

4-15-2024

Research on Cross-domain Unmanned Swarm Cooperative Anti-submarine Search Method

Ning Wang

Air traffic control and navigation college, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; Shaanxi Province Lab. of Meta-synthesis for Electronic & Information System, Xi'an 710051, China, wnlearning@163.com

Xiaolong Liang

Air traffic control and navigation college, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; Shaanxi Province Lab. of Meta-synthesis for Electronic & Information System, Xi'an 710051, China, afeu_lxl@sina.com

Jiaqiang Zhang

Air traffic control and navigation college, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; Shaanxi Province Lab. of Meta-synthesis for Electronic & Information System, Xi'an 710051, China

Yueqi Hou

Air traffic control and navigation college, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; Shaanxi Province Lab. of Meta-synthesis for Electronic & Information System, Xi'an 710051, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Special Column is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Research on Cross-domain Unmanned Swarm Cooperative Anti-submarine Search Method

Abstract

Abstract: For the maritime ASW search, a cross-domain unmanned swarm cooperative search method is proposed in which USVs are used as the communication relay of UAVs. The digital grid map is used to characterize the mission area and the kinematic model of cross-domain platform is constructed. The cooperative method of cross-domain unmanned systems is proposed, and the distributed information fusion mechanism of unmanned systems is designed. The search objective function for heterogeneous platforms is designed to guide the unmanned systems to make real-time decisions in search task. The simulation results show that the proposed method can be effective to the proposed cross-domain unmanned swarm ASW search mission scenario, and by complementing each other, the search effectiveness of the cross-domain platforms can be improved.

Keywords

anti-submarine search, unmanned swarm, track planning, cross-domain cooperative, information interaction

Authors

Ning Wang, Xiaolong Liang, Jiaqiang Zhang, Yueqi Hou, and Aiwu Yang

Recommended Citation

Wang Ning, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Research on Cross-domain Unmanned Swarm Cooperative Anti-submarine Search Method[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 817-824.

跨域无人集群协同反潜搜索方法研究

王宁^{1,2}, 梁晓龙^{1,2*}, 张佳强^{1,2}, 侯岳奇^{1,2}, 杨爱武^{1,2}

(1. 空军工程大学 空管领航学院, 陕西 西安 710051; 2. 陕西省电子信息系统系统集成重点实验室, 陕西 西安 710051)

摘要: 针对海上反潜搜索问题, 提出一种将无人艇作为无人机的通信中继的跨域无人集群协同搜索方法, 采用数字网格地图表征任务区域, 构建了跨域平台的运动学模型; 提出了跨域无人系统的协作方法, 设计了无人系统之间的分布式信息融合机制; 设计了异构平台的搜索目标函数, 引导无人系统在搜索任务中实时决策。仿真结果表明: 所提方法能够有效适用于文中反潜搜索任务想定, 跨域平台之间能够通过优势互补提高搜索效能。

关键词: 反潜搜索; 无人集群; 航迹规划; 跨域协同; 信息交互

中图分类号: V279+.3; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)04-0817-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0073

引用格式: 王宁, 梁晓龙, 张佳强, 等. 跨域无人集群协同反潜搜索方法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(4): 817-824.

Reference format: Wang Ning, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Research on Cross-domain Unmanned Swarm Cooperative Anti-submarine Search Method[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 817-824.

Research on Cross-domain Unmanned Swarm Cooperative Anti-submarine Search Method

Wang Ning^{1,2}, Liang Xiaolong^{1,2*}, Zhang Jiaqiang^{1,2}, Hou Yueqi^{1,2}, Yang Aiwu^{1,2}

(1. Air traffic control and navigation college, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Shaanxi Province Lab. of Meta-synthesis for Electronic & Information System, Xi'an 710051, China)

Abstract: For the maritime ASW search, a cross-domain unmanned swarm cooperative search method is proposed in which USVs are used as the communication relay of UAVs. The digital grid map is used to characterize the mission area and the kinematic model of cross-domain platform is constructed. The cooperative method of cross-domain unmanned systems is proposed, and the distributed information fusion mechanism of unmanned systems is designed. The search objective function for heterogeneous platforms is designed to guide the unmanned systems to make real-time decisions in search task. The simulation results show that the proposed method can be effective to the proposed cross-domain unmanned swarm ASW search mission scenario, and by complementing each other, the search effectiveness of the cross-domain platforms can be improved.

Keywords: anti-submarine search; unmanned swarm; track planning; cross-domain cooperative; information interaction

0 引言

反潜区域搜索是指对特定的海域进行有组织的检查, 目的在于发现敌水面/水下平台, 为后续

跟踪、打击等行动提供支撑。在我国南海、东海等重要海域经常发现无人潜航器的出没, 对我国舰艇信息、重要海域水文情报构成了严重威胁^[1-2], 潜艇及无人潜航器以其独特的隐蔽性优势, 造成

收稿日期: 2023-01-30 修回日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61703427)

第一作者: 王宁(1997-), 男, 博士生, 研究方向为跨域无人集群任务规划与决策。E-mail: wnlearning@163.com

通讯作者: 梁晓龙(1981-), 男, 教授, 博士, 研究方向为无人集群智能控制与决策、无人机集群协同任务规划。

E-mail: afeu_lxl@sina.com

了反潜作战中的“非对称性”，针对敌方潜艇、无人潜航器等平台入侵的制搜索方法研究的重要性日益增加。

从相关研究和实际应用情况来看，当前反潜搜索手段大致可以分为基于被动/主动声呐浮标的静置反潜搜索手段和基于机载磁探仪、红外搜索仪等传感器的动态反潜搜索手段。静置反潜搜索主要针对声呐浮标的空中运动轨迹^[3-4]、布放阵位优化^[5-7]、搜潜效能评估^[8-9]等问题展开研究。动态反潜搜索主要针对反潜机/艇搜潜构型优化^[10-11]、多传感器信息融合^[12]、搜潜航迹规划^[13-14]等问题展开研究。

在搜潜航迹规划方面，文献[14]将浮标搜潜阵型抽象为平面上的点集，提出了一种基于蚁群算法的搜潜浮标投放航迹优化方法；文献[15]根据磁探仪的战技性能特点，建立了磁探仪平均搜索宽度计算模型，为搜潜航迹规划提供了基本参数；文献[16]提出了一种基于红外探测仪的平行线搜潜航迹规划方法，并对传感器受扰程度对搜潜效能的影响进行了分析；文献[17]提出了一种异构无人平台反潜搜索、跟踪控制方法，实现了异构平台在搜索、跟踪任务中的自主决策。

尽管当前针对无人系统反潜搜索的研究已经取得了一定的成果，但现有方法仍未有效解决下列问题：

- (1) 未考虑水面、水下协同搜索的任务需求；
- (2) 未考虑通信距离对无人系统信息交互带来的影响；
- (3) 未对跨域集群中异构平台的协同方式展开研究。

针对上述问题，本文做了以下工作：

- (1) 考虑了同时展开水面、水下搜索的任务需求；
- (2) 探索并分析了通信距离对无人系统搜索效能的影响；
- (3) 提出了以无人艇作为无人机通信中继的异构平台协同方法。

1 反潜搜索任务建模

1.1 任务描述

反潜协同搜索任务主要包括静态搜索任务、动态搜索任务等。前者主要采取声呐布阵方式对重要航道等区域进行水声监控，完成对特定区域的水下监控任务。后者是采用反潜巡逻机、水面舰艇等平台携带红外探测仪、磁探仪、拖曳声呐等传感器，以尽可能高的效率对潜艇/潜航器目标进行动态搜索。

在反潜搜索任务中，潜艇/潜航器的航行状态可以根据其航行深度划分为水面航行状态、半潜航行状态、潜望深度航行状态和工作深度航行状态。由此，反潜搜索可以分为水面搜索和水下搜索两个方面^[18]。其中，水面搜索能够对处于水面/半潜航行状态的潜艇/潜航器进行有效探测；水下搜索能够对处于潜望深度/工作深度航行状态的潜艇/潜航器进行有效探测。

图1为跨域无人集群协同反潜搜索任务想定。无人机和无人艇组成跨域无人集群对任务区域展开水面/水下协同搜索，其中，无人机携带可见光传感器和磁探仪，无人艇携带可见光传感器和拖曳线列阵声呐。

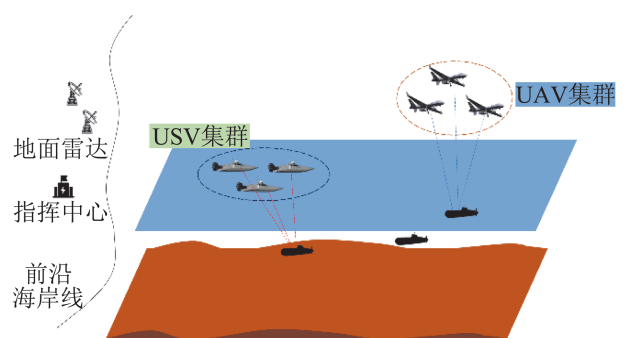


图1 跨域无人集群协同反潜搜索
Fig. 1 Cross-domain unmanned swarm cooperative anti-submarine search

1.2 任务区域建模

图2为反潜搜索任务区域。以防卫要地为中

心, 构造边长为 $R_x \times R_y$ 的矩形区域, 按照固定间隔 Δd 将任务区域网格化。

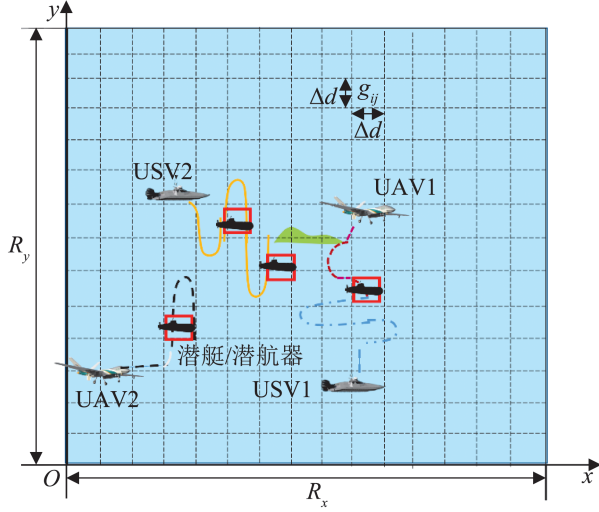


图2 网格化任务区域
Fig. 2 Rasterization of task area

以任务区域左下角网格的角点为原点, 建立笛卡尔坐标系, 分别用横向坐标 x 和纵向坐标 y 表示网格地图中的任意网格:

$$\begin{cases} x_{\min} = 0 \\ x_{\max} = \left\lceil \frac{R_x}{\Delta d} \right\rceil \\ y_{\min} = 0 \\ y_{\max} = \left\lceil \frac{R_y}{\Delta d} \right\rceil \end{cases} \quad (1)$$

网格地图中任意网格的位置为

$$g_{ij} = \{(i, j) | i \in [x_{\min}, x_{\max}], j \in [y_{\min}, y_{\max}], i, j \in \mathbb{N}\} \quad (2)$$

在构造网格地图的基础上采用信息掌握程度对搜索效能进行评估。采用 $g_{ij}(k)$ 表示 k 时刻网格地图中的网格 (i, j) 的环境状态:

$$g_{ij}(k) \in [-1, 2] \quad (3)$$

式中: $g_{ij}(k)$ 的取值为 k 时刻无人系统对网格 (i, j) 中信息的掌握程度, $g_{ij}(k)$ 取 0 表示完全不掌握, 取 1 表示仅掌握水面信息, 取 -1 表示仅掌握水下信息, 取 2 表示同时掌握水面和水下信息。定义网格地图的信息状态更新方式:

$$g_{ij}(k) = s(k) - l(k) + 2 \cdot s(k) \cdot l(k) \quad (4)$$

式中: $s(k)$ 、 $l(k)$ 均为布尔值, 取值为 0 或 1, 初始值均为 0。当 k 时刻已有无人系统对网格 (i, j) 进行水面搜索时, $s(k)$ 置 1; 当 k 时刻已有无人系统对网格 (i, j) 进行水下搜索时, $l(k)$ 置 1。

信息网格地图在 k 时刻的状态:

$$\mathbf{G}(k) = \begin{bmatrix} g_{11}(k) & \cdots & g_{x_{\max}1}(k) \\ \vdots & & \vdots \\ g_{1y_{\max}}(k) & \cdots & g_{x_{\max}y_{\max}}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.3 无人系统运动模型

不失一般性, 在无人系统的协同搜索任务中将 UAV、USV 视为二维空间中匀速运动的质点, 则 UAV 的状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} x_i(k+1) \\ y_i(k+1) \\ \psi_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i(k) \\ y_i(k) \\ \psi_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\text{UAV}} \Delta t \cos \psi_i(k) \\ v_{\text{UAV}} \Delta t \sin \psi_i(k) \\ u_i(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $(x_i(k), y_i(k))$ 为 k 时刻 UAV i 在网格地图中的位置; $\psi_i(k)$ 为 UAV i 在 k 时刻的航向角(以正北为基准), 满足 $\psi_i(k) \in [0, 2\pi)$; $u_i(k)$ 为控制量, 表示 UAV i 在 k 时刻的偏航角, 满足 $u_i(k) \in [-u_{\max}^{\text{UAV}}, u_{\max}^{\text{UAV}}]$; u_{\max}^{UAV} 为 UAV 在机动性能限制条件下的最大转弯角; v_{UAV} 为 UAV 的飞行速度; Δt 为控制间隔。

USV 的状态空间:

$$\begin{bmatrix} x_j(k+1) \\ y_j(k+1) \\ \psi_j(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j(k) \\ y_j(k) \\ \psi_j(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\text{USV}} \Delta t \cos \psi_j(k) \\ v_{\text{USV}} \Delta t \sin \psi_j(k) \\ u_j(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\psi_j(k)$ 为 USV j 在 k 时刻的航向角(正北为基准)满足 $\psi_j(k) \in [0, 2\pi)$; $u_j(k)$ 为控制量, 表示 USV j 在 k 时刻的偏航角, 满足 $u_j(k) \in [-u_{\max}^{\text{USV}}, u_{\max}^{\text{USV}}]$, u_{\max}^{USV} 表示 USV 在机动性能限制条件下的最大转弯角。在 k 时刻, 无人系统 i 的状态向量为

$$\mathbf{p}_i(k) = \begin{bmatrix} x_i(k) \\ y_i(k) \\ \psi_i(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

则 $k+1$ 时刻无人系统 i 的状态变量为

$$\mathbf{p}_i(k+1) = f_i(\mathbf{p}_i(k), u_i(k)) \quad (9)$$

式中： $u_i(k)$ 为无人系统在 k 时刻的控制量； $f_1(\cdot)$ 为跨域无人集群中无人系统的状态转移函数，由式(6)(7)确定。

2 环境地图更新方法

2.1 传感器探测矩阵

以平台质点为中心，采用 $W \times W$ 的矩形区域表示无人系统的传感器探测范围，则该探测范围可以网格化为 $Q \times Q$ 个网格：

$$Q = \left\lfloor \frac{W}{\Delta d} \right\rfloor \quad (10)$$

式中： W 为无人系统传感器有效探测区域的短边长度； Δd 为网格尺寸。

2.2 基于跨域平台的信息交互方法

通过将任务区域网格化，区域中任意位置的状态都可以通过网格地图中相应网格的信息状态来描述。对于无人集群而言，每个无人系统在任务中根据自身历史决策信息进行决策的同时，也应能有效利用集群中其他成员的决策信息。因此，在搜索过程中，需要定义集群中不同无人系统间的环境信息融合方法。

文献[19]提出了一种全局环境地图方法，将每个无人系统的实时决策量汇集到指挥中心，由指挥中心根据所有平台的决策量，对环境地图进行一次集中更新。将更新后的全局环境地图实时发送给无人集群，由无人集群根据接收到的全局环境地图进行自身决策。该方法能够有效避免重复搜索，在一定程度上提高集群的搜索效率。但该方法需要依赖严苛的集群通信条件，将耗费大量的通信资源，因此，该方法仅适用于规模较小的无人系统集群的小范围搜索任务。

相较于无人机集群，跨域集群涉及多个域的无人系统，能够通过优势叠加、劣势互补来发挥其跨域平台协同的优势。因此，本文提出一种环境信息分布式融合方法，集群中每个无人系统根据自身历史决策信息和当前状态进行实时决策，

以无人艇作为通信中继站，位于其通信范围内的邻近无人机可以进行信息交互。无人机之间可以通过信息交互减少重复搜索，从而提高集群的搜索效能，如图3所示。

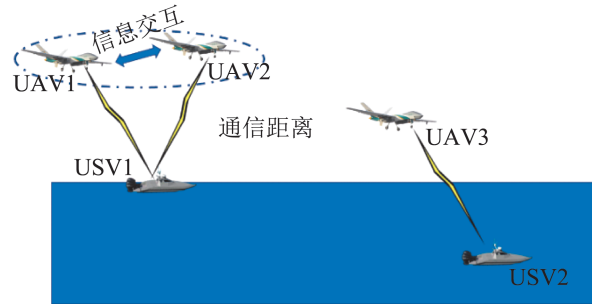


图3 信息交互

Fig. 3 Information interaction

设 k 时刻有 N 架UAV位于USV $_j$ 的通信范围内，则 N 架UAV得到的融合信息为

$$\bar{G}_{UAV}^i(k) = f_2(G_{UAV}^1(k), G_{UAV}^2(k), \dots, G_{UAV}^N(k)) \quad (11)$$

式中： $\bar{G}_{UAV}^i(k)$ 为UAV $_i$ 进行信息融合后所得到的环境状态矩阵； $f_2(\cdot)$ 为信息矩阵融合运算，任取2个矩阵中的元素 a 、 b ，其融合运算方式如表1所示。

表1 信息矩阵融合运算规则

Table 1 Information matrix fusion operation rules

b	a			
	-1	0	1	2
-1	-1	-1	2	2
0	-1	0	1	2
1	2	1	1	2
2	2	2	2	2

3 决策目标函数及求解

3.1 UAV目标函数

通过设计目标函数，能够引导无人系统在搜索任务过程中有效决策，进而提高搜索效能。针对水面/水下的协同搜索问题，UAV平台主要考虑以下指标。

(1) 搜索覆盖率。UAV对任务区域的搜索效能可以由任务区域的搜索覆盖率有效反映。UAV在 k 时刻的搜索覆盖率：

$$C(k) = \frac{\sum_{i=1}^{x_{\max}} \sum_{j=1}^{y_{\max}} |g_{ij}(k)|}{2 \left[\frac{R_x}{\Delta d} \right] \left[\frac{R_y}{\Delta d} \right]} \quad (12)$$

(2) 任务区域边界约束。在 UAV 协同搜索任务中, 需要规定 UAV 在执行搜索任务时不得越出任务边界。因此, 增加约束条件:

$$B = \begin{cases} 10^6, & x_i \leq \left[\frac{R_x}{\Delta d} \right] \cdot \Delta d \cap y_i \leq \left[\frac{R_y}{\Delta d} \right] \cdot \Delta d \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

综上所述, 执行搜索任务的 UAV 可以根据以下目标函数进行决策:

$$J(k) = \omega_1 \cdot C(k) + \omega_2 \cdot B(k) \quad (14)$$

式中: $\omega_i (i=1, 2)$ 为平衡系数, 根据具体任务及相应约束项进行设置, 且满足

$$\sum_{i=1}^2 \omega_i = 1 \quad (15)$$

3.2 USV 目标函数

在协同搜索任务中, USV 平台主要考虑以下指标:

(1) 通信范围内 UAV 平台距离均值。作为空中平台, UAV 在携带任务载荷的条件下通常无法携带远距离通信设备, 大大限制了 UAV 集群执行任务过程中的协同性能。USV 具备携带大功率通信设备的能力, 因此, 能够为 UAV 提供远距离通信, 从而提高 UAV 集群的协同搜索效能。为提高所提供通信服务的 UAV 数量, 设置 USV 到通信范围内 UAV 平台的距离均值作为回报项, k 时刻 USV 与通信范围内 UAV 平台的平均距离为

$$D_{\text{com-USV}}^j = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ij}}{nc_m} \quad (16)$$

式中: n 为位于 USV j 通信范围内的 UAV 数量; d_{ij} 为 UAV i 到 USV j 之间的距离; c_m 为 USV 所能为 UAV 提供的通信距离。

(2) 搜索覆盖率。USV 对任务区域的搜索效能

可以由任务区域的搜索覆盖率有效反映, 因此, 增加搜索覆盖率目标项, 即式(12)。

(3) 任务区域边界约束。USV 应始终位于任务区域内执行搜索任务, 因此, 增加边界条件式(13)。

综上所述, 执行搜索任务的 UAV 可以根据以下目标函数进行决策:

$$J(k) = \bar{\omega}_1 \cdot D_{\text{com-USV}}^i(k) + \bar{\omega}_2 \cdot C(k) + \bar{\omega}_3 \cdot B(k) \quad (17)$$

式中: $\bar{\omega}_i (i=1, 2)$ 为平衡系数, 据具体任务及相应约束项进行设置, 且满足

$$\sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i = 1 \quad (18)$$

4 仿真分析

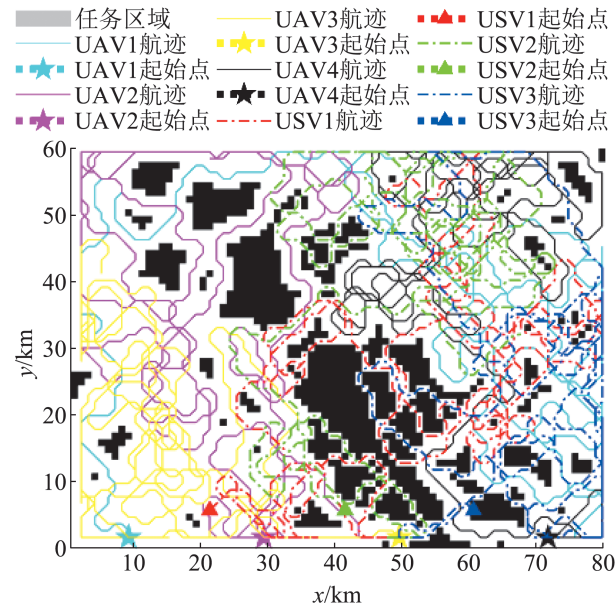
为验证本文所提算法的有效性, 以水面搜索覆盖率和水下搜索覆盖率作为评价指标, 对 UAV/USV 集群的协同搜索效能进行验证。仿真参数: $\omega_1=0.5$ 、 $\omega_2=0.5$ 、 $\bar{\omega}_1=0.3$ 、 $\bar{\omega}_2=0.2$ 、 $\bar{\omega}_3=0.5$; UAV 速度为 20 m/s、通信距离为 5 km、水面探测范围为 3 km×3 km、水下探测范围为 1 km×1 km; USV 速度为 10 m/s、通信距离为 35 km、水面探测范围为 1 km×1 km、水下探测范围为 3 km×3 km。

4.1 跨域无人集群协同搜索的优势

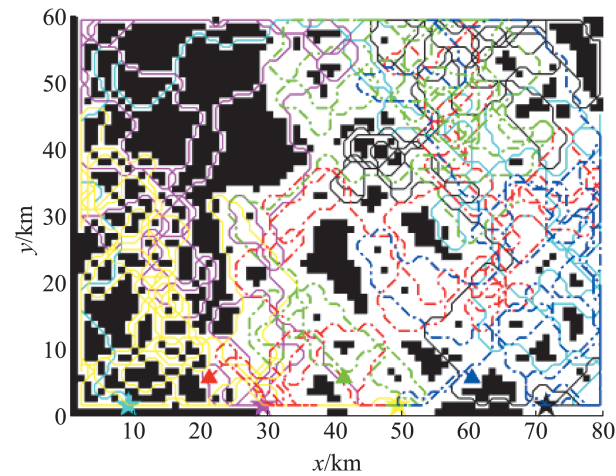
设定任务区域为 80 km×60 km 的矩形区域, 分别用黑色、白色表示未知和已探测区域。4 架 UAV 同时对任务区域展开搜索, 起飞坐标点为 (10, 0)、(30, 0)、(50, 0)、(70, 0), 3 艘 USV 出发坐标点为 (20, 5)、(40, 5)、(60, 5), 单位为 km。设无人平台最大转弯角均为 45°, 仿真步长为 $\Delta t=10$ s, 仿真时间为 6 000 s。

图 4 对文中所提算法的有效性进行了验证。可以看出, 在协同搜索任务中, UAV 集群主要承担了水面搜索任务, USV 集群主要承担了水下搜索任务。这是由传感器的探测范围决定的, 由于 UAV 擅长水面探测, 在搜索过程中为获取更高的目标函数收益, 其更加倾向于选择未被搜索过的

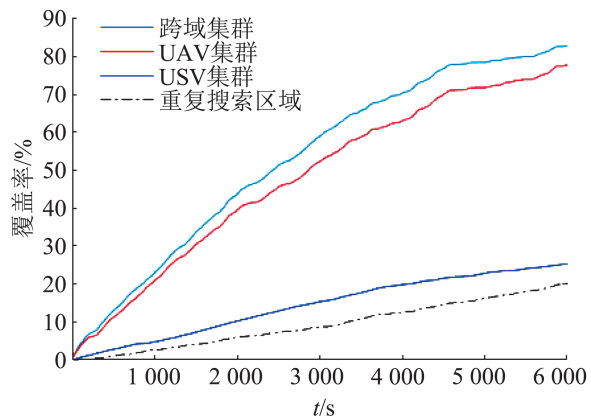
水面区域。相应地，USV在搜索过程中更加倾向于选择未搜索过的水下区域。



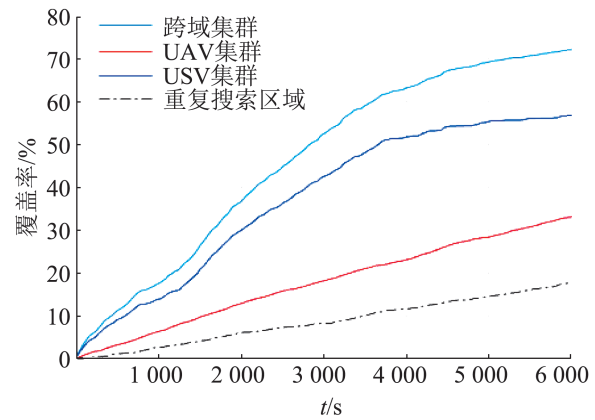
(a) 水面搜索航迹



(b) 水下搜索航迹



(c) 水面覆盖率



(d) 水下覆盖率

图4 跨域无人集群水面/水下协同搜索

Fig. 4 Cross-domain unmanned swarm surface/submersible cooperative search

此外，从表2中可以看出，由于UAV集群的速度更快，所以相较于USV集群对水面搜索做出的有效贡献率5.19%，UAV集群对水下搜索所提供的有效贡献率更大，达到了15.42%。仿真结果表明：通过将UAV集群与USV集群同时组成跨域无人集群执行搜索任务，可以有效地实现水面/水下协同搜索，UAV在承担水面搜索任务的同时能够为水下搜索任务做出补充。

表2 UAV&USV搜索覆盖率
Table 2 UAV&USV search coverage %

搜索范围	覆盖率			重复搜索率
	总覆盖率	UAV集群	USV集群	
水面	82.92	77.73	25.38	20.19
水下	72.21	33.15	56.79	17.73

4.2 USV通信中继对UAV搜索效能的影响

本节对USV集群作为UAV集群的通信中继为UAV集群的搜索效能带来的影响进行仿真分析，采用蒙特卡罗仿真方法，分别选择USV集群的规模和USV的通信距离作为变量展开研究。USV集群的规模取2艘，USV的通信距离分别取0、45、90 km，共进行150次仿真测试，仿真时间为3000 s。由于本节主要考察USV集群为UAV集群提供的通信支撑的有效性，因此，以UAV的水面搜索覆盖率作为评价指标。

图5反映了跨域集群中存在2艘USV时, USV通信距离对UAV集群搜索效能带来的影响。当USV通信距离分别取0(即UAV不通过USV进行信息交互)、45、90 km时, UAV集群在任务执行3 000 s时达到的平均搜索覆盖率分别为47.14%、49.49%、48.86%, 中位数分别为47.58%、50.13%、50.33%。可以看出, 在本文想定的任务场景中, 通过USV为UAV集群提供通信支撑, 可以提高UAV之间的信息交互能力, 从而减少重复搜索, 提高搜索效能。但当USV所能提供的通信范围超过一定程度时, UAV的通信效能便不会再有明显增长, 这说明UAV之间通过信息交互确实能够提升搜索效能, 但当信息交互频率超过一定程度时, 搜索效能便不会再有明显的提升, 这也反映了跨域集群能力增长与平台性能增加之间的关系是非线性的。

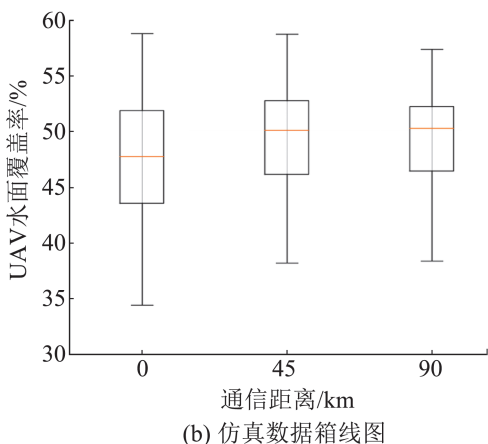
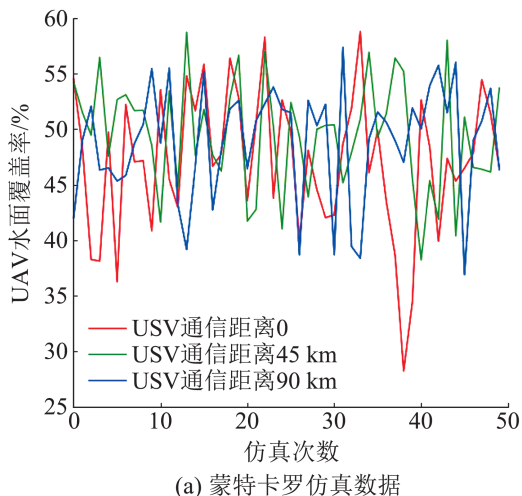


图5 2艘USV对UAV集群搜索效能的影响

Fig. 5 Impact of 2 USVs on UAV swarm search effectiveness

5 结论

本文以UAV、USV组成的跨域无人集群为研究对象, 对反潜搜索航迹规划问题进行了研究, 探索了跨域无人集群在反潜搜索任务中的潜在运用优势。提出了一种由USV为UAV平台提供通信支撑的跨域平台协作方法, 通过设计区分平台类别的搜索引导函数, 实现了跨域无人集群的协同反潜搜索。仿真结果表明: ①将UAV、USV组成跨域无人集群, 能够通过发挥不同平台的优势, 提高搜索效能; ②将USV作为UAV的通信中继, 能够提升UAV之间的信息交互频率, 进而提高UAV的搜索效率。

本文研究暂未考虑通信时延、飞行高度、目标深度等因素可能对集群搜索效能带来的影响。后续可以进一步细化建模过程, 考虑UAV飞行高度、目标深度等情况对反潜搜索效能的影响。

参考文献:

- 王淑敏, 唐晓聪. 无人潜航器的国际法法律地位研究——“中美无人潜航器事件”引发的思考[J]. 时代法学, 2017, 15(4): 3-8.
Wang Shumin, Tang Xiacong. Research on Legal Status of Unmanned Undersea Vehicles in International Law—Reflections on the "Unmanned Undersea Vehicles Event Between China and America"[J]. Presentday Law Science, 2017, 15(4): 3-8.
- 曾斌, 张鸿强, 李厚朴. 针对无人潜航器的反潜策略研究[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(10): 3174-3181.
Zeng Bin, Zhang Hongqiang, Li Houpu. Research on Anti-submarine Strategy for Unmanned Undersea Vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(10): 3174-3181.
- 程浩, 饶炜, 赵海潮. 空投声呐浮标空中运动轨迹研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(11): 146-150.
Cheng Hao, Rao Wei, Zhao Haichao. Research on the Aerial Motion Trail of the Air-dropped Sonobuoy[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(11): 146-150.
- 王新为, 谭安胜, 尹成义. 反潜巡逻机声呐浮标投放诸元确定方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(2): 19-23.
Wang Xinwei, Tan Ansheng, Yin Chengyi. Research on Determinative Method of Characteristic Data for Anti-

- submarine Patrol Aircraft Airdrop Sonobuoy[J]. *Command Control & Simulation*, 2017, 39(2): 19-23.
- [5] 唐晨, 孙秀文, 王旅. 反潜巡逻机对潜应召搜索声呐浮标布放阵位优化问题研究[J]. *舰船电子工程*, 2022, 42(2): 62-65.
Tang Chen, Sun Xiuwen, Wang Lü. Research on Optimization Position of Sonobuoy in Anti-submarine Call-search by Anti-submarine Patrol Aircraft[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(2): 62-65.
- [6] 潘勤昇. 主动定向声呐浮标系统[J]. *应用声学*, 1991, 10(4): 46-48.
- [7] 杨日杰, 温少丹, 张欣, 等. 一种浮标定位方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(10): 2354-2356.
Yang Rijie, Wen Shaodan, Zhang Xin, et al. Research of a Kind of Buoy Location Method[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(10): 2354-2356.
- [8] 包建伟, 金晓南, 杨晶. 无人机平台空投声呐浮标搜潜效能评估模型[C]//第五届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2021: 236-240.
- [9] 张树鹏. 反潜直升机浮标搜潜效能评估分析[J]. *中国科技信息*, 2019(6): 28-29, 32.
- [10] 张诗, 闵绍荣, 朱忍胜, 等. 基于反潜探测能力的舰队搜潜队形优化研究[J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(5): 126-131.
Zhang Shi, Min Shaorong, Zhu Rensheng, et al. Optimization of Fleet Formation Searching Submarine Based on Antisubmarine Detection Capability[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(5): 126-131.
- [11] 唐晨, 孙秀文, 吴刚. 水面舰艇与反潜巡逻机协同检查搜潜队形配置研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2022, 44(2): 33-37.
Tang Chen, Sun Xiuwen, Wu Gang. Research on Formation Deployments of Coordinated Search for Submarines by Naval Ships and Anti-sub Patrol Aircrafts[J]. *Command Control & Simulation*, 2022, 44(2): 33-37.
- [12] 张雨杭, 鞠建波, 范赵鹏. 舰机多设备组合搜潜方案决策方法研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2018, 40(6): 93-98.
Zhang Yuhang, Ju Jianbo, Fan Zhaopeng. Research on Decision Making Methods for Multiple Sonar Combinations of Surface Ship and Anti-submarine Helicopter[J]. *Command Control & Simulation*, 2018, 40(6): 93-98.
- [13] 廖燕荣, 姜可宇. 多舰协同分区搜潜动态航路规划[J]. *舰船电子工程*, 2022, 42(7): 23-27, 43.
Liao Yanrong, Jiang Keyu. Dynamic Route Planning of Partitioned Searching of Multiple Surface Ships[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(7): 23-27, 43.
- [14] 孙启豪, 蔡爱华. 航空搜潜布阵航路优化研究[J]. *电光与控制*, 2017, 24(4): 39-42.
Sun Qihao, Cai Aihua. Route Planning Optimization of Aircraft in Sonobuoys Deployment for Submarine Searching[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(4): 39-42.
- [15] 谭安胜, 王新为, 尹成义. 反潜巡逻机磁探仪区域搜索研究[J]. *电光与控制*, 2018, 25(8): 1-6.
Tan Ansheng, Wang Xinwei, Yin Chengyi. Research on Regional Search by Anti-submarine Patrol Aircraft Using Magnetic Anomaly Detector[J]. *Electronics Optics & Control*, 2018, 25(8): 1-6.
- [16] 蒋志忠, 杨日杰, 李德鑫, 等. 机载红外探测仪检查搜潜建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 390-396.
Jiang Zhizhong, Yang Rijie, Li Dexin, et al. Modeling and Simulation for Checking Search Submarine by Airborne Infrared Detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 390-396.
- [17] Wu Yu, Kin Huat Low, Lü Chen. Cooperative Path Planning for Heterogeneous Unmanned Vehicles in a Search-and-track Mission Aiming at an Underwater Target[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(6): 6782-6787.
- [18] 屈也频. 反潜巡逻飞机搜潜辅助决策系统建模与仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
Qu Yepin. Research on Modeling and Simulation for the Decision Support System of Search Submarine Scheme by Antisubmarine Warfare Patrol Aircrafts[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [19] 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 Zhong, Gao Xiaoguang, Fu Xiaowei. 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.