

北京航空航天大学学报

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics

ISSN 1001-5965, CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目: 基于信息素决策的无人机集群协同搜索算法
作者: 吴傲, 杨任农, 梁晓龙, 侯岳奇
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0026
收稿日期: 2020-01-16
网络首发日期: 2020-05-06
引用格式: 吴傲, 杨任农, 梁晓龙, 侯岳奇. 基于信息素决策的无人机集群协同搜索算法. 北京航空航天大学学报, <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0026>



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。

基于信息素决策的无人机集群协同搜索算法

吴傲^{1,2}, 杨任农³, 梁晓龙^{1,2,✉}, 侯岳奇^{1,2}

(1.空军工程大学航空集群技术与作战运用实验室, 西安 710051; 2.空军工程大学国家空管防相撞技术重点实验室, 西安 710051;
3.空军工程大学空管领航学院, 西安 710051)

✉通信作者 梁晓龙, 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航空集群理论与技术、空管智能化、系统建模与仿真。
afeu_lxl@sina.com

摘要 针对无人机集群在未知环境中无先验信息条件下的搜索问题, 提出了一种以信息素为决策机制的无人机集群协同搜索算法。首先考虑无人机通信约束, 建立了有外部节点的星型通信网络和无外部节点的自组织通信网络两种形式的搜索模型; 其次通过环境地图向信息素地图映射的方法建立任务环境模型。将任务过程分为三个阶段, 在搜索阶段, 无人机通过不断的移动实现本机信息素地图的更新; 在通信阶段, 通过通信网络实现多机信息素地图的融合; 在决策阶段, 根据局部信息和全局信息做出决策, 并将栅格信息素浓度作为决策函数来引导无人机的位置更新。基于信息素地图覆盖率来定量描述搜索效果。最后仿真结果表明所提出的方法能够对区域进行覆盖搜索, 表现在搜索效率高、抗毁性强、受集群的初始位置影响小。

关键词 信息素; 未知环境; 无人机集群; 协同搜索; 搜索覆盖率

中图分类号 V279+.3; V249.122

文献标志码 A

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0026

Cooperative search algorithm based on pheromone decision for UAV swarm

WU Ao^{1,2}, YANG Rennong³, LIANG Xiaolong^{1,2,✉}, HOU Yueqi^{1,2}

(1. Aviation Swarm Technology and Operational Application Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

3. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

✉LIANG Xiaolong. E-mail: afeu_lxl@sina.com

Abstract To solve the problem of UAV swarm search in unknown environment without prior information, this paper proposes a cooperative search algorithm based on pheromone. Firstly, considering the communication constraints of UAV, two search models which are star communication network with external nodes and self-organizing communication network without external nodes are established. Secondly, the environment model is established by mapping environment map to pheromone map. In this paper, the task process is divided into three stages. In the search stage, the UAV can update the local pheromone map by moving constantly. In the communication stage, the fusion of UAV swarm pheromone maps is realized through the communication network. In the decision-making stage, the decision is made based on the local information and the global information, and the grid pheromone concentration is taken as the decision function to guide the position update of the UAV. Based on pheromone map coverage ratio, the search results are quantitatively described. Finally, the simulation results show that the method proposed in this paper can cover the region, which is characterized by high search efficiency, strong destructiveness and little influence by the initial location of the swarm.

Key words pheromone; unknown environment; UAV swarm; cooperative search; coverage

收稿日期: 2020-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61703427); 国防创新特区项目; “十三五”装备预研共用技术项目

作者简介: 吴傲, 男, 硕士研究生。主要研究方向: 航空集群理论与技术、自主空战决策; 杨任农, 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 任务规划、自主空战; 侯岳奇, 男, 博士研究生。主要研究方向: 航空集群智能决策

Fund: National Natural Science Foundation of China(61703427); National Defense Innovation Special Zone Project; "13th Five Year Plan" Equipment Pre Research Sharing Technology Project

网络首发时间: 2020-05-06 16:02:52 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200506.1327.003.html>

随着无人机技术的蓬勃发展,无人机在侦察探测、搜索救援等方面大量运用。由于无人机集群在机载功能和抗未知因素能力等方面具有优势^[1-2],所以在执行对地目标搜索任务时效率更高、抗毁性更强。

针对搜索问题,国内外学者进行了深入而广泛的研究。从搜索模型来看,最早开始研究的模型是穷举覆盖航路规划模型,包括扫描式模型、内螺旋式模型、Zamboni 模型^[3]。从无人机集群的控制结构来看,主要包括集中式^[4]、分布式^[5-6]、集散式等。文献[7]借鉴了分布式预测控制的思想,基于分布式模型预测控制理论建立系统的预测模型,并将预测周期内最大覆盖率增量设为奖励函数,该方法在无先验信息的情况下能够完成对未知搜索区域的最大覆盖,并在遇到火力威胁和单机故障时依旧保持较高的搜索效能。文献[8]则融合了集中式控制和分布式控制结构,建立了集散式协同搜索结构。从搜索任务的约束来看,包含搜索区域、目标动态、通信条件、故障威胁等。文献[9]在考虑通信数据延迟的情况下将搜索区域划分为未知区域、已知环境和禁飞区,针对三种区域设计了不同的搜索策略,但是该搜索方法不能避免无人机飞出搜索区域,在飞出搜索区域后需要多次执行转弯程序造成了搜索资源的浪费。文献[10]等研究了通信距离限制、通信角度限制和通信时间延迟对目标分配的影响。

对于穷举覆盖航路规划模型,由于搜索路线固定,会导致搜索过程灵活性较低、抗毁性不足;对于集中式控制结构,受制于中央节点的计算能力,限制了集群的规模,而分布式控制结构^[6],则较依赖于无人机集群的通信能力。综上所述,在无先验信息和集群通信能力受限的情况下搜索效率会大打折扣。

因此,针对无人机集群在未知环境中无先验信息条件下的搜索问题,采用一种以信息素为决策机制的无人机集群协同搜索算法。算法采用动态实时在线规划,搜索过程中无人机集群根据目标信息、战场环境和战场威胁实时调整信息素浓度,来引导无人机的机动飞行。这意味着该搜索方法具有不可预测性,敌方难以预测无人机集群的飞行轨迹,增加了无人机集群的战场生存力。同时,信息素搜索模型不依赖于先验信息,而是利用实时探测信息更新信息素地图。另外,信息素地图与传统概率地图^[11]相比所表达的搜索区域信息更加丰富,可执行的任务更灵活多样,如禁访、回访、重点区域多次重复搜索等^[5],同时信息素地图的仿生特性可以模拟自然界中的信息变化,因此可作为多机协同的有效载体。无人机通过信息素地图的融合记录集群对搜索区域的访问特性,来实现机间协同,可适用于大规模集群系统^[12]。

1 协同搜索问题建模

1.1 问题描述

无人机集群执行搜索任务时飞行控制系统由任务层、决策层、执行层组成^[13]。任务层由地面站控制,针对搜索任务向集群发出控制指令,传送给决策层。决策层收到控制指令后,机载计算机结合本机传感器获取的环境信息、UAV 状态信息以及通信网络中传递的它机信息进行决策,将生成的决策指令传递给执行层。执行层在接收到指令后对本机进行调整,以达到期望的飞行状态,并对目标区域展开搜索,最终将更新后 UAV 信息和搜索结果传回决策层及地面站,执行层由无人机机载飞行控制器实现。无人机集群协同搜索任务示意图如图所示:

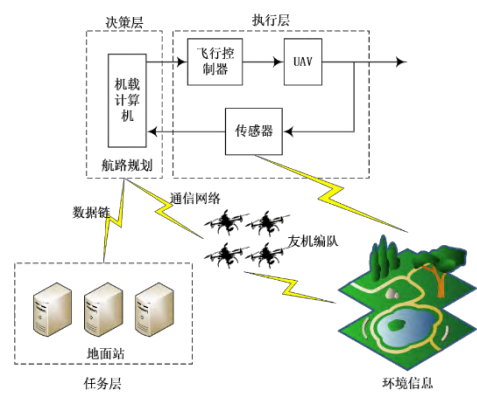


图 1 无人机集群协同搜索任务示意图
Fig.1Diagram of UAV swarm cooperative search

无人机集群协同搜索是由多架无人机采用集群的方式完成搜索任务，应满足如下原则：

表 1 无人机集群协同搜索原则
Table 1The principle of UAV swarm cooperative search

条件	原则
搜索效率	覆盖率高 重叠率低 搜索时间短
搜索范围	不飞出搜索边界 不进入非搜索区域
初始位置	搜索效率对集群编队的初始位置不敏感
抗毁性	搜索效率受单机故障影响小

无人机集群和信息素地图的任务状态包含三部分，如图 2 所示。从无人机的行为而言，包含搜索、信息交互、决策；从数字信息素而言，包含数字信息素地图的更新、融合以及依据信息素选择航路。

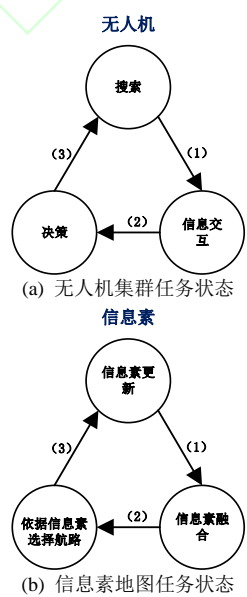


图 2 无人机集群及信息素地图任务状态
Fig.2 The task status of UAV swarm search

当无人机在当前时刻获取本机状态后，依据当前时刻本机所获取的信息素地图做出最优路径决策，确定下一时刻无人机的目标位置。随着无人机位置的更新，无人机需要实时更新本机信息素地图。同时一旦达到通信条件，无人机需向通信网络中发送本机信息素地图并接收它机的信息素地图，完成信息素地图的融合，实现多机协同，并以此作为新的本机信息素地图开始下一个搜索流程，直至完成搜索任务。无人机的任务流程如图 3 所示：

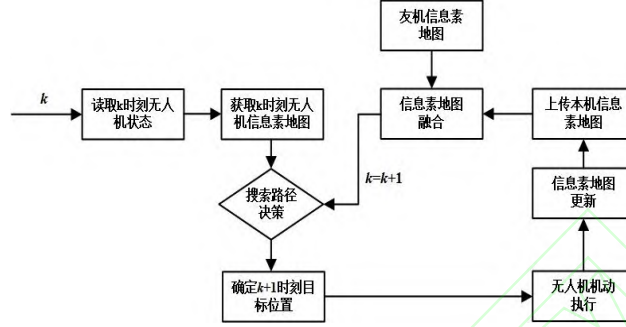


图 3 无人机集群任务流程
Fig.3 The task process of UAV swarm search

1.2 环境模型

搜索任务面对的是复杂且陌生的战场环境，在战前情报资源有限的情况下，可将待搜索区域分为待搜索区域和非搜索区域两部分。设无人机要执行搜索任务的区域为任意形状，搜索区域（the area of search）表示为 D_{aos} ，建立笛卡尔坐标系，分别用横向坐标 x 和纵向坐标 y 来数字化描述 D_{aos} 中任意一点的位置， x 和 y 为环境地图的地理坐标。其中

$$\begin{aligned} x_{\min} &= \min(x), x_{\max} = \max(x) \\ y_{\min} &= \min(y), y_{\max} = \max(y) \end{aligned} \quad (1)$$

搜索区域中待搜索区域用白色表示，非搜索区域用阴影表示。用一个与搜索区域外切的矩形来扫描搜索区域，定义该矩形为环境地图如图 4 所示，则环境地图中任意一点的位置可以表示为：

$$\begin{aligned} g_{i,j} &= \{(x, y) | (x, y) \in D_{aos}\} \\ x &\in [x_{\min}, x_{\max}], y \in [y_{\min}, y_{\max}] \end{aligned} \quad (2)$$

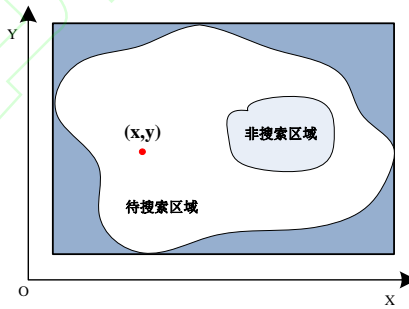


图 4 环境地图
Fig.4 The environment map

1.3 UAV 模型

不考虑无人机在机动过程中的动力学约束，任务过程中无人机的飞行速度保持不变。对搜索区域进行栅格化，规定无人机在下一时刻可以向当前时刻 8 个相邻的栅格运动，无人机运动模型如图 5 所示。其中 $D_{(x,y)}(k)$ 为 k 时刻无人机的位置。

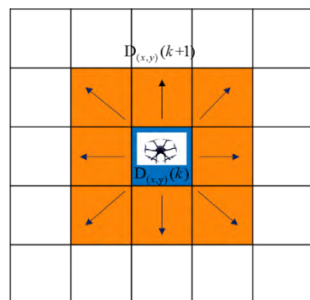


图 5 无人机运动模型
Fig.5 The motion model of UAV

1.4 通信模型

采用两种通信模型，分别是有外部节点的星型网络通信^[14]和无外部节点的自组织网络通信^[15]。

有外部节点的星型网络通信是指在集群内部各机之间不进行直接通信而是在外部设置专门的中央通信站负责与各无人机通信，通信模型如图 6 所示。各机只与中央通信站进行单点通信，要求集群内部的所有无人机以广播的形式向中央通信站发送信息，中央通信站作为接收机将所有单机的信息整合后分时段向各机广播信息。该通信网络采用时分多址(TDMA)的形式，任务过程中的通信阶段是若干周期性的不连续的时间段，每一个通信周期内为每架无人机分配若干时隙，每个时隙内各架无人机与中央节点的信息收发是相互独立的，目的是防止集群通信时发生信息堵塞。在不通信时各机保持静默状态，在通信时段各机统一与中央通信站进行通信，集群内各机保持始终通信同步。

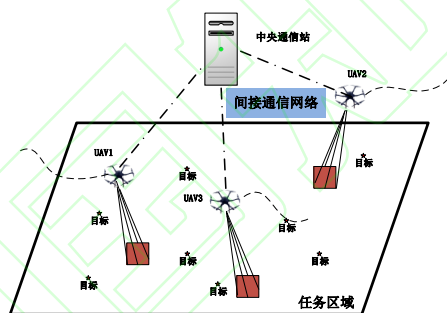


图 6 有外部节点的星型网络通信示意图
Fig.6 The diagram of star network communication with external nodes

与外部节点的星型网络通信不同，无外部节点的自组织网络通信不设置外部中央通信站，集群内部一定范围内的无人机自行组网进行通信。自组织网络通信模型如图 7 所示。由于每架无人机所携带的通信设备通信能力有限，因此只有当其他无人机进入其通信半径之内，两机才可建立通信网络。自组织网络通信是一种局部范围内的全时直接通信，即认为通信是连续的。这种无人机集群内部飞行自组网的通信方式则摆脱了外部通信设施的限制，网络中所有的无人机执行机-机通信，将有利于扩大集群规模，提高无人机集群系统的能力。

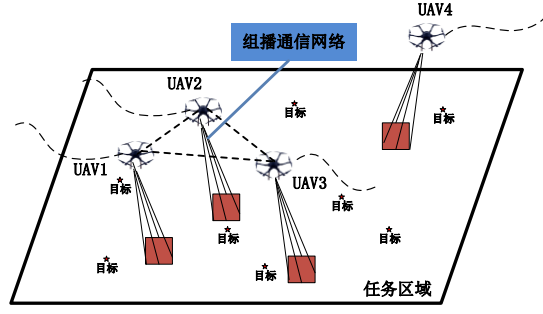


图7 无外部节点的自组织网络通信示意图

Fig.7 The diagram of self-organizing network communication without external nodes

1.5 信息素模型

蚁群在觅食过程中,可以通过分泌信息素并利用信息素的传播、挥发等特性来引导整个蚁群向有实物的区域快速移动^[16,17]。信息素是定义在栅格中,具有生物信息素的分泌、传播、挥发等物理特性,并对周围栅格无人机具有吸引和排斥能力的数字量^[18]。同样,我们模仿自然界中蚁群觅食的机理,定义无人机集群的信息素地图。无人机可以在信息素地图上写入新的信息同时也可以从地图上读取现有的信息。为了数字化的描述信息素地图,我们用一个 $m \times n$ 的矩阵 P 来定义信息素地图:

$$P = (p_{i,j})_{m \times n} \quad (3)$$

式中: $p_{i,j}$ 代表数字信息素地图中栅格 (i,j) 中信息素的浓度。

定义数字信息素具有如下规则^[16-19]:

(1)数字信息素分为两类:排斥信息素和吸引信息素,分别用 $p_{i,j}^r$ 和 $p_{i,j}^a$ 来表示二者的浓度。吸引信息素用于标记长期未访问的搜索区域以吸引更快访问,主要对外物起吸引作用,即吸引外物进入该区域;而排斥信息素用于标记已访问的搜索区域以防止重复访问,主要对外物起抗拒作用,即阻止外物进入该区域^[18]。在信息素矩阵 P 中,每一个元素 $p_{i,j}$ 可以视作 $p_{i,j}^r$ 和 $p_{i,j}^a$ 的合成,即

$$p_{i,j} = f_{\text{combine}}(p_{i,j}^r, p_{i,j}^a) \quad (4)$$

(2)排斥信息素 $p_{i,j}^r \geq 0$, 吸引信息素 $p_{i,j}^a \leq 0$, 并且用 $|p_{i,j}^r|$ 和 $|p_{i,j}^a|$ 来代表两种信息素的作用强度。无人机总是倾向于向排斥信息素浓度低、吸引信息素浓度高的区域移动。

(3)排斥信息素和吸引信息素都具有三种模式:分泌、扩散、挥发,分别用 $f_{\text{deploy}}(\cdot)$ 、 $f_{\text{diffusion}}(\cdot)$ 、 $f_{\text{evaporation}}(\cdot)$ 来表示三种模式在信息素浓度更新中的规则,即

$$p_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) + f_{\text{deploy}}(\cdot) + f_{\text{diffusion}}(\cdot) + f_{\text{evaporation}}(\cdot) \quad (5)$$

通过采用不同的信息素更新规则,可以适应不同的任务。

(4)集群中的每架无人机都拥有一张本机的信息素地图,第 U 架无人机的信息素地图表示为 P^U 。除此之外,通信节点中拥有一张全局的信息素地图 P_{net} 。当无人机进行通信时,通过通信网络,各无人机的本机信息素地图相互融合组成全局信息素地图。

2 以信息素为引导机制的无人机集群协同搜索算法

2.1 环境地图向信息地图的映射及初始化

为了建立信息素地图,我们用 $D_{\text{aos}} \rightarrow P$ 来表示环境地图到信息素地图的映射。映射规则在算法 1 中呈现。

算法 1 环境地图向信息地图的映射及初始化

输入：环境地图 $\{(x, y) | (x, y) \in D_{aos}\}$

输出：信息素地图 $P = (p_{i,j})_{m \times n}$

step1: 搜索区域矩形化

$$x_{\min} = \min(x), x_{\max} = \max(x) \quad \text{其中 } (x, y) \in D_{aos}$$

$$y_{\min} = \min(y), y_{\max} = \max(y)$$

$$D = \{(x, y) | x \in [x_{\min}, x_{\max}], y \in [y_{\min}, y_{\max}]\}$$

step2: 扩展矩形区域

$$x'_{\max} = x_{\max} + \Delta x, x'_{\min} = x_{\min} - \Delta x$$

$$y'_{\max} = y_{\max} + \Delta y, y'_{\min} = y_{\min} - \Delta y$$

$$D' = \{(x, y) | x \in [x'_{\min}, x'_{\max}], y \in [y'_{\min}, y'_{\max}]\}$$

step3: 搜索区域栅格化

将 D' 栅格化为 $m \times n$ 个方格，每一个方格的中心用 $(x(i), y(j))$ 来表示，其中

$$x(i) = x'_{\min} + \frac{2i-1}{2m} \times (x'_{\max} - x'_{\min})$$

$$y(j) = y'_{\min} + \frac{2j-1}{2n} \times (y'_{\max} - y'_{\min})$$

step4: 构造信息素矩阵 $P = (p_{i,j})_{m \times n}$

$$p_{i,j} = \begin{cases} +\infty & (x(i), y(j)) \notin D_{aos} \text{ or } (x(i), y(j)) \in D_{no\ fly\ zone} \\ 0 & (x(i), y(j)) \in D_{aos} \end{cases}$$

算法 1 的整个过程如图 8 所示。

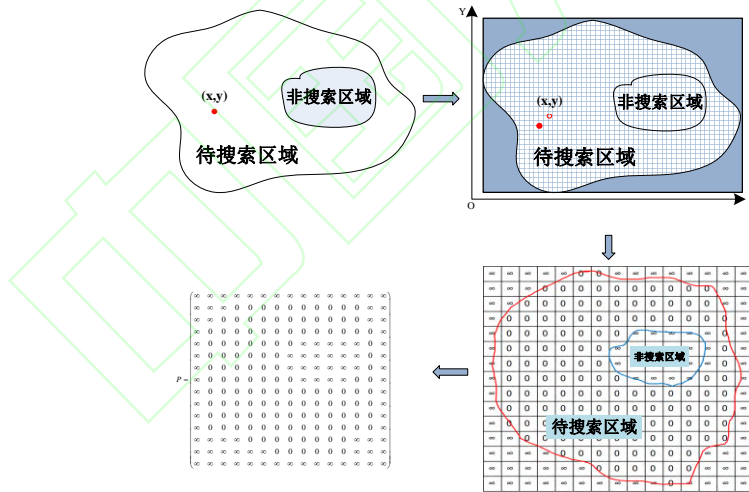


图 8 环境地图向信息素地图的映射
Fig.8 Environment map to pheromone map

2.2 无人机集群对地静目标搜索机制

针对地面静止目标，在一定时间内无人机集群搜索的覆盖面积越大则发现目标的可能性越大，因此，用一定时间内的搜索面积覆盖率来表征搜索效率的大小。因此，在不考虑回访、重点搜索等复杂任务场景下，针对搜索地面静止目标的任务场景，我们定义信息素只有排斥信息素一种，且排斥信息素只具备分泌功能，不具备挥发和扩散功能。因此，网格 (i, j) 的信息素定义为：

$$p_{i,j} = f_{\text{combine}}(p_{i,j}^r, p_{i,j}^a) = p_{i,j}^r \quad (6)$$

$$p_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) + g_{\text{deploy}}(r_{\text{pos}}(t))$$

无人机集群搜索地面静止目标时的搜索机制总共分为两个阶段：单机搜索阶段、多机通信阶段。在单机搜索阶段，每个无人机是一个独立的个体，相互之间没有通信，各自按照设计的搜索规则和决策规则进行不间断搜索，并按照更新规则更新本机的信息素地图。在多机通信阶段，无人机集群进行协同，实现信息素地图的融合和更新。通信完成后，各无人机按照更新后的信息素地图继续开始搜索。

2.3 单机搜索阶段无人机集群的信息素地图更新规则

在搜索过程中无人机保持信息素地图的更新，无人机每搜索一步，信息素地图更新一次。更新规则如式 7 所示：

$$p_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) + g_{\text{deploy}}(r_{\text{pos}}(t))$$

$$g_{\text{deploy}}(t) = \begin{cases} k & r_{\text{pos}}(t) \in (i, j) \\ 0 & r_{\text{pos}}(t) \notin (i, j) \end{cases} \quad (7)$$

式中： $r_{\text{pos}}(t)$ 是无人机在 t 时刻的位置； k 是无人机搜索过一个栅格后在该栅格内分泌的排斥信息素的浓度参数。同时我们为每架无人机定义一个轨迹矩阵

$M_{\text{trace}} = (m_{i,j})_{m \times n}$ ， M_{trace} 共有 $m \times n$ 个元素，分别对应信息素矩阵 P 中的 $m \times n$ 个栅格。轨迹矩阵 M_{trace} 随无人机的位置变化同步更新，更新规则如下：

$$m_{i,j}(t+1) = \begin{cases} m_{i,j}(t) + 1 & r_{\text{pos}}(t) \in (i, j) \\ m_{i,j}(t) & r_{\text{pos}}(t) \notin (i, j) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $m_{i,j}(0) = 0$

在通信阶段轨迹矩阵 M_{trace} 保持不变，即

$$M_{\text{trace}}(kT - T_c) = M_{\text{trace}}(kT) \quad (9)$$

式中： k 代表第 k 个搜索周期； T 为一个任务周期的时长； T_c 为一个任务周期中通信周期的时长。

2.4 通信阶段信息素地图更新规则

(1) 星型网络通信时信息素地图更新规则：

星型网络通信采用了分时通信，所以无人机的搜索过程分为两个阶段，自主搜索阶段和通信阶段。如图 9 所示。



图 9 星型网络通信流程
Fig.9 The process of star network communication

执行任务期间，所有无人机同步行动，在搜索阶段全部保持静默状态，设一个任务周期中搜索周期时长为 T_s 。在这一阶段各无人机按照 2.3 所设计的信息素地图更新规则进行本机信息素地图的更新。自主搜索阶段结束后，无人机集群同步进入通信阶段，通信周期时长为 T_c 。 T 为一个完整的任务周期，并且为可变周期。

$$T = T_s + T_c \quad (10)$$

整个任务流程如下所示：

step1: 无人机进入搜索阶段，更新 P^U ，搜索时间为 T_s ；

step2: 无人机进入通信阶段, 更新 P_{net} , 通信时间为 T_c ;

step3: 完成信息交换, 进入下一个任务周期。

信息交互过程包括三个阶段: 上传、融合、下载。无人机集群进入通讯状态后, 首先集群内的各无人机向中央通信站上传本机在第 k 个搜索周期即 $[(k-1)T, (k-1)T + T_s]$ 内由搜索引起的信息素地图的变化量 $\Delta P^U(k)$, 我们将其定义为单机信息素增量矩阵。则第 u 架无人机在第 k 个搜索周期内的单机信息素增量矩阵的表达式为

$$\Delta P^U(k) = P^U(kT - T_c) - P^U((k-1)T) \quad (11)$$

上传结束后进入单机信息素地图与全局信息素地图的融合阶段。设 $P_{\text{net}}((k-1)T)$ 为第 $k-1$ 个搜索周期结束后中央通信站所保留的全局信息素地图, $P_{\text{net}}(kT)$ 为第 k 个搜索周期结束后中央通信站所保留的全局信息素地图, 则单机信息素地图与全局信息素地图融合的表达式为

$$P_{\text{net}}(kT) = P^U(kT) = \sum_{u=1}^{N_s} \Delta P^U(k) + P_{\text{net}}((k-1)T) \quad (12)$$

融合结束后各无人机从中央通信站下载融合后的全局信息素地图, 以此来作为本机新的单机信息素地图, 并按照该地图继续进行搜索任务, 进入下一个搜索周期。

算法 2 星型网络通信阶段信息素地图更新

输入: $P_{\text{net}}((k-1)T)$ $P^U(kT - T_c)$ $P^U((k-1)T)$

输出: $P_{\text{net}}(kT)$ $P^U(kT)$

step1: $\Delta P^U(k) = P^U(kT - T_c) - P^U((k-1)T)$

step 2: $P_{\text{net}}(kT) = P^U(kT) = \sum_{u=1}^{N_s} \Delta P^U(k) + P_{\text{net}}((k-1)T)$

step3: $P^U(kT) = P_{\text{net}}(kT)$

(2) 自组织网络通信时信息素地图更新规则:

自组织网络通信为全时直接通信, 设无人机配置的直接通信设备最远通信距离为 R , 任意两架无人机之间的距离为 $L_{i,j}$, 集群内部的无人机之间根据 R 和 $L_{i,j}$ 自行组网。一旦 $L_{i,j} \leq R$ 则 i,j 两架无人机组网成功, 两机之间的通信网络建立。自组织网络通信流程如图 10 所示。



图 10 自组织网络通信流程
Fig.10 The process of Self-organizing network communication

整个任务流程如下所示:

step1: 无人机进入搜索阶段, 更新 P^U ;

step2: 无人机集群局部组网成功, 进入通信阶段, 更新 P^U , 若组网不成功, 维持搜索阶段, 更新 P^U ;

step3: 通信完成, 继续搜索任务

设 t 时刻, 无人机 U 的通信范围内有 n 架无人机, 编号分别为 U_1, U_2, \dots, U_n , 其信息素地图分别为 $P^{U_i}(t)$ ($L_{U, U_i} \leq R$)。通信前无人机 U 的信息素地图为 $P^U(t)$, 通信后无人机 U 的信息素地图更新为 $P^U(t)'$, 更新的规则为:

$$P^U(t)' = P^U(t) + \sum_{i=1}^n P^{U_i}(t) \quad (13)$$

通信结束后, 无人机 U 的信息素地图更新完成, 依据新的信息素地图继续展开搜索任务, 直到下一次与其他无人机组网成功。

算法 3 自组织网络通信阶段信息素地图更新

输入: $P^U(t)$ 输出: $P^U(t)'$ step1: 判断 U_i : if $L_{U,U_i} \leq R$ step 2: $P^U(t)' = P^U(t) + \sum_{i=1}^n P^{U_i}(t)$ step 3: $P^U(t) \leftarrow P^U(t)'$

2.5 决策规则

无人机依据本机当前时刻的运动状态和信息素地图来做出实时决策, 指导无人机下一时刻的运动, 即:

$$f_{\text{behavior}} : P(t) \rightarrow \text{Position}(t+1)$$

$$\text{Position}(t) = (i, j)$$

$$\text{Position}(t+1) = \{(i+a, j+b) \mid a, b \in \{-1, 0, 1\}\}$$

(14)

采取一种离散化的控制指令, 即无人机需要遍历一系列坐标点, 而不是遵循连续的速度指令控制, 以此降低问题的规模和模型求解的复杂度。提出两种决策方式, 一种是局部决策, 另一种是全局决策。

局部决策是指无人机仅根据周围栅格的信息素浓度做出决策。在决策前, 应先从本机信息素地图 $P(t)$ 中提取局部信息素地图 $P_{\text{local}}(t)$, $P_{\text{local}}(t)$ 是一个 3×3 的矩阵。

$$P_{\text{local}} = \begin{pmatrix} p_{i-1,j+1} & p_{i,j+1} & p_{i+1,j+1} \\ p_{i-1,j} & p_{i,j} & p_{i+1,j} \\ p_{i-1,j-1} & p_{i,j-1} & p_{i+1,j-1} \end{pmatrix}$$

显然 $P_{\text{local}}(t)$ 代表栅格 (i, j) 及周围栅格的信息素信息。 $P_{\text{local}}(t)$ 作为信息素矩阵 $P(t)$ 的子矩阵, 代表将当前时刻无人机所在栅格以及其周围 8 个栅格的信息。

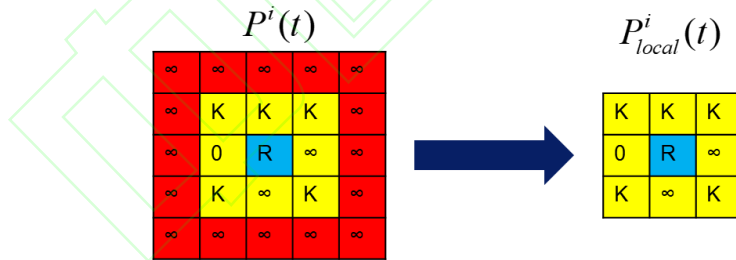


图 11 提取局部信息素地图
Fig.11 Extract local pheromone map

为了增大搜索面积覆盖率, 下个步长内无人机应该向信息素浓度最小的栅格移动。

$$f_{\text{behavior}}(P_{\text{local}}(t)) = \text{Position}^*(t+1)$$

$$\text{Position}^*(t+1) = \min \{ p_{i+a, j+b} \mid a, b \in \{-1, 0, 1\} \}$$

全局信息决策则要利用整张信息素地图的信息, 而为了利用全局信息同样要定义一个 3×3 的矩阵 P_{global} 。为了得到 P_{global} 需要对信息素矩阵 P 进行压缩, 意味着 P_{global} 需要包含 P 中所有的信息, 得到 P_{global} 的计算步骤所下所示:

算法 4 压缩信息素矩阵 P 得到 P_{global}

输入: P 、 $\text{Position}(t) \in (i, j)$

算法 4 压缩信息素矩阵 P 得到 P_{global}

输出: P_{global}

step1: 定义 $P' = (p'_{i,j})_{m \times n}$:

$$p'_{i,j} = \begin{cases} 0 & p_{i,j} = +\infty \\ p_{i,j} & p_{i,j} \neq +\infty \end{cases}$$

step2: 把 P' 压缩成 3×3 矩阵 P'_{global}

$$P'_{\text{global}} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{a=i,b=n} p'_{a,b}}{i \times (n-j+1)} & \frac{\sum_{a=m,b=n} p'_{a,b}}{m \times (n-j+1)} & \frac{\sum_{a=m,b=n} p'_{a,b}}{(m-i+1) \times (n-j+1)} \\ \frac{\sum_{a=i,b=1} p'_{a,b}}{i \times n} & +\infty & \frac{\sum_{a=m,b=1} p'_{a,b}}{(m-i+1) \times n} \\ \frac{\sum_{a=1,b=j} p'_{a,b}}{i \times j} & \frac{\sum_{a=1,b=1} p'_{a,b}}{m \times j} & \frac{\sum_{a=m,b=1} p'_{a,b}}{(m-i+1) \times j} \end{pmatrix}$$

step3: $P'_{\text{local}} \leftarrow P_{\text{local}}$: 把 P_{local} 中不等于 $+\infty$ 的元素用 0 代替

step4: $P_{\text{global}} = P'_{\text{local}} + P'_{\text{global}}$

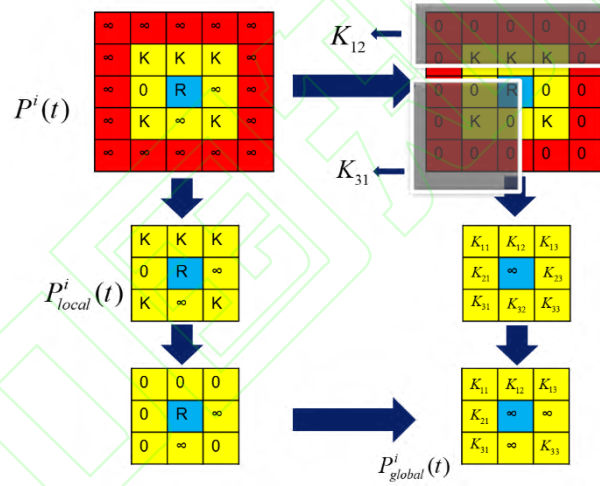


图 12 提取全局信息素地图
Fig.12 Extract global pheromone map

在得到两个 3×3 的矩阵 P_{global} 和 P_{local} 之后, 根据这两个矩阵的值来生成无人机的控制指令。移动规则为: 如果栅格 (i, j) 周围的 8 个栅格中有从未被搜索过的栅格, 即 P_{global} 中含有 0 元素, 那么无人机将在下一时刻优先搜索该栅格。如果周围的 8 个栅格已经全部被搜索过, 则直接搜索 P_{global} 中信息素浓度最小的栅格。

3 仿真分析

为了验证模型和算法的有效性进行仿真实验, 仿真环境为 I7-6700, 主频 2.6 赫兹, 8G 内存, 基于 Matlab2015a 平台进行。设任务区域为 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的矩形区域, 栅格化后映射到笛卡尔坐标系为 100×100 的方格, 每个栅格为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。其中非搜索区域为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的矩形区域, 四个顶点坐标分别为 $(60, 60)$ 、 $(60, 80)$ 、 $(80, 60)$ 、 $(80, 80)$ 。初始化后的搜索环境如图 13 所示。

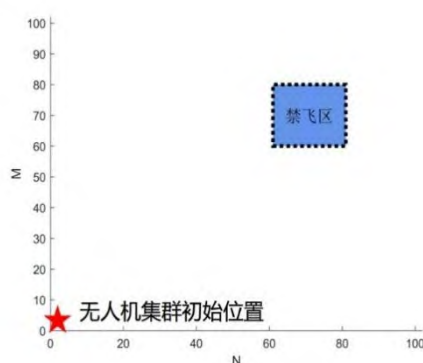


图 13 搜索环境初始化
Fig.13 Search environment initialization

初始化的信息素地图如图 14 所示, 其中黑色区域为信息素浓度为 $+\infty$ 的区域, 表示搜索边界和非搜索区域, 白色区域为信息素浓度为 0 的区域, 代表待搜索区域。

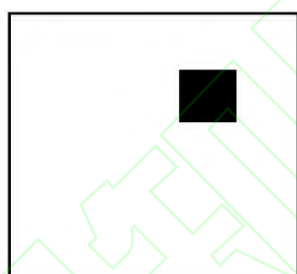


图 14 信息素地图初始化
Fig.14 Pheromone map initialization

执行任务的无人机集群从相同位置进入搜索区域, 初始进入点坐标为(1,1), 设无人机的平飞速度为 20m/s, 仿真步长为 $\Delta t = 5s$, 仿真总步长设置为 1000。广播通信时, 无人机与中央通信站通信执行一次通信所需时间在仿真环境中占据 50 步长, 剩余步长全部分配为搜索时间; 组播通信时, 无人机的通信半径为 100m。假设任务环境为无遮挡的平地区域, 各无人机的飞行高度可以根据防撞情况做出调整。

3.1 实验一决策方式对搜索效率的影响

分别在星型网络通信和自组织网络通信两种通信方式下进行仿真实验, 集群规模设置 20 架无人机, 搜索总步长为 1000steps, 仿真结果如下。

(1) 星型网络通信模式下决策方式对搜索效率的影响

表 2 星型网络通信模式下搜索结果
Table 2 Multi-UAVs search result instar network communication

决策方式	集群规模	T_s	T_c	覆盖率
随机决策	20	200	50	18.7321%
局部信息决策	20	200	50	70.1458%
全局信息决策	20	200	50	82.8438%

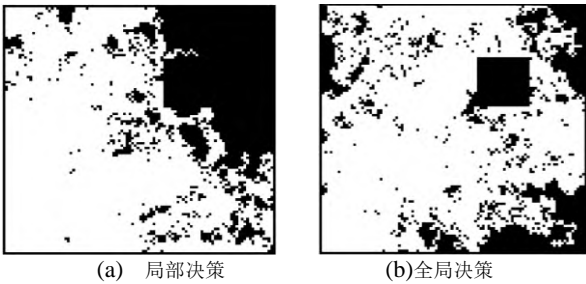


图 15 星型网络通信模式下搜索效果图
Fig.15 Search rendering instar network communication

(2) 组播通信模式下决策方式对搜索效率的影响

表 3 自组织网络通信模式下搜索结果
Table 3 Multi-UAVs search result by self-organizing network communication

决策方式	集群规模	覆盖率
随机决策	20	20.1576%
局部信息决策	20	65.4583%
全局信息决策	20	76.5625%

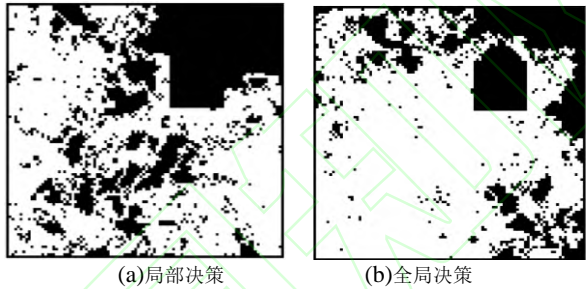


图 16 自组织网络通信模式下搜索效果图
Fig.16 Search rendering in self-organizing network communication

结论：从实验一、二所示结果来看，提出的两种决策方式与随机决策相比优势明显，能有效引导无人机向未被搜索区域移动，满足了 1.1 中原则(1)提出的要求。

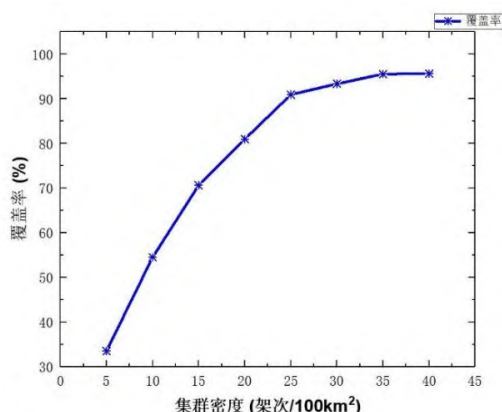
与局部信息指导下的决策相比无人机集群在全局信息指导下进行决策时覆盖率有明显的提升。这是因为全局信息能够更全面的反映集群对整个区域的搜索情况，拓宽了单架无人机的视野，能够更好的引导无人机向未被搜索过的区域移动，避免了集群陷入局部重复搜索。

搜索效果图直观的展示了无人机集群对搜索区域的覆盖情况，其中黑色代表未被搜索的区域，白色代表已被搜索的区域，从图中可以看出，在整个搜索过程中无人机集群完全未进入非搜索区域，达到了设置禁飞区的目的，满足了 1.1 中原则(4)提出的要求。

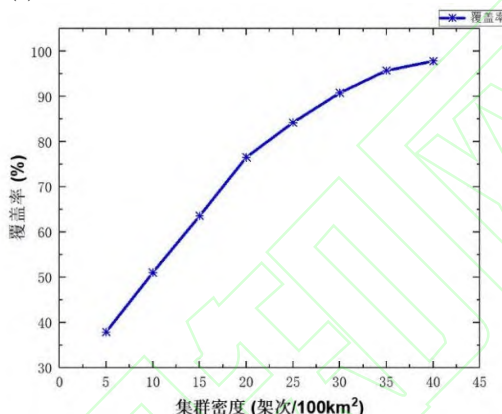
3.2 实验二集群密度对搜索效率的影响

集群能力的涌现不是简单的靠无人机数量的叠加，一味的增加数量不但会造成资源的浪费，而且会增大对集群的控制难度，甚至增加集群暴露的危险和被敌方摧毁的概率，因此需要探究集群密度对搜索效率的影响来为指挥者提供有效的参考。

在 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的任务区域内，将无人机的数目分别设置为 5、10、15、20、25、30、35、40，分别在两种通信方式下进行仿真实验，决策方式采用全局信息指导下的决策，搜索总步长为 1000steps，广播通信的搜索时长设置为 200steps，仿真结果如下。



(a)星型网络通信下覆盖率随集群密度变化曲线



(b)自组织网络通信下覆盖率随集群密度变化曲线

图 17 星型网络通信和自组织网络通信下覆盖率随集群密度变化曲线

Fig.17 The curve of coverage ratio changing with UAVs density in star network communication and self-organizing network communication

结论：从两种通信模式下覆盖率随集群密度变化曲线可以看出，星型网络通信模式下在集群密度小于 25 架次/100km²时覆盖率增长较快，覆盖率达到 90%，25 架次/100km²之后覆盖率增长速度明显下降，再增加集群密度覆盖率几乎没有增长，因此，星型网络通信时最佳集群密度为 25 架次/100km²。自组织网络通信时覆盖率增长速度随集群密度增加逐渐放缓，但未出现明显的下降，当集群密度达到 35 架次/100km²时覆盖率达到 95%，因此自组织网络通信时最佳集群密度为 35 架次/100km²。

3.3 实验三通信方式搜索时长的比较

对三种通信方式下的搜索时长进行比较，要求在覆盖率达到 90%的情况下比较所花费的时长，以此来评价三种通信方式下的搜索速度。无人机数目设置为 30 架，仿真结果如下。

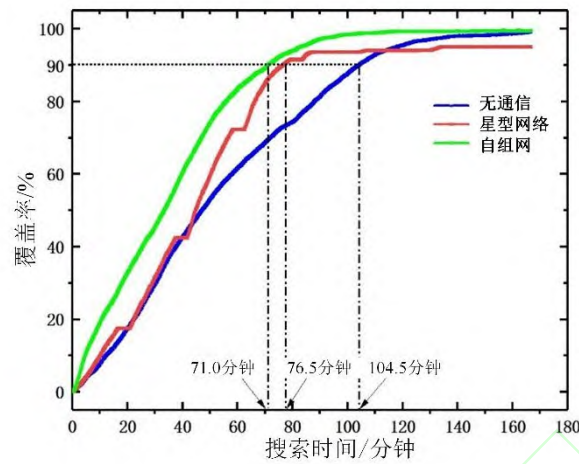
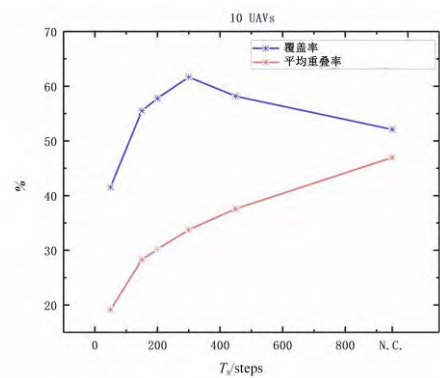


图 18 覆盖率随搜索时间变化曲线
Fig.18 The curve of coverage ratio changing with time

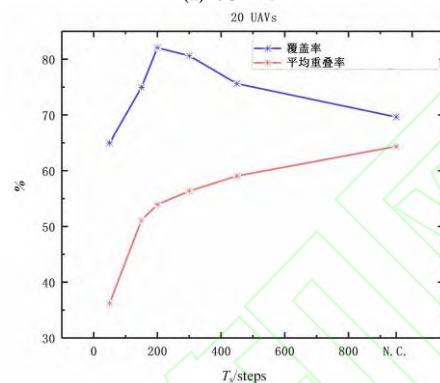
当覆盖率达到90%时，自组织网络通信耗时最短，共用时71.0 min，星型网络通信用时76.5 min，无通信用时最长，共计104.5 min。实验说明自组织网络通信搜索速度最快，这也体现出集群自组网这种通信方式最适用于集群的能力涌现，一方面省去了大量集群与外部通信设施进行通信时所带来的时间延迟，另一方面集群具有自组织能力，不受外部通信条件的影响。

3.4 实验四星型网络通信下搜索占空比对搜索效率的影响

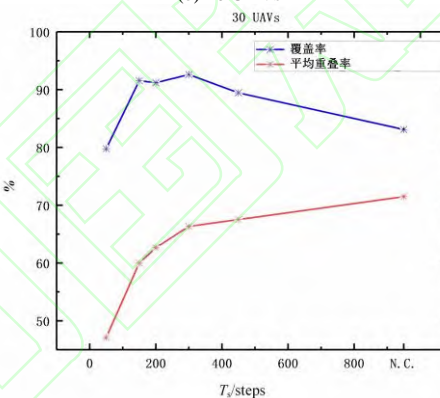
针对星型网络通信，我们设置了仿真实验来探究搜索占空比对搜索效率的影响，希望能够找到最佳的搜索占空比。将 T_c 设置为固定值50steps， T_s 分别设置为50 steps、150 steps、200 steps、300 steps、450 steps、950 steps,在总步长一定及 T_c 固定不变的情况下 T_s 决定了搜索的占空比，也决定了通信次数的多少， T_s 为50 steps、150 steps、200 steps、300 steps、450 steps、950 steps时集群的通信次数分别为10、5、4、3、2、1。仿真采用全局信息指导下的决策规则，搜索总步长为1000steps，无人机的数量分别设置为10、20、30、40，仿真结果如图19所示。



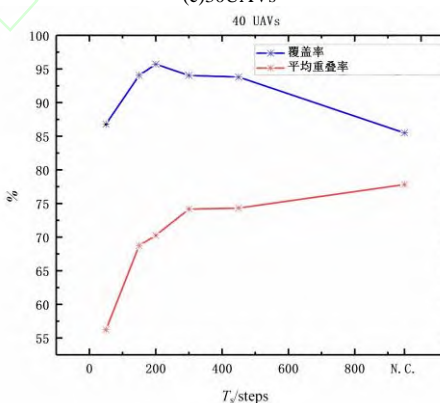
(a) 10 UAVs



(b) 20 UAVs



(c) 30 UAVs



(d) 40 UAVs

图 19 不同无人机数目下搜索效率随占空比的变化

Fig.19 The curve of coverage ratio changing with duty search cycle for different swarm size

从图 19 中可以看出覆盖率越高平均重复率越低。从实验结果来看, 无人机数目为 10、20、30、

40 时, 最佳 T_s 分别为 300steps、200steps、300steps、200steps。

选取每个无人机架次下的最佳 T_s , 作出实时覆盖率变化图线如 20 所示。

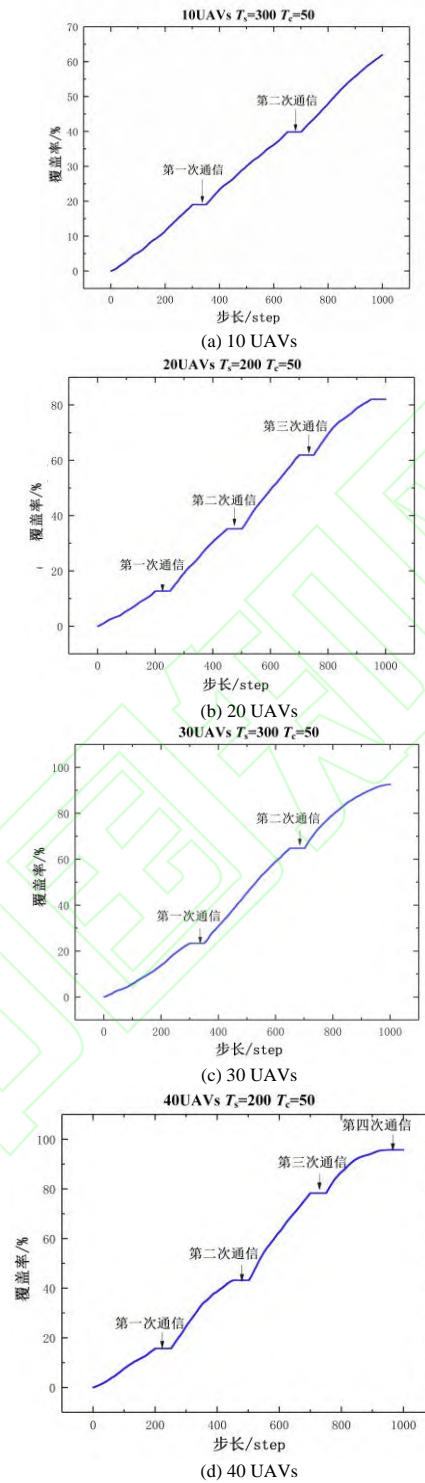


图 20 不同架次最佳搜索占空比下的实时覆盖率变化曲线
Fig.20 The changing curve of coverage ratio in best duty cycle for different swarm size

3.5 实验五无人机故障对搜索效率的影响

无人机集群在执行任务时必然会受到敌方火力威胁,在无人机发生故障时集群必须有较好的抗毁性,即搜索效率不能出现明显下降。本实验以广播通信为例进行, T_s 设置成 300steps, 集群共进行两次通信, 搜索总步长为 1000steps, 决策方式采用全局信息指导下的决策,无人机的数量为 10。在运行 100 步时无人机 1 发生故障退出,运行 400 步时无人机 5 发生故障退出,运行 700 步时无人机 10 发生故障退出,仿真结果如图 21 所示。

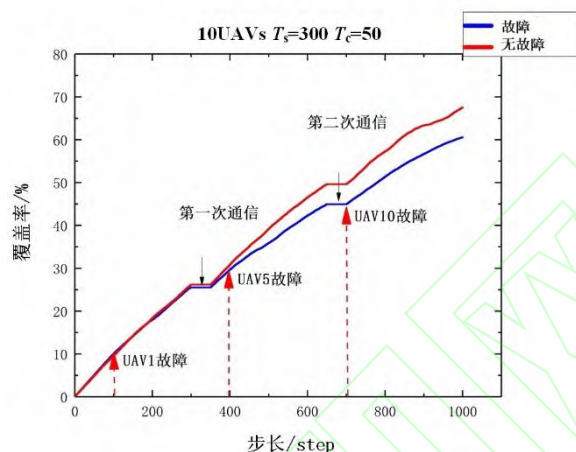


图 21 无故障和有故障时覆盖率实时变化曲线

Fig.21 The changing curve of coverage ratio in UAVs fault and no fault

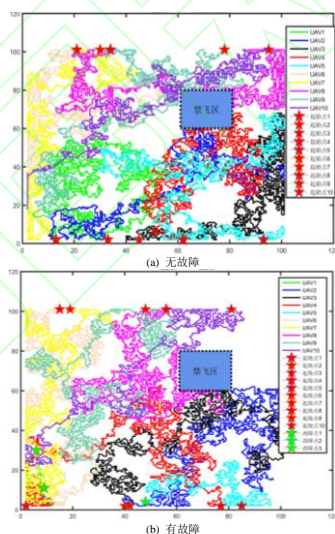


图 22 有故障和无故障时无人机搜索轨迹图

Fig.22 UAV search trajectory diagram with and without fault

图 22 中可以看出,红色曲线代表无故障时的覆盖率变化曲线,蓝色曲线代表三架无人机故障时的覆盖率变化曲线。从最终结果来看,在该算例中无故障时的覆盖率为 67.5%,10 架无人机中 3 架无人机故障时的搜索率为 60.6%。在 30%的无人机发生故障的情况下覆盖率损失仅为原覆盖率的 7.2%。与文献[7]进行的平行搜索在故障时的表现相比,信息素搜索模型体现出了较好的抗毁性,更加适应于复杂恶劣的作战环境,这也满足了 1.1 中原则(6)提出的要求。

3.6 实验六集群初始位置对搜索效率的影响

由于作战环境的未知性,敌我位置分布千变万化,所以指挥者指挥集群进入任务区域的位置也不尽相同,但搜索效果不能因为集群初始进入位置的不同而出现较大差异,因此本节探究不同初始位置

下的搜索效果，仿真共设置四种 10 架无人机的初始位置，如图 23 所示，其中红色五角星代表每架无人机的初始位置。

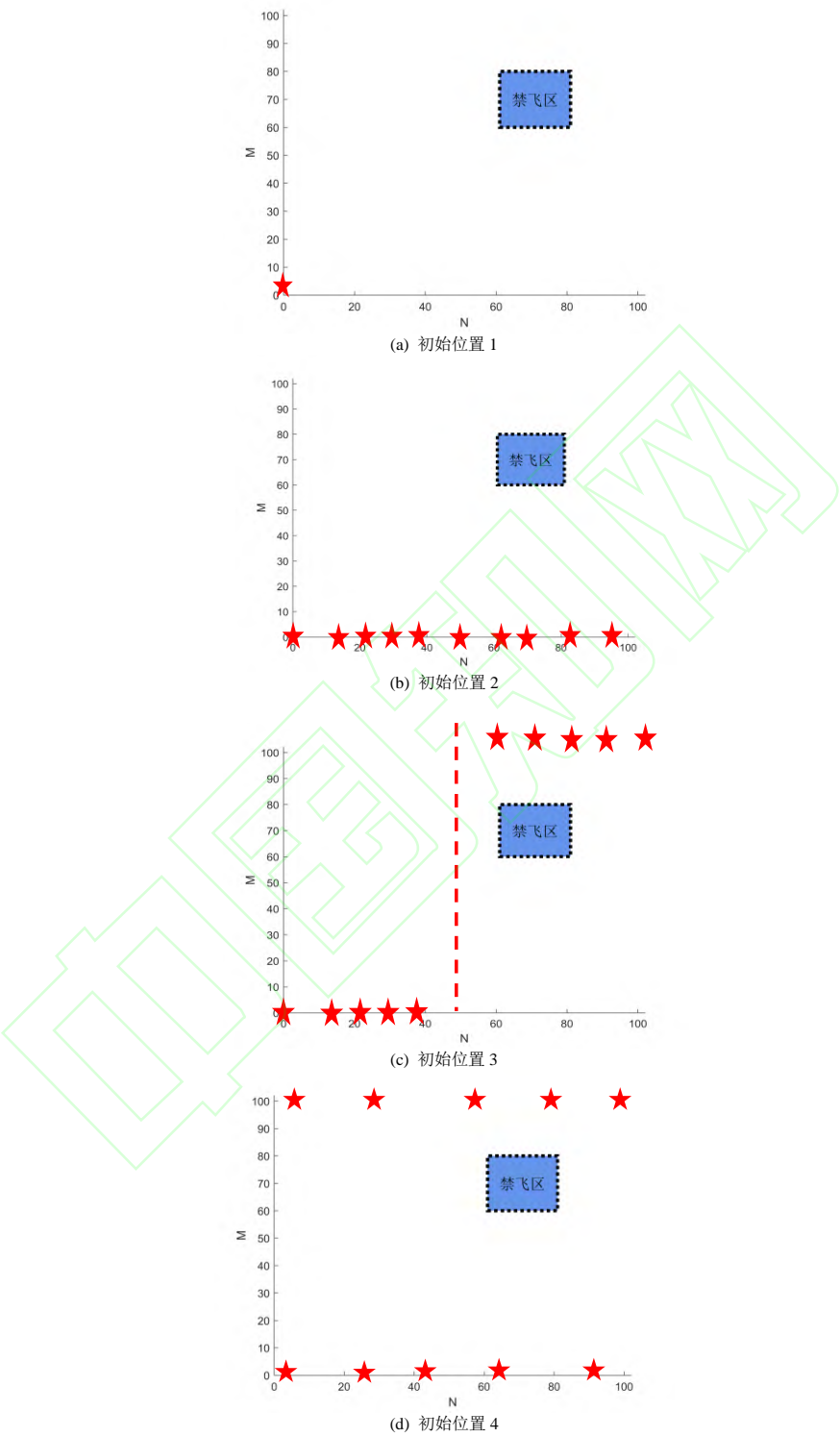


图 23 四种无人机集群初始位置
Fig.23 Four initial position of UAV swarm

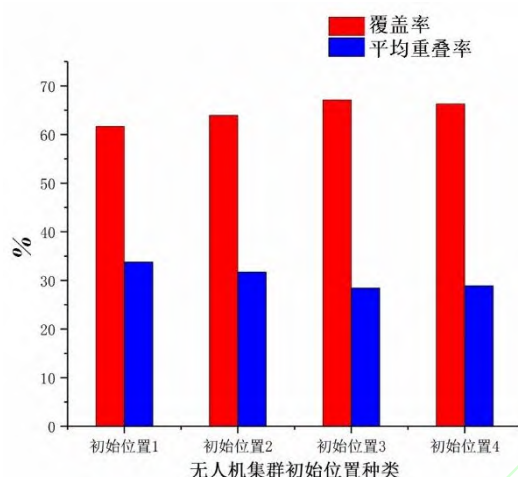


图 24 四种不同初始位置下的搜索覆盖率
Fig.24 The coverage ratio in 4 initial position

如图 24 所示, 四种初始位置下所对应的搜索覆盖率分别为 61.6875%、63.9583%、67.1042%、66.3041%。就四种初始位置而言覆盖率浮动在 10% 以内, 证明信息素搜索模型下的搜索效果受集群初始位置的影响不大, 搜索覆盖率对集群的进入位置不敏感, 集群在战场使用中的灵活性较高, 满足了 1.1 中的原则(5)所提出的要求。同时从搜索轨迹图中可以看出, 在整个任务过程中无人机集群始终没有飞出搜索边界, 满足了 1.1 中的原则(2)所提出的要求。

4 结论

1) 通过信息素地图的融合实现了多机协同, 很好的模拟了由外部节点的星型网络通信和无外部节点的自组织网络通信两种通信模式, 搜索覆盖率能够达到 90%, 集群具备抗毁能力。

2) 以信息素为引导机制的搜索模型能够对搜索区域和非搜索区域进行选择性的搜索, 同时能够避免无人机飞出搜索区域。

3) 针对搜索任务的决策阶段, 对仅依靠局部信息进行决策的方式做出了改进, 提出了一种利用全局信息的决策方式, 搜索效率的提升超过 10%。

4) 从无人机集群指挥者的角度出发, 给出了最佳集群密度、最佳搜索占空比, 验证了集群搜索效果受初始位置的影响较小。

算法未考虑无人机的动力学约束, 针对搜索过程中可能出现的动力学约束和信息素指引效果相矛盾的情况, 作者认为在后续研究中可以通过完善搜索流程和决策机制, 加入冲突处理模块和航路规划模块来确定无人机机动。

参考文献 (References)

- [1] 梁晓龙, 何吕龙, 张佳强等. 航空集群构型控制及其演化方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 277-287. (in Chinese).
LIANG X L, HE L L, ZHANG J Q, et al. Configuration control and evolutionary mechanism of aircraft swarm[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2019, 49(3): 277-287 (in Chinese).
- [2] 梁晓龙, 孙强, 尹忠海等. 大规模无人系统集群智能控制方法综述[J]. 计算机应用研究, 2015(1): 17-22.
LIANG X L, SUN Q, YIN Z H, et al. Review on large-scale unmanned system swarm intelligence control method[J]. Application Research of Computers, 2015(1): 17-22 (in Chinese).
- [3] HU J, XIE L, XU J, et al. Multi-agent cooperative target search[J]. Sensors, 2014, 14: 9408-9428.
- [4] Hu J, Xie L, Xu J, et al. Multi-agent cooperative target Search[C]// International Conference on Control Automation Robotics & Vision. IEEE, 2014.
- [5] 刘重, 高晓光, 符小卫. 带信息素回访机制的多无人机分布式协同目标搜索[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1998-2011.
LIU C, GAO X G, U X W. Multi-UAVs distributed cooperative target search algorithm with controllable revisit mechanism based on digital pheromone [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(9): 1998-2011. (in Chinese).
- [6] 彭辉, 沈林成, 朱华勇. 基于分布式模型预测控制的多 UAV 协同区域搜索[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 593-601.

- PENG H, GAO X G, FU X W. Multiple UAV cooperative area search based on distributed model predictive control [J]. ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA, 2010, 31(3): 593-601 (in Chinese).
- [7] 侯岳奇, 梁晓龙, 何吕龙, 等. 未知环境下无人机集群协同区域搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(2): 347-356.
- HOU Y Q, LIANG X L, HE L L, et al. Cooperative area search algorithm for UAV swarm in unknown environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(2): 347-356. (in Chinese).
- [8] 吴青坡, 周绍磊, 刘伟, 等. 基于集散式模型预测控制的多无人机协同分区搜索[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1414-1421.
- WU Q P, ZHOU S L, LIU W, et al. Multi-unmanned aerial vehicles cooperative search based on central-distributed model predictive control [J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1414-1421 (in Chinese).
- [9] 吴文超, 黄长强, 宋磊, 等. 不确定环境下的多无人机协同搜索航路规划[J]. 兵工学报, 2011, 32(11): 1337-1342.
- WU W C, HUANG C Q, SONG L, et al. Cooperative search and path planning of multi-unmanned air vehicles in uncertain environment [J]. ACTA ARMAMENTARII, 2011, 32(11): 1337-1342 (in Chinese).
- [10] 符小卫, 李建, 高晓光. 带通信约束的多无人机协同搜索中的目标分配[J]. 航空学报, 2014, 35(5): 1347-1356.
- FU X W, LI J, GAO X G. Target allocation in multi-UAV cooperative search with communication constraints[J]. ACTA AERONAUTICA ET ASTRONAUTICA SINICA, 2014, 35(5): 1347-1356 (in Chinese).
- [11] BERTUCCELLI L F, HOW J P. Robust UAV search for environments with imprecise probability maps[C]// European Control Conference Cdc-ecc 05 IEEE Conference on Decision & Control. IEEE, 2006.
- [12] 沈东, 魏瑞轩, 茹常剑. 基于数字信息素的无人机集群搜索控制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 591-596.
- SHEN D, WEI R Y, RU C J. Digital-pheromone-based control method for UAV swarm search [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 591-596 (in Chinese).
- [13] 朱创创, 梁晓龙, 张佳强等. 无人机集群编队控制演示验证系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1739-1747.
- ZHU C C, LIANG X L, ZHANG J Q. Demonstration and verification system for UAV swarm formation control. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1739-1747 (in Chinese).
- [14] WAN S G, MA X T, LI K. Application research of star wireless sensor network [J]. Communications Technology, 2009, 42(3): 173-176.
- [15] 刘昕. 军用无人机自组网技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 15-20.
- LIU X. Study of MANET for military UAVs [D] Nanjing: Nanjing University Of Science And Technology 2014: 15-20 (in Chinese).
- [16] PARUNAK H V, PURCELL M, O'CONNELL R. Digital Pheromones for Autonomous Coordination of Swarming UAV's[C]// 1st UAV Conference. 2002.
- [17] SAUTER J A, MATTHEWS R S, PARUNAK H V D, et al. Performance of digital pheromones for swarming vehicle control[C]// 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2005), July 25-29, 2005, Utrecht, The Netherlands. DBLP, 2005.
- [18] PARUNAK H V D, BRUECKNER S A, SAUTER J A. Digital pheromones for coordination of unmanned vehicles[C]// First International Joint Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems. DBLP, 2002.
- [19] BREEN M F, LESHNER A I. Maternal pheromone: a demonstration of its existence in the mouse (*Mus musculus*) [J]. Physiology and Behavior, 1977, 18(3): 527-529.