS的最大通信范围。在时隙 $m = 109$ 时,展示了中继无人机避障的场景,在中继无人机规避对空威胁区时,对空威胁区施加的力会大于中继簇边界施加的力,中继无人机在对空威胁区的作用范围附近进行机动,会导致无人机离开中继簇,但仍然能使源节点到GCS的链路畅通;在时隙 $m = 171$ 时,中继无人机均离开对空威胁区的作用范围,中继簇边界施加的力会使中继无人机逐渐返回中继簇内,同时中继无人机数量多于需求时会导致中继无人机之间距离过近,此时GCS的引力和无人机之间的斥力会动态调整中继无人机拉大彼此的距离,使多于需求的中继无人机返航。



(a) $m = 109$



(b) $m = 171$

图9 单目标源节点分布图

4.2 多源节点的中继无人机动态路径规划

本实验总任务时长 $T = 5\,520\text{ s}$,被分为 $M = 201$ 个时隙。本次实验共出动了24架中继无人机,在整个实验过程中任务无人机到GCS的联通率为100%。图10显示了任务无人机和中继无人机的路径规划结果,图中虚线表示的为任务无人机路径,实线表示的为中继无人机路径。

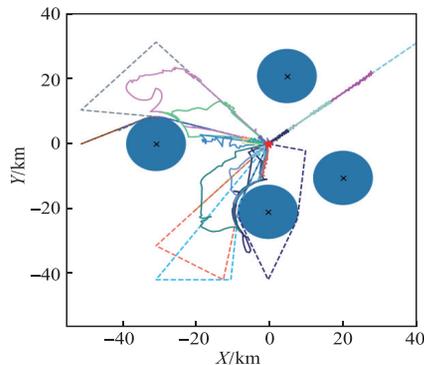


图10 多源节点中继无人机路径图

图11为无人机的动态分布图,图中红色虚线表示中继簇的边界,蓝色圆形区域为中继无人机和GCS的最大通信范围,黑色点为任务无人机的位置,彩色点为中继无人机的位置,白色点为返航状态的中继无人机。从图中可以看出,在不同时隙根据本文中继节点动态路径规划模块,动态的根据源节点的位置计算出了不同的中继簇;中继簇内的中继无人机根据中继节点动态路径规划模块动态的调整中继无人机位置,保证了源节点与GCS通信链路的畅通。可以验证本文提出的中继无人机动态路径规划模型在具有多目标源和多对空威胁区的条件下,能够动态的将任务无人机进行分组并构建合理的中继簇,有效地为任务无人机构建多跳通信链路,同时中继无人机能够实时规避对空威胁区,保证了无人机在进行中继任务过程中的安全性。

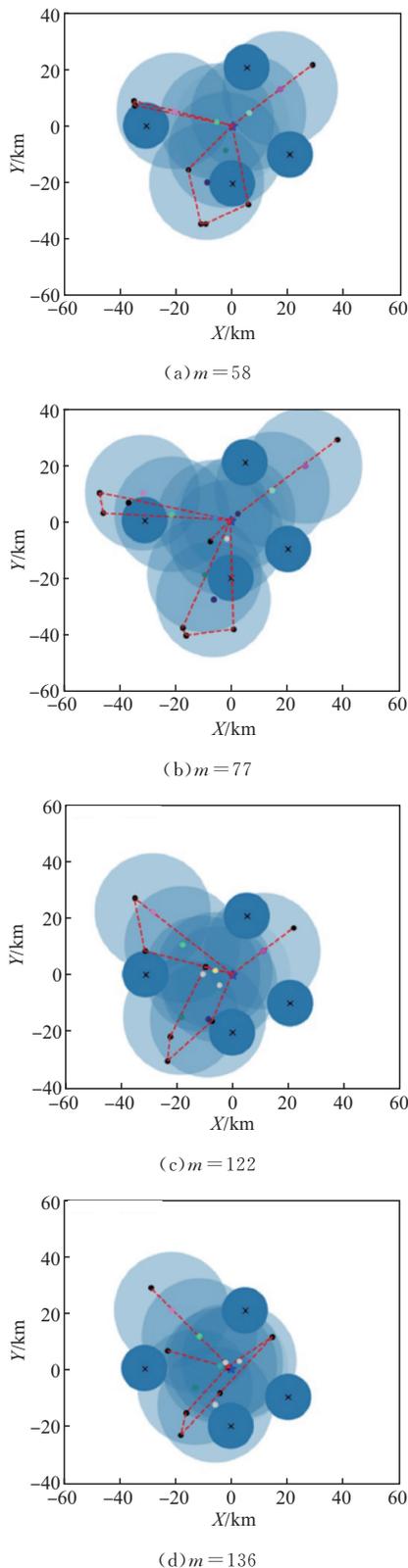


图 11 多目标源动态节点分布图

4.3 随机对空威胁区和任务无人机场景实验

实验结果如表 2 所示,本文方法在不同数量的源节点和对空威胁区条件下均能构建相对稳定的多跳中继链路。在源节点数量相同的情况下,对空威胁区的数量增多会导致所需要的中继无人机数量增

加,并可能导致联通率下降。本实验验证了本方法的稳定性和可靠性。

表 2 实验结果

源节点数量	对空威胁区数量	实验次数	平均中继节点数量	平均联通率/%
1	1	10	3.32	100
1	4	10	5.60	100
5	2	10	10.62	100
5	4	10	17.35	100
10	4	10	23.47	99.95
10	7	10	24.44	99.83

5 结语

本文为了实现多任务无人机与 GCS 连续的远程通信,对中继无人机如何构建稳定的中继链路进行了研究,构建了基于人工势场法的中继无人机动态路径规划模型,设计了中继簇计算模块,对源节点采用密度最大值聚类算法进行聚类分簇,动态地划分并调整中继簇,将大规模的求解问题划分成小问题求解;设计了中继无人机动态数量调整算法,有效减少中继无人机数量,提高无人机资源的利用率;根据人工势场法的思想,设计了中继无人机的势场,控制中继无人机根据势场合力进行机动,动态维持源节点到 GCS 的通信链路,并且使中继无人机具有动态规避对空威胁区和防碰撞的能力。最后用 Python 语言对本文提出的方法在不同任务载荷条件下独立进行了多次仿真实验,在源节点数量不大于 10 且对空威胁区的数量不大于 7 的情况下,通信链路的联通率均不小于 99.83%。实验结果表明,本文提出的中继无人机动态路径规划方法能够有效的控制中继无人机在整个任务持续时间内在多架任务无人机与 GCS 之间完成可靠的多跳中继。

参考文献

- [1] 孙智孝, 杨晟琦, 朴海音, 等. 未来智能空战发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 35-49.
- [2] KHAN A, ZHANG J, AHMAD S, et al. Dynamic Positioning and Energy-Efficient Path Planning for Disaster Scenarios in 5G-Assisted Multi-UAV Environments[J]. Electronics, 2022, 11(14): 2197.
- [3] 段碧琦. 无人机集群通信中继规划方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2019.
- [4] Yang S, Shi D, Peng Y, et al. Joint Communication-Motion Planning for UAV Relaying in Urban Areas [C]// 2021 18th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON). [S.l.]: IEEE, 2021:1463-1477.
- [5] LIU Z, TIAN Q, XIE Y, et al. Outage Probability

