

基于数字信息素的无人机集群频谱监视控制算法

陈柯宇^{1,2}, 杨 健², 张蕴霖³, 邵晋梁^{2,3}

(1. 电子科技大学信息与通信工程学院, 四川成都 611731; 2. 电磁空间认知与智能控制技术实验室, 北京 100089;
3. 电子科技大学自动化工程学院, 四川成都 611731)

摘要: 频谱监视对电磁环境的频谱态势掌握至关重要. 特别地, 用无人机集群作为执行对象, 可以提高监视效率, 节省大量人力成本. 本文针对频谱监视任务, 设计了用于评估监视效果的评价函数, 提出了一种基于人工势场的数字信息素无人机集群安全控制算法. 该算法使用数字信息素矩阵来模拟电磁空间的搜索状态, 并通过在集群内的个体之间建立信息素势场以实现自适应的无人机集群分布式航迹规划. 周期性的采样和插值解决了未知域的优先级矩阵更新问题, 引导无人机优先监视频谱热点区域. 不同于已有的基于飞行概率的决策算法, 本文算法充分利用了数字信息素所映射的环境信息, 可以避免无人机陷入局部状态的重复搜索, 适用于动态频谱环境. 仿真实验表明本文的决策算法在静态和动态频谱监视场景下均能使评价函数快速收敛, 达到较好的监视效果.

关键词: 频谱监视; 无人机集群; 数字信息素; 人工势场

基金项目: 国家自然科学基金(No.U19B2028); 四川省自然科学基金(No.2021YFH0042)

中图分类号: TN971; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)06-1541-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210906

A Digital Phenomenon Based UAV Cluster Control Algorithm for Spectrum Monitoring

CHEN Ke-yu^{1,2}, YANG Jian², ZHANG Yun-lin³, SHAO Jin-liang^{2,3}

(1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Laboratory of Electromagnetic Space Cognition and Intelligent Control, Beijing 100089, China;

3. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: Spectrum monitoring is essential for the mastery of the spectrum situation of the electromagnetic environment. In particular, using UAV clusters as execution objects can improve surveillance efficiency and save a lot of labor costs. In terms of the task of spectrum monitoring, this paper designs an evaluation function to evaluate the monitoring effect and proposes a safe UAV cluster control algorithm using artificial potential field based on digital pheromone. In the algorithm, a digital pheromone matrix is applied to simulate the search state of the surveillance space, and then the adaptive distributed trajectory plan is realized by establishing a pheromone potential field between UAVs. Periodic sampling and interpolation can update the priority matrix of unknown domains which guides the UAV to the unmonitored spectrum hot-spot area. In addition, unlike traditional decision-making algorithms based on probability, our algorithm makes full use of the environmental information mapped by the digital pheromone, which can avoid the repeated search of UAVs falling into the local state, and is suitable for the dynamic spectrum environment. The simulation experiment verifies that the proposed decision-making model can make the evaluation function converge quickly in both static and dynamic spectrum monitoring scenarios, and achieve a better monitoring effect.

Key words: spectrum monitoring; unmanned aerial vehicle cluster; digital phenomenon; artificial potential

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.U19B2028); Natural Science Foundation of Sichuan Province of China (No.2021YFH0042)

1 引言

随着电子信息技术的高速发展,通信用频设备的种类和数量不断增加,形成复杂的电磁环境,为军事和民用领域带来严峻的挑战. 频谱态势是电磁能量在空间、时间、频率、场强四个维度的状态^[1],提供了多样化的数据表现形式,可以从多个维度帮助理解并掌握电磁环境信息. 因此频谱态势监视是获取电磁环境信息的重要手段. 及时地掌握频谱态势成为频管人员和作战指挥员迫切的需求^[2,3].

传统的获取频谱态势的工具主要有卫星、地面移动监视装置等^[4-6]. 这些工具目前已经有比较成熟的应用,但存在一些局限性. 具体而言,使用卫星虽能实现大面积的频谱态势监控,但牺牲了精度,并由于距离因素难以监视高频信号;而地面移动装置则受限于地形,无法实现灵活的监视. 近年来,随着无人机技术的成熟,其体积小、机动性高、模块配置自由、成本低等优势^[7]为频谱监视提供了新的解决方案,逐渐成为研究人员关注的热点话题. 然而由于监视环境的复杂性,单个无人机往往难以胜任任务需求. 单无人机部署局限一方面体现在对于大面积的监视区域而言,单个无人感知范围有限,往往顾此失彼,监视效率低下;另一方面,考虑在战场对抗场景下,一旦无人机被敌方截获,则监视任务将直接失败. 无人机集群部署正好弥补了上述缺点,通过控制多架无人机协同执行频谱监视任务,提高了监视效率并增强系统的鲁棒性^[8].

频谱监视需要无人机集群对电磁环境进行实时的态势响应,以做出有利于监视任务的飞行决策,提高监视效率. 特别是针对干扰源定位、电子对抗等场景,可以用频谱热度描述电磁空间中的态势信息分布情况,频谱热度除了与电磁空间中的信号密集程度相关,还可以由信号功率、带宽、调制参数、干扰特性以及信号内容等因素共同描述^[9]. 为尽快获取电磁环境中的频谱态势,往往需要控制无人机优先监视空间中频谱热度较高的区域^[10-12]. 因此,无人机集群的协同控制是实现团队任务的关键. 传统的集群控制是自上而下的模式,通过预设每个无人机的飞行轨迹来控制集群的飞行^[13]. 但这种方式人工开发成本较高且不具有自适应性,仅适用于无人机飞行表演等相对固定的飞行场景. 而集群智能控制则充分利用了无人机的自主感知与计算能力,让无人机在飞行过程中做出自适应的航迹规划^[14-16]. 目前,已经有许多适用于无人机集群的自适应航迹规划方法,如神经网络^[17]、粒子群优化算法^[18]、维诺划分法^[19]等. 这些算法在集群路径规划上有较好的效果,但在实际应用中存在一定的局限性. 具体而言,神经网络法需要提前训练网络,且对飞行环境不具有较强的泛化能力;粒子群优化算法的优势在于能快速

让飞行路径收敛,但不适用于实时飞行决策;维诺划分法的计算复杂度较高,且需要已知环境密度.

为实现自适应的频谱监视,本文选用人工势场方法作为集群自主控制算法,该算法通过在无人机个体内部构建势函数,即虚拟力,通过计算合力来做出飞行决策^[20]. 这种算法优势在于能够以较低的成本实现集群的自适应飞行,且可应用于分布式控制领域. 该算法的核心在于势场的选择,即力的来源,除了避免机间碰撞的排斥力,还需要合适的牵引力来引导集群搜索未知的电磁空间. 受蚁群在自然界中活动的启发,信息素可以对电磁空间进行建模^[21],利用信息素设计相应的势场力,驱动无人机探索未知区域^[22]. 不同于已有文献^[21-23],本文的主要贡献如下:

(1) 利用优先级矩阵描述频谱热度,通过对电磁环境进行实时采样和周期性的插值反演,解决了未知的频谱域下的优先级矩阵更新问题,将数字信息素的方法推广到场强信息未知的场景中.

(2) 利用数字信息素来描述监视的电磁空间的当前未知程度,提出一种基于人工势场的信息素无人机安全决策算法,以完成自适应的频谱监视任务并避免碰撞. 本文算法在覆盖控制通用的评价函数指标上表现优于基于飞行概率的决策算法^[21,23],同时相较于传统势场法,控制输出有界,适用于无人机有限的硬件条件.

(3) 本文方法考虑了环境的整体监视情况,在重点监视高热度区域的同时兼顾低热度区域,为存在多辐射源、移动辐射源等电磁态势动态变化的场景提供了解决方案.

2 问题描述

2.1 环境描述

考虑由 N 架无人机构成的集群 N 对电磁环境进行频谱监视任务的场景. 为便于建模,假定所有无人机的飞行高度为常量 H_0 , 监视区域为长 L 、宽 W 的矩形区域. 根据所需的监视精度,将该矩形区域划分为 $I_x \times I_y$ 个边长为 r_s 的栅格单元,用 p_{ij} 代表第 i 行第 j 列的栅格单元. 集群在飞行过程中能够采集电磁空间的频谱信息,无人机之间保持通信,能够实现信息的交互.

在任务执行期间,无人机坐标可以映射到栅格中,如式(1)所示:

$$\begin{cases} i = \text{ceil}(x/r_s), & 0 < i \leq I_x \\ j = \text{ceil}(y/r_s), & 0 < j \leq I_y \end{cases} \quad (1)$$

其中, (x, y) 为无人机地理坐标; $\text{ceil}(\bullet)$ 为向上取整函数.

在飞行期间,无人机的速度由人工势场法决策得到,无人机动力学模型满足一阶积分器,仅对无人机速度上限进行约束,如式(2)所示:

$$\dot{q} = v, \quad \text{s.t.} \quad \|v\| < v_{\max} \quad (2)$$

其中, q 为无人机地理坐标; v 为无人机实时速度; v_{\max} 为无人机最大速度.

2.2 目标描述

在电磁环境中,为尽快获取当前电磁空间的频谱态势,需要无人机集群按照监视区域频谱热点程度的不同,自适应地规划集群飞行路径,即频谱热度高的区域将具有较高的访问优先级,并且为保证监视的实时性,区域需定时重访.因此,可以将该场景视为一个覆盖控制问题.针对该问题而言,通常可以用覆盖率和评价函数来评估算法性能.由于本文场景涉及区域重访和优先级覆盖,覆盖率仅仅能体现一段时间内的栅格占用情况,不能很好地反映优先级覆盖情况,因此本文选择更为通用的评价函数指标来评估算法性能.多智能体覆盖控制领域中常用的评价函数^[24]如式(3)所示:

$$H(q) = \int_P \min_{i \in \{1,2,\dots,N\}} f(q_i, p) \phi(p) dp \quad (3)$$

其中, $P \subseteq P^2$ 表示集群的覆盖区域; $q = (q_1, q_2, \dots, q_N)$ 表示集群中所有无人机的位置; $f(q_i, p)$ 用于衡量第 i 架无人机智能体到覆盖区域内任意一点 $p \in P$ 的侦测代价; $\phi(p)$ 表示区域内任意一点 p 的密度函数.

由式(3)可知,集群的覆盖效果及评价函数与每架无人机的搜索路径以及密度函数有关.一般而言,针对静态环境,密度函数为一确定函数,本文的目标即通过控制集群的飞行路径,以使评价函数最小化.在上述背景下,本文设计与频谱热度和监视状态相关的评价函数评估监视效果.

首先定义受访时间矩阵,用于记录栅格最近一次被无人机访问的时间,即

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots \\ t_{21} & t_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, t_{ij} 为栅格 p_{ij} 最近一次被无人机访问的时间.

设 T_0 为重访时限,定义栅格指示矩阵 M ,用于描述 t 时刻栅格受访状态,有

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots \\ m_{21} & m_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$m_{ij} = \begin{cases} 0, & t - t_{ij} \leq T_0 \\ 1, & t - t_{ij} > T_0 \end{cases}$$

当栅格 p_{ij} 在重访时限内没有被无人机集群访问时,说明该栅格未被监视到位,栅格指示矩阵 M 中的非零元表示了环境中疏于监视的栅格.为了满足集群需要定期重复监视电磁空间的需求,无人机 q_k 对于栅格 p_{ij} 的侦测代价为 $f(q_k, p_{ij}) = m_{ij}$. 同时为直观体现电磁态势信息分布情况,本文以信号场强度作为频谱热

度的主要衡量指标 $\phi(p_{ij}) = E(p_{ij})$, 由此评价函数(3)转化为

$$L = \sum_{i=1}^{I_x} \sum_{j=1}^{I_y} m_{ij} E(p_{ij}) \quad (6)$$

其中, $E(\cdot)$ 为栅格真实场强,对应式(3)中的 $\phi(q)$; 栅格指示单元 m_{ij} 对应式(3)中的侦测代价.在本文算法中,评价函数仅用于评估算法性能,在监视任务执行过程中单独计算,不会作为算法的反馈输入,即评价函数对无人机来说是未知的,因此可以保证无人机不会获取到全局信息.在初始化阶段,无人机尚未监视任何区域,即栅格指示矩阵 M 中的元素 m_{ij} 全部为 1, 评价函数最大.随着栅格被访问,对应的 m_{ij} 变为 0, 评价函数相应降低.当重访时限到达后,这些栅格的 m_{ij} 又回到 1, 因此,无人机需要重复进行监视以维持较低的评价函数.值得注意的是,当 $\sum m_{ij}$ 达到最小值,若此时集群覆盖的区域全为频谱热点,其评价函数将达到理论上的最小值.

本文将上述评价函数作为评估指标,借助数字信息素设计了无人机集群控制算法,下面将介绍数字信息素的相关理论知识.

3 数字信息素控制算法

3.1 算法背景

自然界中,蚂蚁在外出觅食时会在其途经路径上释放一种物质.该物质会随着时间推移而挥发.如果蚁群不断重复此路径,则该物质的浓度会不断增强,吸引更多蚂蚁前来觅食,这种物质称为信息素.仿照这种生物特征,数字信息素的研究应运而生.

该算法的核心思想是在无人机集群内维护信息素矩阵,具体定义见 3.2 节.该算法每次迭代都会更新信息素矩阵,无人机的计算单元将会通过分析信息素矩阵进而做出飞行决策.这种算法可以应用到分布式场景,让集群自适应地搜索整个位置空间.

文献[25]提出了数字信息素更新的一般方法,如式(7)所示:

$$s(t+1, p) = E \times s(t, p) + r(t, p) + g(t, p)$$

$$g(t+1, p) = \sum_{p' \in N(p')} \frac{F}{|N(p')|} (s(t, p') + r(t, p')) \quad (7)$$

其中, $s(t+1, p)$ 为某种数字信息素的更新强度; E 为蒸发系数; $s(t, p)$ 为当前数字信息素的强度; $r(t, p)$ 为信息素释放强度; $g(t, p)$ 为信息素传播强度; $N(p')$ 为位置 p 的邻近栅格集合; F 为可调参数.本文以此为基础设计了吸引信息素的更新流程.

3.2 未知环境下数字信息素矩阵的定义与更新

在本文考虑的模型中,数字信息素被定义在栅格

中,其强度定量描述了栅格的未知状态. 栅格的信息素强度越高表明该区域的未知性越大,故对无人机的吸引作用越强. 因此用 $s(p_{ij}, t)$ 表示 t 时刻栅格 p_{ij} 中的数字信息素强度,定义信息素矩阵 \mathbf{AP} 如下:

$$\mathbf{AP} = \begin{bmatrix} s(p_{11}, t) & s(p_{12}, t) & \cdots \\ s(p_{21}, t) & s(p_{22}, t) & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} \quad (8)$$

初始化时,令所有栅格的信息素强度为 $s_0 + x$, $x \in U(0, 1)$, s_0 是预设的初始信息素强度. 在没有先验信息的情况下,这种设置可以驱使无人机对电磁空间进行随机搜索.

考虑到电磁空间中频谱态势的复杂性,无人机需要对特定区域重点监视. 为区分不同栅格的监视优先级,定义优先级矩阵如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, λ_{ij} 为栅格 p_{ij} 的优先级,代表该栅格的重要程度.

在频谱监视任务中,频谱热度较高的区域对应较大的访问优先级,由于本文以信号场强度作为频谱热度的主要衡量指标,因此场强较高的区域对应较大的访问优先级. 然而由于环境态势是未知的,优先级矩阵的获取成为难题. 为将数字信息素的应用推广到未知场强场景中,本文提出实时采样数据,周期性插值反演态势环境的方法更新优先级矩阵. 优先级的更新将与集群在环境中已获取的电磁信息密切相关. 具体而言,设优先级矩阵的更新周期为 \mathcal{T} ,在周期结束时,对集群在电磁空间中采样到的场强数据进行插值. 值得注意的是,集群的采样点坐标为栅格坐标,因此插值后的数据依旧与栅格维度相同,定义为 $\tilde{\mathbf{E}}$. 由于本文研究的目标并非频谱热度的反演效果,因此不对插值具体方法作说明,常用的插值方法^[26,27]均可用于本算法,取决于实际的计算条件和精度要求. 优先级矩阵更新公式如下:

$$\mathbf{A} = \text{sigmoid} \left(\frac{\tilde{\mathbf{E}} - \text{mean}(\tilde{\mathbf{E}})}{\text{sigma}(\tilde{\mathbf{E}})} \right) \quad (10)$$

其中, $\text{mean}(\bullet)$ 为均值函数; $\text{sigma}(\bullet)$ 为标准差函数;并使用sigmoid函数进行归一化处理.

由于无人机集群的频谱监视是动态的过程,因此监视的效果也是实时变化的. 作为未知状态的定量描述,数字信息素的变化需与监视效果的变化一致. 因此,本文定义的数字信息素支持3种变化过程^[21]:(1)释放,即数字信息素能够被定量释放到栅格中;(2)蒸发,即随着时间的推移,数字信息素可以挥发直至零;(3)传播,即数字信息素可以传递到邻近的栅格中.

数字信息素总体更新思路如下. 将栅格根据式(5)

划分为受访栅格和未受访栅格. 未受访栅格的释放变化占据主导,使其信息素强度随时间增加,以吸引无人机趋于未受访栅格. 受访栅格的蒸发变化占据主导,使其信息素强度随时间降低,降低对无人机的吸引程度. 基于以上思路,首先需定义信息素开关矩阵:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots \\ k_{21} & k_{22} & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & t - t_{ij} \geq T_0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

规定数字信息素按照先传播后蒸发的原则,当前栅格的吸引信息素更新公式如下:

$$s(p_{ij}, t) = (1 - E)[(1 - G)s(p_{ij}, t - 1) + \lambda_{ij}k_{ij}d(p_{ij}, t) + g(p_{ij}, t)] \quad (12)$$

$$g(p_{ij}, t) = \frac{1}{|N(p_{ij})|} \sum_{p_{xy} \in N(p_{ij})} G[s(p_{xy}, t - 1) + d(p_{xy}, t)]$$

其中, $s(p_{ij}, t - 1)$ 代表上一周期栅格 p_{ij} 的信息素值; E 为信息素蒸发系数(该参数可以避免信息素强度 $s(p_{ij}, t)$ 的无限增长,使其保持在合适范围内); G 为信息素传播系数; $N(p_{ij})$ 代表栅格 p_{ij} 的邻近栅格集合; $d(p_{ij}, t)$ 为栅格主动释放的吸引信息素值(由于开关矩阵的存在,当该栅格在重访时限范围内被访问过时,将不主动释放吸引信息素);而 $g(p_{ij}, t)$ 代表栅格 p_{ij} 的所有邻近栅格传播到本栅格的吸引信息素的量.

3.3 基于飞行概率的信息素决策算法

已有的信息素决策流程中,无人机需要计算邻近栅格的飞行概率,根据概率选择目标栅格飞行. 文献[21]提出了基于飞行概率的信息素局部决策算法,无人机根据其邻近栅格的信息素值来计算飞行概率,邻近栅格 p_o 的飞行概率如式(13)所示:

$$P_{p_o} = \frac{s(p_o, t) \times M(p_o)}{\sum_{p \in \mathcal{B}(p_{ij})} s(p, t) \times M(p)} \quad (13)$$

其中, $\mathcal{B}(p_{ij})$ 表示无人机所在栅格 p_{ij} 的8个邻近栅格组成的集合; $M(p_o)$ 为栅格特征值,用于设置禁飞区域,当目标栅格 p_o 存在无人机或障碍物时,将该栅格特征值 $M(p_o)$ 设为0,否则设为1. 获得各栅格方向飞行概率后,无人机将依概率选择一个栅格作为目标航路点. 结合3.2节提出的优先级矩阵在未知环境下的解决方案,对于任意无人机,其决策流程如算法1所示.

在文献[23]中,为了充分利用整个信息素矩阵的信息,作者在算法1的基础之上提出了基于飞行概率的信息素全局决策算法. 该方法对算法1的第6步进行修改,将无人机某一方向所有栅格的信息素的平均值作为该方向对应邻近栅格的信息素值,进而通过式(13)计算各区域的飞行概率. 为了方便比较,我们将文献

算法 1 基于飞行概率的信息素局部决策流程

1. 对电磁环境进行栅格划分,初始化信息素矩阵和优先级矩阵
2. REPEAT
3. 获取当前所在栅格的坐标,接收所有无人机坐标
4. 根据式(12)更新信息素矩阵
5. 计算周围栅格特征值
6. 根据式(13)计算各区域的飞行概率
7. 在周围栅格中,依概率选择一个栅格作为目标航路点飞行
8. IF mod(t, T)=0
9. 利用已有频谱数据进行插值得到场强矩阵 \hat{E}
10. 根据式(10)更新优先级矩阵
11. END IF
12. UNTIL 频谱监视任务完成

[23]中的基于飞行概率的信息素全局决策算法标注为算法 1*.

4 基于人工势场的信息素安全决策算法

通过大量实验发现,上述信息素决策流程存在一些弊端. 无人机虽然在决策过程中会以高概率选择信息素较高的栅格,但是可选栅格范围的局限性,会导致无人机自身陷入一片已搜索过的区域而无法跳出. 图 1 展示了在算法 1 下某时刻数字信息素强度分布情况,其中红色点表示无人机位置. 当无人机周围栅格信息素强度都较低时,在算法 1 的控制下,其只能选择邻近栅格中强度稍高的栅格作为目标航路点,但无法观察全局信息,跳出这片已搜索的区域. 为了让无人机更好地利用信息素所反映的空间未知程度,本节利用人工势场的思想对飞机决策算法做出改进:在无人机内构建势函数,通过势函数控制无人机飞行,一方面可以使无人机主动跳出已搜索区域,另一方面可以避免机间距离过近造成碰撞,以达到更好的安全监视效果.

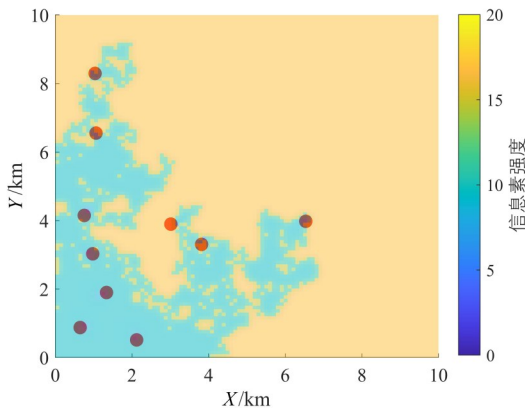


图 1 某时刻信息素强度分布(算法 1)

4.1 信息素势场

在监视区域中,每个栅格都拥有特定的信息素值,

信息素值越高则代表该栅格需被搜索的优先程度越高. 因此,可将这些信息素值较高的栅格视为势场源^[22],其对无人机具有吸引力作用. 需要注意的是,栅格数的取值不能过大,否则,一方面会造成计算负担,另一方面多个方向的势函数会相互抵消,对监视任务帮助甚微;而取值过小会导致集群向一个方向汇聚,不利于整个空间的监视. 在此选择信息素矩阵中值最高的 10 个栅格 $p_i, i \in [1, 10]$ 作为势场的源. 定义信息素势场 $f_i \in \mathbb{R}^2$ 如下:

$$f_i = Q_1 \frac{s_i}{\|r_{i,n}\|^3} r_{i,n} \quad (14)$$

其中, Q_1 为系数; s_i 为栅格 p_i 的信息素值; $r_{i,n}$ 为无人机 n 坐标到栅格 p_i 中心坐标的向量.

在集群执行监视任务过程中,这些重要栅格都将对无人机产生吸引力,因此可计算出信息素势场的合力 $F_1 \in \mathbb{R}^2$ 如下:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{10} f_i \quad (15)$$

4.2 机间排斥势场

由于无人机集群维护的信息素矩阵是同步的,信息素势场将导致无人机聚集在一起,因此,在集群飞行过程中,必须考虑机间避撞问题. 机间排斥势场可以保证无人机之间维持在安全距离,同时可以避免无人机集群搜索同一块未知区域,提高搜索效率. 定义无人机 n 所受机间排斥力 $F_2 \in \mathbb{R}^2$ 如下:

$$F_2 = \sum_{j \in N/n} Q_2 \frac{1}{\|r_{j,n}\|^3} r_{j,n} \quad (16)$$

其中, Q_2 为系数, $r_{j,n}$ 为无人机 j 到无人机 n 的坐标的向量.

4.3 飞行决策

当所有的势函数被计算出之后,可以得到无人机此时所受的合力如下:

$$F_{\text{sum}} = F_1 + F_2 \quad (17)$$

其中, F_1 表示信息素势场的合力,由信息素矩阵值最高的 10 个栅格计算; F_2 表示机间排斥势场组成的合力,避免无人机碰撞和趋于同一区域;总合力 F_{sum} 的方向指向无人机下一时刻要前往的方向,大小表示前进的距离. 由于考虑一阶积分器的动力学模型,因此可以直接将合力作为该时刻的速度输入,但由于式(16)中定义的势函数包含距离的负次幂,当无人机之间的距离过小时,此时的势函数趋于无穷大,直接将式(17)作为飞行速度将超出无人机硬件承受范围,因此需要对该合力进行限幅处理,此处选择反正切函数作为限幅函数,以保证速度输入维持在合理区间. 定义无人机最大速度为 v_{max} ,则无人机的飞行速度如下:

$$v = \arctan(F_{\text{sum}}) \times 2/\pi \times v_{\text{max}} \quad (18)$$

综上所述,集群具体决策流程如算法2所示.在步骤1中,随机初始化保证了无人机集群在首轮搜索当中以“均匀”的方式覆盖到区域当中,使首次采集的数据尽量保留频谱环境的整体特征,从而提升后续决策效果.在步骤3~7中,实时更新信息素矩阵,并根据当前势场计算对应的势场合力作为决策输出.由于式(12)中信息素矩阵的更新仅需要知道其余无人机位置信息即可,这可通过无人机的广播通信实现.同时,为适应未知且动态变化的频谱环境,每轮周期结束后,无人机将该周期的采样数据发送至数据融合中心,由数据融合中心通过插值来更新场强矩阵,并将对应更新后的优先级矩阵发送给每个无人机,作为无人机集群下一周期飞行决策的依据.

算法2 基于人工势场的信息素安全决策算法

1. 对电磁环境进行栅格划分,初始化信息素矩阵/优先级矩阵
2. REPEAT
3. 获取当前所在栅格的坐标,广播自身坐标,接收所有无人机坐标
4. 根据式(12)更新信息素矩阵
5. 根据式(14)~(17)计算无人机所受的合力
6. 根据式(18)计算无人机飞行速度
7. 执行飞行任务
8. IF mod(t, T)=0
9. 利用已有频谱数据进行插值得到场强矩阵 \bar{E}
10. 根据式(10)更新优先级矩阵
11. END IF
12. UNTIL 频谱监视任务完成

4.4 算法性能分析

本文提出的改进人工势场决策算法基于分布式思想设计.在飞行过程中,不需要地面基站为其发送指令,无人机可根据自身位置信息和通信范围内无人机之间交互的信息自适应地做出飞行决策,并且在每次飞行迭代中,所有无人机同时进行飞行决策.

在算法复杂度层面,监视空间为 $L \times W$ 的矩形区域,需要用 $n = L \times W/r_s^2$ 个栅格对该区域进行离散化,由于无人机需要维护包含栅格数量元素的信息素矩阵、优先级矩阵等数据,因此将消耗 $O(n)$ 的空间复杂度.在飞行决策过程中,由于信息素矩阵是乱序的,搜索信息素较强的栅格坐标需要对其进行排序,再选择信息素最强的10个栅格进行计算势场值,其中势场的计算均可在常数时间内完成,因此无人机速度计算的时间复杂度主要来自栅格排序,常见的排序算法快排、堆排序和归并排序的复杂度平均为 $O(n \log n)$,因此无人机飞行决策算法复杂度可视为 $O(n \log n)$.虽然相比算法1的常数复杂度来说略有牺牲,但通过式(15)(16)建立的势场可以充分用信息素矩阵所反映的空间未知程

度,引导每架无人机前往未知程度最高且距离自己最近的区域.因此相较于算法1,本文所提算法可以避免无人机陷入已搜索过的区域,探索新的未知区域.在实际应用而言,此类复杂度的牺牲是完全可以接受的.

此外,优先级矩阵的定期更新可以使集群在重点监视热度高区域的同时兼顾热度低的区域,因而及时感知环境中的频谱变化,适用于存在多个辐射源、移动辐射源等电磁态势动态变化的场景.5.2节的仿真结果印证了这个结论.

5 仿真结果

5.1 静态频谱下的集群控制仿真

考虑10架无人机执行频谱监视任务.设定无人机飞行最大速度 $v_{\text{max}} = 100 \text{ m/s}$,飞行高度 $H = 1 \text{ km}$,监视区域大小为 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$,优先级矩阵更新周期 $T = 200 \text{ s} = 200 \text{ s}$.其余参数如表1所示.

表1 参数设置

参数	值	参数	值
蒸发系数 E	0.65	传播系数 G	0.2
信息素势场参数 Q_1	100	机间排斥势场参数 Q_2	10^6
信息素释放量 $d(p_i, t)$	10	信息素初始值 s_0	10
重访时限 T_0	400 s	栅格边长 r_s	100 m

图2展示了集群飞行过程中某时刻各栅格的信息素强度分布图.可以看出,整体的信息素强度分布在5到15之间,10架无人机刚经过的区域栅格的信息素值较低,而未探索过的栅格信息素值较高,因而在下一周期的飞行中,无人机将以大概率前往未监视过的区域.并且由于信息素势函数的影响,靠近无人机的点对其造成的吸引力最强,因此无人机将前往离自己最近的未知区域.

为验证本文算法在应对复杂频谱场景下的性能,

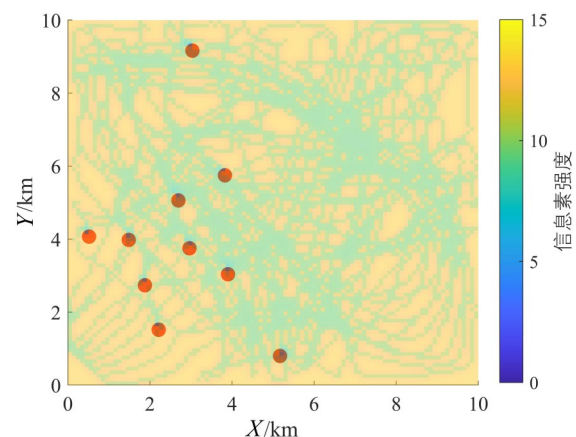
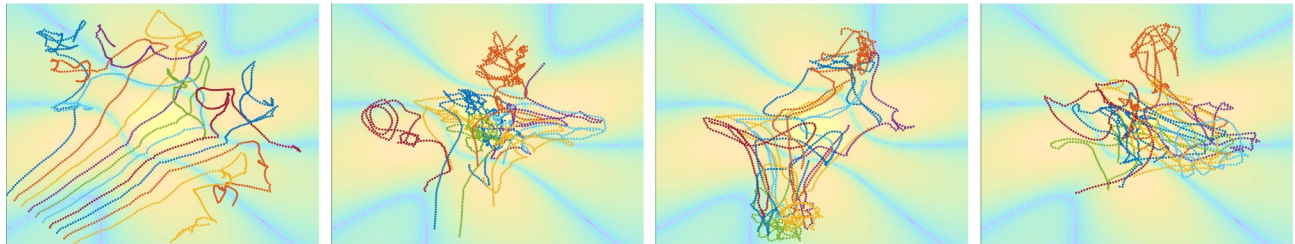


图2 某时刻信息素强度分布(算法2)

此处分别定义单辐射源场景和双辐射源场景,其中单辐射源场景的辐射源位置为(5 000 m, 5 000 m, 0 m),双辐射源场景的辐射源位置分别为(2 500 m, 2 500 m, 0 m)和(7 500 m, 7 500 m, 0 m).图3和图4分别展示了两种场景下前四个周期的无人机航迹点分布情况,其中黄色的背景底色表示高场强区域,蓝色表示低场强区域.可以看到,在第一周期,由于无人机优先级矩阵没有先验

信息,其航迹点均匀分布在电磁空间的各个区域.在之后的周期中,集群利用之前采集到电磁数据更新了优先级矩阵,集群趋向于主动搜索频谱热点区域.特别地,从图4中可以看到,由于地图中有多个辐射源,无人机会在不同辐射源之间往返飞行,并且在监视辐射源主瓣区域的同时,集群会搜索其余未监视的区域,如图4(b)和4(c)所示.



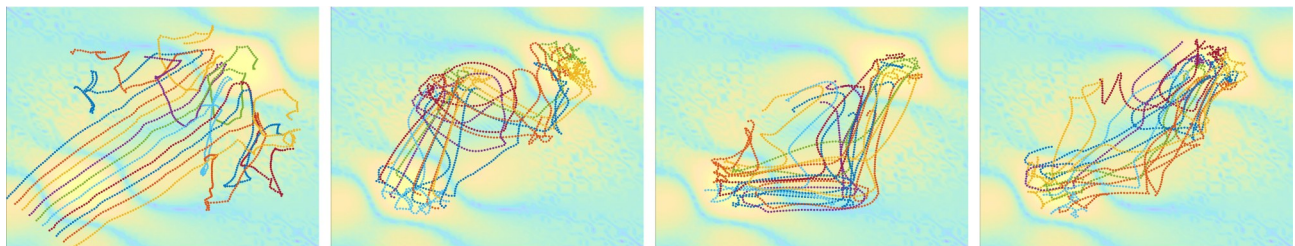
(a) 第一周期航迹点

(b) 第二周期航迹点

(c) 第三周期航迹点

(d) 第四周期航迹点

图3 不同周期集群航迹点示意图(单辐射源)



(a) 第一周期航迹点

(b) 第二周期航迹点

(c) 第三周期航迹点

(d) 第四周期航迹点

图4 不同周期集群航迹点示意图(双辐射源)

图5分析了无人机集群飞行过程中最短机间距离的变化.可以看出,在整个飞行过程中,无人机间距几乎一致维持在警戒距离之外.当间距接近警戒距离时,作用于避撞的机间排斥力将会占据主导作用,牵引集群运动,以防止机间碰撞.

图6对比了单辐射源(图6(a))和双辐射源(图6(b))场景下基于飞行概率的信息素局部决策算法

(算法1)、基于飞行概率的信息素全局决策算法(算法1*)和基于人工势场的信息素安全决策算法(算法2)的评价函数(式(6))曲线.可以看到在本文场景中,全局决策相较局部决策并无明显优势,不仅消耗了 $O(n)$ 的时间复杂度,而且在部分时段的监视效果比局部决策算法更差.基于人工势场的决策算法经过飞行迭代后具有更低的评价函数,这意味着该决策算法对频谱热点的覆盖程度更高.同时,值得注意的是,数字信息素会周期性地自增,所以会导致其评价函数震荡.本文所提方法的震荡幅度远低于基于飞行概率的决策算法,这表明本文所提算法在搜索效果层面更具有稳定性.

图7对比了在单辐射源场景下,不同决策算法在不同无人机集群数量下的性能.图7(a)对比了在 $t > 1\ 000$ s时的评价函数均值,图7(b)对比了在 $t > 1\ 000$ s时的评价函数标准差.从图7(a)中可以看到,当无人机数量增大时,三种算法的评价函数均值都有降低,即监视效果有所提升,但是本文算法(算法2)的监视效果始终最好;从图7(b)中可以看到,本文算法的评价函数标准差远低于算法1和算法1*,即本文算法能维持更稳定

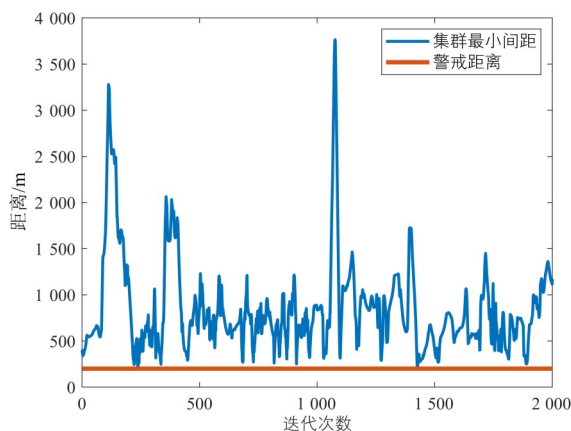


图5 无人机集群最短机间间距变化图

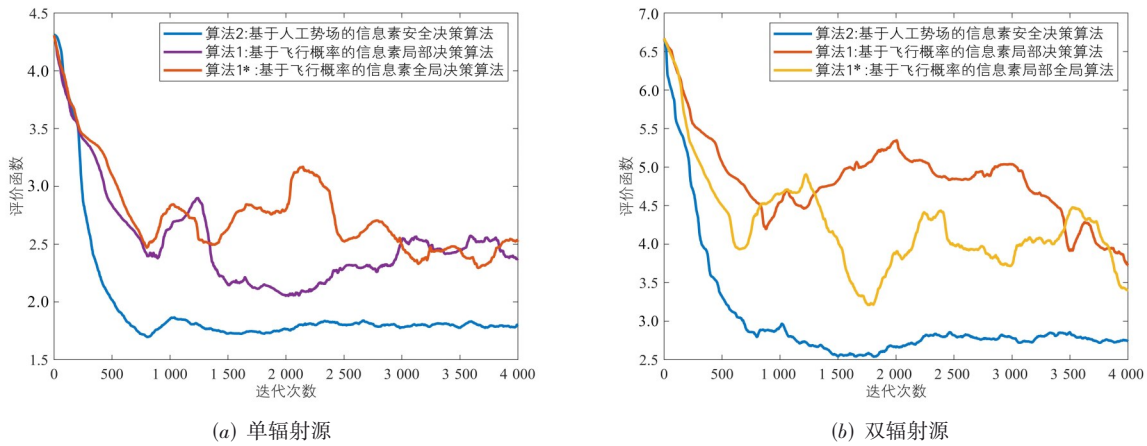


图6 不同决策算法的评价函数曲线

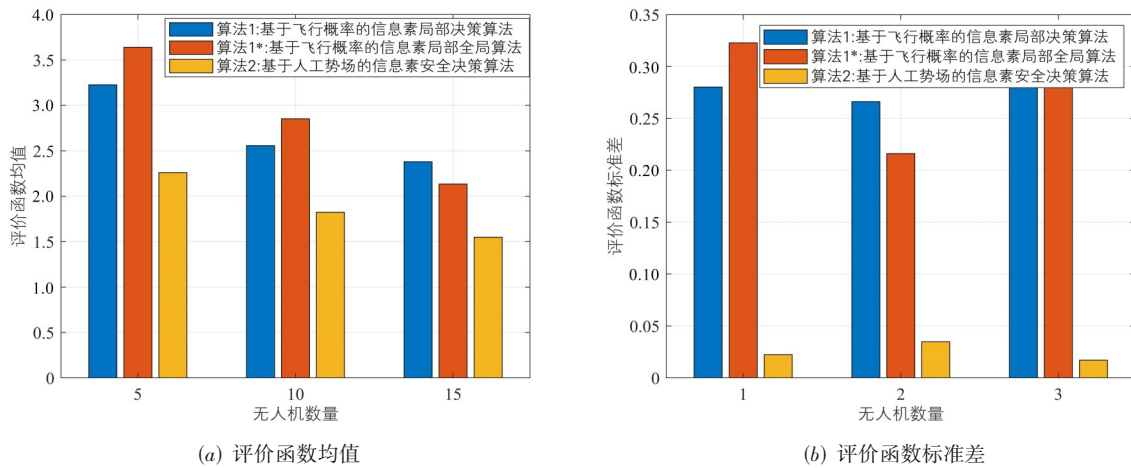


图7 不同决策算法在不同无人机数量下的性能对比

的监视效果.

5.2 动态频谱下的集群控制仿真

为分析本文所提算法在动态频谱监视中的效果,考虑动态的频谱热点变化场景.假定在 $t=1000\text{ s}$ 时,频谱热点中心由左下角(2500 m,2500 m)变为右上角(7500 m,7500 m).图8展示了集群在面临频谱环境变化下不同阶段的航迹点示意图.由图8可知,在第800~1000 s,

集群航迹稳定收敛在热点区域附近;在第1000~1200 s,频谱热点区域发生变化,但由于集群还没有收集到足够的采样点以更新优先级矩阵,因而监视重点仍在变化之前的频谱热点周围;在第1200~1400 s,集群利用上一周期新采样的空间电磁数据更新了优先级矩阵,集群逐渐向新的频谱热点靠近;在第1400~1600 s,集群飞行趋于稳定至新的热点区域,在重点覆盖频谱热点的同时依旧兼顾其余位置的监视.

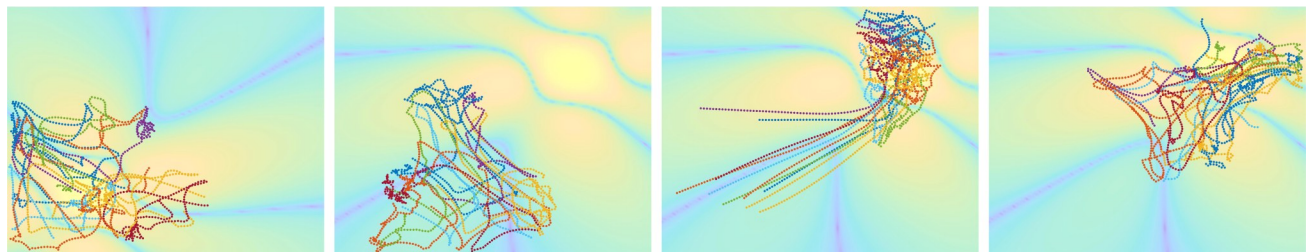
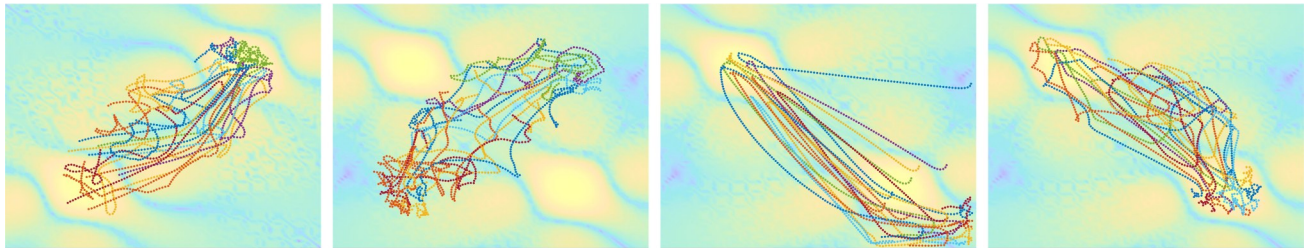


图8 动态频谱下的集群航迹点变化示意图(单辐射源)

考虑两个辐射源场景,在 $t=1\ 000\text{ s}$ 时,辐射源 1 从 $(2\ 500\text{ m}, 2\ 500\text{ m}, 0\text{ m})$ 移动到 $(2\ 500\text{ m}, 7\ 500\text{ m}, 0\text{ m})$,辐射源 2 从 $(7\ 500\text{ m}, 7\ 500\text{ m}, 0\text{ m})$ 移动到 $(7\ 500\text{ m}, 2\ 500\text{ m}, 0\text{ m})$. 图 9 展示了在双辐射源移动场景下不同阶段的航迹点示意图,可以看到,在第 800~1 000 s,无人机集群稳定

往返于两个辐射源之间;在第 1 000~1 200 s,辐射源发生移动,集群尚未收集到足够数据以更新优先级矩阵,因而维持上一阶段的状态;在第 1 200~1 600 s,随着优先级矩阵的更新,集群开始监视新的辐射源中心,并逐渐趋于稳定.



(a) 第 800~1 000 s

(b) 第 1 000~1 200 s

(c) 第 1 200~1 400 s

(d) 第 1 400~1 600 s

图 9 动态频谱下的集群航迹点变化示意图(双辐射源)

图 10 展示了上述两个场景下集群的评价函数曲线. 可以看到,虽然在 $t=1\ 000\text{ s}$ 频谱环境发生变化时,评价函数有所提升,但是随着优先级的更新,评价函数

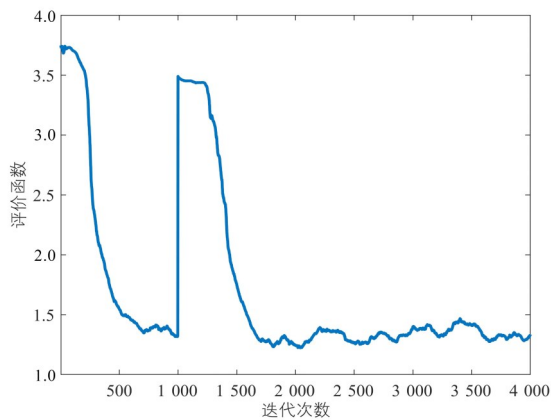
在很短时间内收敛. 综上所述,本文所提算法对动态频谱监视场景具有较好的自适应性.

6 总结

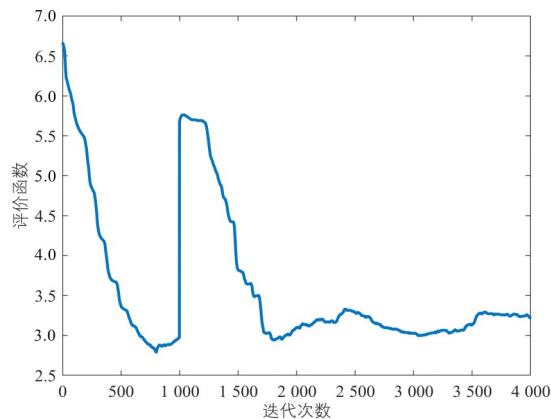
为了提高无人机集群在执行频谱监视任务时的效率,本文设计了基于频谱热度和监视状态的评价函数用于评估监视效果,提出了基于数字信息素的改进人工势场集群控制算法. 该算法利用数字信息素对电磁空间监视状态进行量化,采用人工势场的思路设计势函数,引导无人机搜索未知空间,并设计实时优先级更新来引导集群优先覆盖频谱热点. 实验表明,在监视效果层面,本文所提算法相较于已有的基于飞行概率的数字信息素决策算法具有更好的监视效果,并且在面对动态变化的频谱环境时依然有较好的表现.

参考文献

- [1] 王瑞霞. 频谱监测系统电磁态势感知模块设计[J]. 电子质量, 2020(1): 62-65.
WANG R X. Design of electromagnetic situation awareness module for spectrum monitoring system[J]. Electronics Quality, 2020(1): 62-65. (in Chinese)
- [2] 丁国如, 孙佳琛, 王海超, 等. 复杂电磁环境下频谱智能管控技术探讨[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 524750.
DING G R, SUN J C, WANG H C, et al. Discussion on technologies for intelligent spectrum management and control under complex electromagnetic environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 524750. (in Chinese)
- [3] 吴迎年, 张霖, 张利芳, 等. 电磁环境仿真与可视化研究综述[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6332-6338.
WU Y N, ZHANG L, ZHANG L F, et al. Survey on electromagnetic environment simulation and visualization[J].



(a) 单辐射源



(b) 双辐射源

图 10 动态频谱环境下的评价函数

- Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 6332-6338. (in Chinese)
- [4] 孟庆达, 侯卫国, 曾笑. 低轨区域电磁频谱监视效能分析[J]. 空间电子技术, 2018, 15(4): 82-88.
MENG Q D, HOU W G, ZENG X. Analysis of spectrum surveillance effectiveness for LEO region[J]. Space Electronic Technology, 2018, 15(4): 82-88. (in Chinese)
- [5] 李峰, 庄乾波. 基于船载卫星通信多路频谱监视系统的设计研究[J]. 中国新通信, 2018, 20(9): 24.
LI F, ZHUANG Q B. Design and research of multi-channel spectrum monitoring system based on ship-borne satellite communication[J]. China New Telecommunications, 2018, 20(9): 24. (in Chinese)
- [6] SOSHNIKOV A A, MIGALEV I E, TITOV E V. A mobile system for integrated characterization of electromagnetic radiation danger[J]. Russian Electrical Engineering, 2018, 89(12): 685-688.
- [7] 李晗, 苏京昭, 闫咏. 智能无人机集群技术概述[J]. 科技视界, 2017(26): 5-7.
LI H, SU J Z, YAN Y. Summary of the technology about swarm intelligence of UAV[J]. Science & Technology Vision, 2017(26): 5-7. (in Chinese)
- [8] 高杨, 李东生, 柳向. 无人机集群协同态势觉察一致性评估[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 190-196.
GAO Y, LI D S, LIU X. UAV swarm cooperative situation perception consensus evaluation[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 190-196. (in Chinese)
- [9] 梁百川. 战场电磁频谱监测与管理[J]. 航天电子对抗, 2008, 24(4): 38-41.
LIANG B C. Monitoring and management of battlefield electromagnetic spectrum[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008, 24(4): 38-41. (in Chinese)
- [10] WU G Y. UAV-based interference source localization: A multimodal Q-learning approach[J]. IEEE Access, 2019, 7: 137982-137991.
- [11] 李佳, 王长焕, 刘献杰, 等. 面向电磁频谱战的策略研究[J]. 无线电工程, 2021, 51(4): 326-330.
LI J, WANG C H, LIU X J, et al. Research on policy oriented electromagnetic spectrum warfare[J]. Radio Engineering, 2021, 51(4): 326-330. (in Chinese)
- [12] 吴盛君. 基于无人机平台的辐射源搜索定位研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
WU S J. Research on Electromagnetic Radiation Source Searching and Positioning with UAV Platforms[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [13] 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, 32(1): 11-16.
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, 32(1): 11-16. (in Chinese)
- [14] LIU H X, LIU F, ZHANG X J, et al. A formation reconfiguration algorithm for multi-UAVs based on distributed cooperative coevolutionary with an adaptive grouping strategy[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(5): 841-851.
- [15] FAN B K, LI Y, ZHANG R Y, et al. Review on the technological development and application of UAV systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(2): 199-207.
- [16] 尹高扬, 周绍磊, 吴青坡. 基于改进RRT算法的无人机航迹规划[J]. 电子学报, 2017, 45(7): 1764-1769.
YIN G Y, ZHOU S L, WU Q P. An improved RRT algorithm for UAV path planning[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1764-1769. (in Chinese)
- [17] SINGH M K, PARHI D R. Path optimisation of a mobile robot using an artificial neural network controller[J]. International Journal of Systems Science, 2011, 42(1): 107-120.
- [18] 韩博文, 姚佩阳, 孙昱. 基于多目标MSQPSO算法的UAVS协同任务分配[J]. 电子学报, 2017, 45(8): 1856-1863.
HAN B W, YAO P Y, SUN Y. UAVS cooperative task allocation based on multi-objective MSQPSO algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(8): 1856-1863. (in Chinese)
- [19] 朱利, 符小卫. 基于Voronoi图质心的多无人机协同区域搜索算法[J]. 无人系统技术, 2019, 2(2): 39-51.
ZHU L, FU X W. Multiple UAVs cooperative area search algorithm based on centroid of voronoi diagram[J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(2): 39-51. (in Chinese)
- [20] DELIGHT M, RAMAKRISHNAN S, ZAMBRANO T, et al. Developing robotic swarms for ocean surface mapping [C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm: IEEE, 2016: 5309-5315.
- [21] 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 X, RU C J. Digital-pheromone-based control method for UAV swarm search[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 591-596. (in Chinese)

nese)

- [22] QU Y H, ZHANG Y T, ZHANG Y M. A UAV solution of regional surveillance based on pheromones and artificial potential field theory[C]//2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Piscataway: IEEE, 2015: 380-385.
- [23] 吴傲, 杨任农, 梁晓龙, 等. 基于信息素决策的无人机集群协同搜索算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(4): 814-827.
WU A, YANG R N, LIANG X L, et al. Cooperative search algorithm based on pheromone decision for UAV swarm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(4): 814-827. (in Chinese)
- [24] CORTES J, MARTINEZ S, KARATAS T, et al. Coverage control for mobile sensing networks[C]//Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292). Washington: IEEE, 2002: 1327-1332.
- [25] KALIVARAPU V, WINER E. Digital pheromone implementation of PSO with velocity vector accelerated by commodity graphics hardware[C]//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston: AIAA, 2009: 2192.
- [26] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国大陆地区气象要素的空间插值[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47-56.
LIN Z H, MO X G, LI H X, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(1): 47-56. (in Chinese)
- [27] MOLINARI M, FIDA M R, MARINA M K, et al. Spatial interpolation based cellular coverage prediction with crowdsourced measurements[C]//Proceedings of the 2015 ACM SIGCOMM Workshop on Crowdsourcing and Crowdsharing of Big (Internet) Data. New York: ACM, 2015: 33-38.

作者简介



陈柯宇 男, 1999年出生, 四川内江人. 电子科技大学硕士研究生. 主要研究方向为多智能体协同控制和信号处理.

E-mail: keyu_chen@std.uestc.edu.cn



杨健(通讯作者) 男, 1982年出生, 安徽颍上人. 电磁空间认知与智能控制技术实验室研究员. 主要研究方向为群体电磁博弈.

E-mail: yuhengzi_8205@163.com



张蕴霖 男, 1997年出生, 山东青岛人. 电子科技大学博士研究生. 主要研究方向为多智能体协同控制.

E-mail: robert1zhang@163.com



邵晋梁 男, 1981年出生, 山西省宁武县人. 2003年获电子科技大学学士学位, 2009年获电子科技大学博士学位, 2013年赴澳大利亚国立大学访问一年. 目前任电子科技大学教授. 主要研究方向为群体智能机理分析、群体频谱智能、多智能体系统协同控制等. 中国电子学会会员编号: E190035888M.

E-mail: jinliangshao@126.com