

考虑网络容侵机制的无人机集群协同编队组网策略

章招铭¹, 伍益明^{1†}, 郑宁¹, 朱晨睿^{1,2}, 孟伟³

(1. 杭州电子科技大学 网络空间安全学院, 浙江 杭州 310018;

2. 华东计算技术研究所, 上海 201808; 3. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 无人机集群控制中, 保持稳定可靠的通信网络对于系统协同执行任务具有重要影响. 为应对通信环境中可能出现的欺骗攻击、拜占庭攻击等网络入侵情形, 本文研究无人机集群协同构造具备容侵能力的系统通信拓扑问题. 首先, 在考虑无人机节点同构且通信半径一致有界的前提下, 将通信拓扑构建问题转化为无人机集群编队队形控制设计问题; 随后, 基于虚拟结构策略, 提出一种新颖的分布式晶格结构编队控制方法, 并构建一类与位置距离相关的势场函数, 以满足无人机节点向根节点聚集和碰撞避免等任务需求, 通过理论分析和数学推导证明所提算法的收敛性; 此外, 基于所提方法进一步发展, 提出一种维持网络容侵能力不变的集群向指定区域扩展的编队方法; 最后, 通过 2 组典型多无人机编队仿真实验, 验证所提方法构建成的网络, 可使集群在执行协同控制任务时容忍特定数量的网络攻击.

关键词: 无人机集群; 网络攻击; 编队控制; 通信拓扑构建

引用格式: 章招铭, 伍益明, 郑宁, 等. 考虑网络容侵机制的无人机集群协同编队组网策略. 控制理论与应用, 2025, 42(3): 499 – 510

DOI: 10.7641/CTA.2023.30192

Collaborative formation networking strategy for UAVS considering network attack tolerance mechanism

ZHANG Zhao-ming¹, WU Yi-ming¹, ZHENG Ning¹, ZHU Chen-rui^{1,2}, MENG Wei³

(1. School of Syberspace, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

2. The East-China Research Institute of Computer Technology., Shanghai 201808, China;

3. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: Maintaining a stable and reliable communication network in unmanned aerial vehicle swarm (UAVS) control has a significant impact on the collaborative execution of tasks by the system. In order to cope with potential network attacks such as deception attacks and Byzantine attacks in communication environments, this paper investigates the problem of cooperative construction of communication topology with tolerance for network intrusion for UAVS. Firstly, considering the isomorphism of UAVS nodes and the uniform and bounded communication radius, the communication topology construction problem is transformed into the design problem of UAVS formation control. Subsequently, based on the virtual structure strategy, a novel distributed lattice structure formation control method is proposed. Each UAVS node follows the movement strategy of the corresponding position in the lattice structure, and a potential field functions related to position distance is constructed to meet the task requirements of UAVS nodes approaching the root node and collision avoidance. The convergence of the proposed algorithm is demonstrated through theoretical analysis and mathematical derivation. Furthermore, a novel formation algorithm is proposed to maintain the robustness of the network and expand the UAVS to a designated area. Finally, two simulation experiments are performed to validate the effectiveness of the proposed formation control strategies.

Key words: unmanned aerial vehicle swarm; network attack; formation control; communication topology construction

Citation: ZHANG Zhaoming, WU Yiming, ZHENG Ning, et al. Collaborative formation networking strategy for UAVS considering network attack tolerance mechanism. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(3): 499 – 510

收稿日期: 2023-04-07; 录用日期: 2023-11-30.

†通信作者. E-mail: ymwu@hdu.edu.cn; Tel.: +86 571-86873820.

本文责任编辑: 苏剑波.

国家自然科学基金项目(U1911401, 62073109), 浙江省公益技术应用研究项目(LGF21F020011)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1911401, 62073109) and the Zhejiang Provincial Public Welfare Research Project of China (LGF21F020011).

1 引言

近年来,无人机凭借其高机动性、高生存率等特点,在军事和民用等多个领域得到广泛的应用^[1-2].然而,随着所执行任务难度和复杂度不断增加,单架无人机的表现已很难达到所期望的目标,研究者们逐渐将注意力转向对具备协同执行任务的无人机集群(unmanned aerial vehicle swarm, UAVS)的研究^[3-4].

多无人机协同组网编队控制是多无人机协同控制的核心问题.通过让无人机集群构成一定的编队队形,从而赋予多无人机系统完成复杂任务的能力.常见的编队组网方法有:势场法^[5]、虚拟结构法^[6]、领导跟随法^[7].但随着网络技术不断发展,无人机编队的网络安全情况日益严峻^[8-9].为解决这类问题,研究人员提出一种可以在编队内存在恶意攻击者的情况下,通过协同合作抵御网络攻击的策略,即在部分无人机遭遇网络攻击的情况下,一个合理的集群编队可在预先设置的控制算法下安全地完成规定任务^[10-13].

但设计一个具备容忍网络攻击能力的编队是一项较为新颖却十分具有难度的挑战.在文献[10,14]中,Yu等通过设计特定的无人机运动路径与速度,使得无人机能周期性地与区域内其他无人机交汇并交换信息,以此来提高抵御网络攻击的能力.类似地,在文献[15]中,作者则以正弦曲线的方式设计了机器人运动轨迹,并通过调整幅度与频率实现邻居交汇.此外,文献[16]提出了一种控制策略,使不同区域监测的机器人周期性地固定在位置交汇.

上述方法本质上均采用了时间累积通信网络拓扑(周期内各时刻拓扑并集)的策略,即通过符合周期连通性条件以增强集群抵抗网络攻击的能力.但提高周期连通性可能导致更高能耗^[14],且一个周期内仅交互更新一次状态,难以满足一些需要高鲁棒性和高实时性要求的无人机集群任务^[17-18].为了更好地刻画所构造编队抵御网络攻击的能力,文献[8]首次提出了基于图论的 r -鲁棒图的概念.作者研究表明,对于一个通信拓扑满足 r -鲁棒图的系统,即使系统内的部分节点因网络攻击而被挟持成为恶意节点,该系统依旧可以通过设计一个合适的控制算法^[19-21],使系统实现状态趋同^[22-24].

文献[18]中,Guerrero-Bonilla等设计了直线型、三角型和正方形编队策略.在上述编队策略下,编队只需调整合适的通信半径,集群通信拓扑则能始终符合 r -鲁棒图的性质.进一步,作者在文献[25]中,给出了一种能在不改变系统鲁棒性条件下添加节点的方案.与文献[18]不同,文献[26]则提出一种密集构造策略,以阶为单位从中心向外扩展.结构中集群个体只需更小通信半径便能达到所需的鲁棒性要求,但文中未详述其构建方法.在实际应用场景中,无人机的部署通

常具有随机性^[27-29],且在构建无人机编队过程中^[26],由于外部环境因素与自身限制,实际操作存在较多挑战.

基于以上的讨论,本文围绕无人机集群编队问题,考虑网络威胁下如何通过设计群组编队方法以构造具有 r -鲁棒图性质的通信网络,从而赋予编队系统容忍网络入侵的能力.本文的主要贡献如下:

1) 提出一种改进的基于势场法的无人机集群编队控制方法.该方法克服传统势场法^[5,18]局部最优问题,成功实现将平面上随机部署的无人机节点向根节点牵引控制;

2) 提出一种基于虚拟结构法的分布式组网策略.所提方法能将无人机节点牵引至晶格结构指定位置,解决传统势场法下邻居数量下限不可确定问题,并组建具备满足特定网络容侵能力的 p -编队通信网络;

3) 提出一种无人机集群网络拓展策略.该策略下,新增无人机节点找寻各自的位置部署,最终使整个集群向一个指定区域进行拓展,并保证拓展后的集群仍旧维持原先网络容侵能力不变.

2 预备工作

2.1 图论

具有 N 架无人机组成的集群通信拓扑可抽象为一个无向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 进行表示.集群中的每架无人机均可看成图中的一个节点. $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示无人机节点集合, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 表示节点之间通信边的集合. $\mathcal{N}_i = \{j \mid (i, j) \in \mathcal{E}\}$ 表示节点 i 的邻居集合.下面介绍几个有关图论的定义.

定义 1(r -可达集^[8]) 对于图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$,若存在一个非空子集 $\mathcal{S} \subset \mathcal{V}$,集合 \mathcal{S} 中至少存在一个节点 i ,其在集合 $\mathcal{N}_i \setminus \mathcal{S}$ 中有不少于 r 个邻居,则称 \mathcal{S} 为 r -可达集.

定义 2(r -鲁棒图^[8]) 对于图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$,如果 \mathcal{V} 中存在一对非空子集 $\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2$,集合满足 $\mathcal{S}_1 \cap \mathcal{S}_2 = \emptyset$ 且两个集合中至少存在一个 r -可达集,则称 \mathcal{G} 为 r -鲁棒图.

有了以上关于图论的相关基础,根据文献[26]的相关研究,可以得到以下关于节点通信半径与通信拓扑鲁棒性关系的相关内容.

引理 1^[26] 令 ζ_c 与 ρ 表示一个圆形区域的中心和半径,区域内节点的通信拓扑 $\mathcal{G} = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}\}$ 为一个 $(2f+1)$ -鲁棒图,且节点的通信半径 $R_c = R$.设 \mathcal{V} 的一个子集 \mathcal{B} 满足 $\mathcal{B} = \{i \in \mathcal{V} : \|\zeta_i - \zeta_c\| \leq \rho\}$,其中 $|\mathcal{B}| \geq f$.当 $R \geq 2\rho$ 时,一个不属于集合 \mathcal{V} 的节点 i 处于以 ζ_c 为圆心、 $R - \rho$ 为半径的区域内时,节点集 \mathcal{V} 在添加节点 i 后的通信拓扑仍然是一个 $(2f+1)$ -鲁棒图.

2.2 晶格结构

晶格结构编队最早由文献[26]提出. 晶格结构由带整数系数的 \mathbb{R}^2 基元线性组合构成. 设基元为 \mathbf{v}_1 和 \mathbf{v}_2 , 满足 $\|\mathbf{v}_1\| = \|\mathbf{v}_2\| = l$, l 表示晶格长度. 以下是平面晶格结构定义:

$$\mathbf{L} = \{a_i \mathbf{v}_1 + b_i \mathbf{v}_2 : \text{span}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2\} = \mathbb{R}^2; a_i, b_i \in \mathbb{Z}\}, \quad (1)$$

其中正方形晶格结构 \mathbf{L}_\square 的基础元素 \mathcal{B}_\square 定义如下:

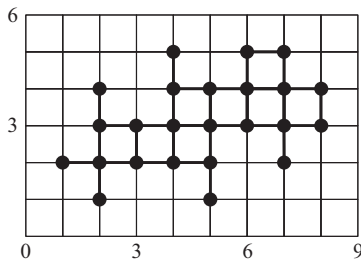
$$\mathcal{B}_\square = \{\mathbf{v}_{1\square} = l \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{v}_{2\square} = l \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\}. \quad (2)$$

若节点的位置与晶格结构顶点的位置相同, 即 $\zeta_i \in \mathbf{L}_\square$, 则认为此节点是在晶格结构上的. 如图1(a)所示, 根据上述定义可知, 图中的所有节点均处于正方形晶格结构上.

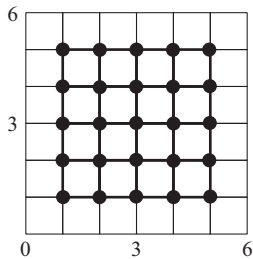
定义 3^[26] (p -编队) 假设给定单个网格长度为 d , 基于网格 \mathbf{L}_\square 的多层编队形式用 $L_k^{\mathbf{L}_\square, d}$ 来表示, 其中 k 表示编队形式的层数. $L_0^{\mathbf{L}_\square, d} = \{\zeta_{\text{root}}\}$ 是整个编队的中心. 对于 $k \geq 1$ 的 $L_k^{\mathbf{L}_\square, d}$ 来说, 其是基于 $L_{k-1}^{\mathbf{L}_\square, d}$ 来构建的, 具体如下:

$$L_k^{\mathbf{L}_\square, d} = \{\zeta_j \in \mathbf{L}_\square \setminus \bigcup_{i=1}^{k-1} L_i^{\mathbf{L}_\square, d} : \|\zeta_j - \zeta_i\| \leq d, \forall \zeta_i \in L_{k-1}^{\mathbf{L}_\square, d}\}. \quad (3)$$

根据上述 p -编队的定义, 可以验证, 图1(b)是一个 2-编队.



(a) 正方形晶格结构



(b) p -编队晶格结构

图 1 晶格结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the lattice structure

根据晶格结构的描述和 p -编队的定义, 可以得出如下引理:

引理 2^[26] 若一个 p -编队中, 每个节点的通信

半径都满足 $R_c \geq \rho_\beta(p_{\min}(4f + 1) + p_{\min}(2f + 1))$, 则系统的通信拓扑为 $(2f + 1)$ -鲁棒图.

2.3 攻击模型与安全算法

本文的网络攻击模型沿用自文献[8], 即网络攻击者通过入侵劫持集群中的部分个体, 使被劫持的个体恶意发送虚假的状态数据给相邻个体, 以此达到破坏集群系统协同执行任务的目的. 同样, 与文献[8]一样, 考虑攻击资源限制, 本文对集群中被入侵并转为恶意节点的数量上限进行了合理的限制.

定义 4 (f -局部攻击模型^[8]) 对于系统中的任意一个节点 i , 在任意时刻其所有邻居中恶意节点的数量不会超过 f 个, 则称该模型为 f -局部攻击模型.

文献[30]针对上述攻击模型提出一种所谓的加权均值子序列减 (weighted mean subsequence reduced, W-MSR) 算法. 在 W-MSR 算法中, 节点依次执行以下操作: 接收邻居状态数据并根据大小进行排序; 将节点 i 的状态数据 $x_i[t]$ 与邻居节点比较, 若有大于或等于 f 个节点数据比 $x_i[t]$ 大, 删除最大的 f 个, 反之则移除全部比 $x_i[t]$ 大的数据; 同样地, 若有大于或等于 f 个节点数据比 $x_i[t]$ 小, 删除最小的 f 个, 反之则移除全部比 $x_i[t]$ 小的数据; 剩余未删除的数据集合用 $\mathcal{R}_i[t]$ 表示; 节点 i 根据剩余数据集 $\mathcal{R}_i[t]$ 按照下述更新方程作出下一时刻的状态值更新:

$$x_i[t + 1] = x_i[t] + \epsilon \sum_{j \in \mathcal{R}_i[t]} w_{ij}(x_j[t] - x_i[t]), \quad (4)$$

其中: t 表示迭代次数, ϵ 为系统参数. 根据文献[30]可知, 若系统的通信拓扑是一 $(2f + 1)$ -鲁棒图, 且每个正常节点都按照上述 W-MSR 算法的步骤进行迭代更新, 那么系统可以在至多存在 f 个恶意节点的情况下实现状态值收敛.

3 编队策略设计

本章节主要阐述控制策略的设计, 以及对每个节点的受力模型进行构建. 文中假定每个无人机装载了定位模块, 个体通过定位模块可以实时获知自身的位置信息, 并通过相邻节点通信交互, 计算获知彼此的物理距离.

本文根据势场法^[5]的框架, 通过设计编队策略以实现将集群中节点牵引至晶格结构的目的. 势场法即将节点模拟为势场中的粒子, 每个节点都是一个势场源, 节点对势场范围内的所有节点施以一定度量的虚拟力. 受到虚拟力的节点, 根据虚拟力的大小和方向调节自身的运动状态.

不同于传统势场法^[5, 26], 本文提出一种虚拟力晶格算法 (virtual force lattice algorithm, VFLLA). VFLLA 可以在保持主动构造编队能力的同时, 借助晶格结构优化编队, 以此摆脱传统势场法下构造的集群容易呈

现不规则地聚集这一问题^[31].

对于节点*i*和节点*j*, 本文构造以下虚拟力与势场函数的关系式:

$$\mathbf{F}_{ij} = -\nabla U_{ij}, \quad (5)$$

其中: \mathbf{F}_{ij} 表示节点*i*和节点*j*之间的虚拟力大小, U_{ij} 表示节点*i*与节点*j*之间势场函数. 在本文中对节点的受力模型作如下设计:

$$\ddot{\zeta}_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{F}_{ij} - k_d \dot{\zeta}_i, \quad (6)$$

其中: $\ddot{\zeta}_i$ 表示节点的加速度, $\dot{\zeta}_i$ 表示节点的速度, \mathcal{N}_i 表示节点邻居的集合, k_d 表示正阻尼系数. 此式阐述了节点所受的力与运动状态的关系.

根据传统虚拟力算法^[31], 对于相邻节点之间力的大小关系, 本文进行以下设计:

$$\mathbf{F}_{ij} = \begin{cases} (W_A(d_{ij} - d_{th}), \alpha_{ij}), & d_{ij} > d_{th}, \\ 0, & d_{ij} = d_{th}, \\ (W_R(\frac{1}{d_{ij}}), \alpha_{ij} + \pi), & d_{ij} < d_{th}, \end{cases} \quad (7)$$

其中: d_{ij} 是节点*i*和节点*j*之间的欧氏距离, d_{th} 是节点*i*和节点*j*之间距离的阈值, α_{ij} 是*i*到*j*力的方向, W_A 与 W_R 是吸引力与排斥力的量化函数. 阈值距离 d_{th} 控制节点彼此间的距离, 即 $d(i, j) > d_{th}$, 则两个节点之间施加的是吸引力; 若 $d(i, j) < d_{th}$, 则两节点之间就是排斥力.

上述方法仅考虑了邻居节点作用力 \mathbf{F}_{ij} . 由文献[8]可知, 当节点间距离过大时, 可能产生局部最优现象, 不利于编队构建. 为解决这一问题, 本文引入根节点的概念. 根节点是每个*p*-编队的中心节点, 且每个*p*-编队有且仅有一个根节点. 节点根据预设的根节点位置坐标计算该根节点对其施加的虚拟力. 因此, 依据式(6)的控制规律, 节点*i*上的总作用力 \mathbf{F}_i 可以表示为

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{F}_{iroot}, \quad (8)$$

其中 \mathbf{F}_{iroot} 表示根节点的施于节点*i*的作用力. 图2为节点1受力示意图, 其中圆的直径为节点之间的距离阈值. 可以发现, 不同的安全阈值距离选取对编队构造的成功与否不产生影响, 但会对完成的耗时造成影响, 但并不显著. 因此, 为便于对后续编队的分析梳理, 本文将安全阈值距离与节点编队距离设置成了相同的值.

3.1 *p*-编队构造策略

此小节将阐述VFLA算法如何实现*p*-编队的构造. 本文将集群中的节点分为两类节点:

- 1) 部署节点; 2) 游荡节点.

本研究将随机分布在平面上尚未部署至*p*-编队的

节点定义为游荡节点. 游荡节点在进入根节点或其他已部署节点的通信范围内时, 经计算确定其在编队中的具体部署位置. 随后, 游荡节点依据预设根节点位置 ζ_{root} 及邻近节点位置 ζ_i 确定移动方向, 并朝该方向行进直至部署完毕.

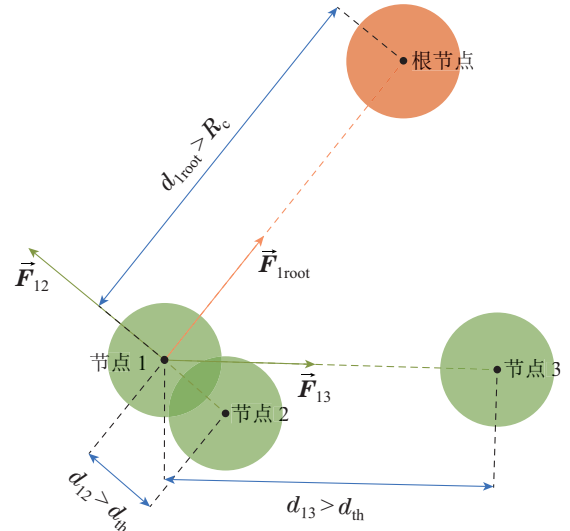


图2 节点1的受力模型

Fig. 2 Force model of node 1

部署节点包括根节点以及已部署至*p*-编队、同阶节点数量满足预设值的游荡节点. 设根节点为0-编队, 并依次定义其他编队. 考虑*p*-编队, 可推导出节点数量与*p*之间的关系, 即

$$n_\beta(p) = 4p^2 + 4p + 1, \quad (9)$$

根据式(9)亦可推导出第*q*阶层所包含节点的数量, 其中 $0 < q \leq p$, 关系如下:

$$n_\varphi(q) = 8q, \quad (10)$$

当第*q*阶层节点数量达到 $n_\varphi(q)$ 时, 此阶层所有节点开始具备部署子节点的能力.

部署节点的任务是与通信范围内的游荡节点协商部署位置, 即通过部署节点本身所处的位置告知游荡节点其可部署的具体位置.

部署节点首先判断通信范围内是否有游荡节点的存在, 若有则进行部署, 若无则继续等待, 直到其子节点数量达到上限.

若部署节点是根节点, 则其部署方式如图3所示, 其中: 中心节点为根节点, 四周节点表示非根节点, 根节点为唯一具有9个子节点的部署节点, 且其部署顺序如图3中箭头所示, 即顺时针围绕根节点部署.

考虑到若按照根节点的部署方式部署非根节点, 将导致系统的部署效率较低. 为解决非根节点部署效率低的问题, 本文提出赋予非根节点部署能力的编队策略. 具体地, 提出一种基于节点位置类型的编号方法. 编号规则为: 根节点类型为0; 四角分别编号为2,

6, 8(顺时针从左上角开始); 左侧非对角为1、上侧为3、右侧为5、下侧为7.

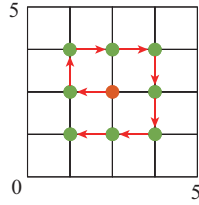


图3 根节点部署方式

Fig. 3 Root node deployment mode

经过上述编号规则分类, 可以发现奇数类型节点只有1个子节点, 部署位置类型相同; 偶数类型节点有3个子节点, 使用顺时针部署方式. 经过实验验证, 发现这一组网策略能显著提高非根节点的部署效率, 组网完成速度仅为原先速度的十分之一.

借助节点位置类型的定义, 部署节点能够确定自身位置并根据子节点数量调整子节点位置. 例如, 在图4中虚线框内的5号节点和7号节点, 由于它们为奇数位置类型, 因此只有1个子节点, 且子节点位置类型与部署节点相同. 偶数位置类型节点有3个子节点, 如图4中虚线框内的2号节点所示, 子节点位置类型根据其子节点数量来设置, 且其部署方式是亦为顺时针部署. 子节点的位置根据其相对于父节点的位置类型进行部署.

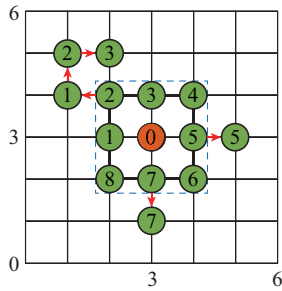


图4 非根节点部署方式

Fig. 4 Non-root node deployment mode

当游荡节点被部署并且同一层次的所有节点都已完成部署时, 该层次的节点将成为部署节点, 可以继续部署下一层次的节点. 通过设置根节点的方向和位置, 可以调整整个 p -编队的角度和位置, 从而实现系统的灵活配置和高效运行. 在实际控制领域应用中, 这种策略具有很高的实用性和可扩展性.

VFLA算法(见表1)将每个节点牵引移动至正方形晶格结构上, 确保最终构建的 p -编队满足 r -鲁棒图条件. 如图5所示, 通过位置类型, 每个节点都能了解自己子节点的具体部署位置. 值得注意的是, 随着阶层的增加, 奇数类节点占比的提高将带来整个系统的部署效率增长, 且这一增长与节点数量的增加呈正相关关系.

表1 VFLA算法

Table 1 Virtual force lattice algorithm

输入: ζ_i (节点初始位置), MaxLoop(系统迭代次数上限).
 输出: ζ_i (最终结果)
for loop < MaxLoop.
 for $\zeta_i \in \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$
 if ζ_i is a Loiter 判断是否是游荡节点
 更新游荡节点位置
 else
 for $\zeta_j \in \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$
 if ζ_i 位置类型是偶数
 ζ_j 的位置类型等于 ζ_i 的位置类型加上其子节点数量减一
 else ζ_i 位置类型是奇数
 ζ_j 的位置类型等于 ζ_i 的
 end if
 end for
 end if
 end for
end for
 结果: ζ_i (移动后节点的位置)

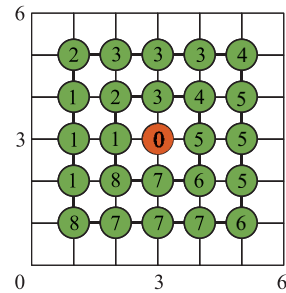


图5 使用VFLA算法后得到的25个节点2-编队

Fig. 5 25 nodes 2-formation after using VFLA algorithm

3.2 p -编队拓展策略

在本小节中, 在VFLA算法基础上, 提出了一种编队拓展算法, 称其为骨干算法(main lattice algorithm, MLA). MLA算法能够将一个 $p > 0$ 的 p -编队拓展到指定区域, 并确保拓展后的编队的通信拓扑依旧是 $(2f+1)$ -鲁棒图. 算法的具体步骤如下:

步骤1 在使用VFLA算法得到指定编队后, 从该编队的中心节点周围8个节点中选择距离目标位置最近的节点作为下一个中心节点;

步骤2 以新选出的中心节点作为根节点重新执行VFLA算法;

步骤3 重复以上步骤, 直至中心节点到达目标位置.

根据上述描述, 可以得出MLA算法的伪代码, 如表2所示.

图6展示了一个示例,将原有的2-编队集群(图6(a)),使用MLA算法进行一次拓展,拓展后的集群如图6(b)所示,其中虚线连接的节点,即拓展后所添加的新无人机节点.

表2 MLA算法

Table 2 Main lattice algorithm

输入: ζ_T (目标), ζ_C (中心), \mathcal{N}_{ζ_C} (8个邻居), ζ_N , $D_T=0$ (距离), D_M (最小距离), MaxLoop (系统迭代上限).
输出: ζ_i (最终结果)
for $D_T < D_M$
 for $\zeta_N \in \mathcal{N}_{\zeta_C}$
 if $d(\zeta_N, \zeta_T) < D_M$
 $D_T = D_M$
 $D_M = d(\zeta_N, \zeta_T)$
 $\zeta_C = \zeta_N$
 end if
 end for
end for
结果: ζ_i (移动后节点的位置)

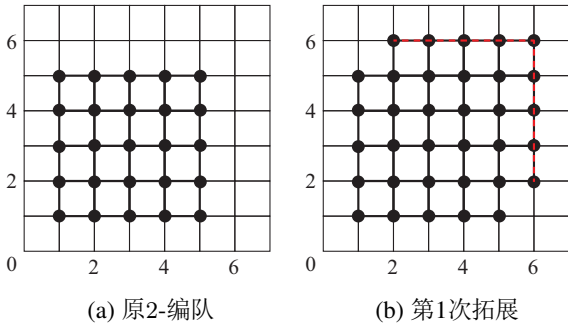


图6 编队拓展示意图

Fig. 6 Formation expansion diagram

4 主要结论

令 $p_{\min}(n_d)$ 表示对于一个存在 n_d 个节点的 p -编队, 其阶数 p 与节点总数量 n_d 存在以下关系:

$$p_{\min}(n_d) = \min \{ p \in \mathbb{Z}_{>0} : n_{\beta}(p) - n_d \geq 0 \}. \quad (11)$$

对于一 p -编队, 若要编队中所有节点处于一半径为 $\rho_{\beta}(p)$ 圆形区域内, 则该圆的半径 $\rho_{\beta}(p)$ 需满足下式:

$$\rho_{\beta}(p) = \sqrt{2}pl. \quad (12)$$

定理 1 对于一个存在 N 个节点的系统模型 \mathcal{M} , 若所构造晶格结构的长度为 l , 则在系统运行 VFLA 算法后, 系统能得到一个 p -编队, 其中 $p = \max_{p \in \mathbb{Z}_{>0}} 4p^2 + 4p + 1 \leq N$.

证 为了证明游荡节点能进入部署节点的通信范围内, 首先证明所有节点都有向根节点收敛的趋势.

对于非根节点 i , 通过根节点位置 ζ_{root} 和自身位置信息 ζ_i , 可求得 $\mathbf{F}_{i\text{root}}$, $\mathbf{F}_{i\text{root}}$ 为根节点施加于节点 i 的

力. 通过邻居节点位置 ζ_j , 求得 \mathbf{F}_{ij} , \mathbf{F}_{ij} 为节点 j 施加于节点 i 的力. 再根据之前构建的势场函数, 节点 i 与节点 j 之间势场函数用 U_{ij} 表示, 根节点与节点 i 之间势场函数用 $U_{i\text{root}}$ 表示, 因此非根节点 i 受到的合力为

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{i\text{root}} + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{F}_{ij} = -\nabla U_{i\text{root}} + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} -\nabla U_{ij}. \quad (13)$$

设 Q 为能量函数, 可以设计以下的李雅普诺夫式:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (14)$$

其中:

$$Q_1 = \frac{1}{2} \dot{\zeta}_{\text{root}}^T \dot{\zeta}_{\text{root}} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N U_{i\text{root}}, \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \dot{\zeta}_i^T \dot{\zeta}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} U_{ij}. \quad (16)$$

因为在根节点对节点 i 的方向上, $U_{i\text{root}} = U_{\text{root}i}$, $\dot{\zeta}_{\text{root}} = 0$, 对 $U_{i\text{root}}$ 进行时间求导可以得到

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} U_{i\text{root}} &= \frac{\partial U_{i\text{root}}}{\partial \zeta_i} \cdot \frac{d\zeta_i}{dt} + \frac{\partial U_{i\text{root}}}{\partial \zeta_{\text{root}}} \cdot \frac{d\zeta_{\text{root}}}{dt} = \\ &\nabla U_{i\text{root}} \cdot \dot{\zeta}_i - \nabla U_{i\text{root}} \cdot \dot{\zeta}_{\text{root}} = \\ &\nabla U_{ij} \cdot (\dot{\zeta}_i - \dot{\zeta}_{\text{root}}) = \\ &\nabla U_{i\text{root}} \cdot \dot{\zeta}_i. \end{aligned} \quad (17)$$

又因为在节点 i 对节点 j 的方向上, $U_{ij} = U_{ji}$, $\dot{\zeta}_i = -\dot{\zeta}_j$, 对 U_{ij} 进行时间求导可以得到

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} U_{ij} &= \frac{\partial U_{ij}}{\partial \zeta_i} \cdot \frac{d\zeta_i}{dt} + \frac{\partial U_{ij}}{\partial \zeta_j} \cdot \frac{d\zeta_j}{dt} = \\ &\nabla U_{ij} \cdot \dot{\zeta}_i - \nabla U_{ij} \cdot \dot{\zeta}_j = \\ &2\nabla U_{ij} \cdot \dot{\zeta}_i. \end{aligned} \quad (18)$$

因此可以得到以下式子:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2, \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= \frac{1}{2} (\dot{\zeta}_{\text{root}}^T \ddot{\zeta}_{\text{root}} + \ddot{\zeta}_{\text{root}}^T \dot{\zeta}_{\text{root}}) + \sum_{i=1}^N \nabla U_{\text{root}} \dot{\zeta}_{\text{root}}^T = \\ &\dot{\zeta}_{\text{root}}^T (\ddot{\zeta}_{\text{root}} + \sum_{i=1}^N \nabla U_{ij}) = \\ &\dot{\zeta}_{\text{root}}^T (\sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{i\text{root}} - k_d \dot{\zeta}_{\text{root}} + \sum_{i=1}^N \nabla U_{i\text{root}}) = \\ &\dot{\zeta}_{\text{root}}^T (\sum_{i=1}^N -\nabla U_{i\text{root}} - k_d \dot{\zeta}_{\text{root}} + \sum_{i=1}^N \nabla U_{i\text{root}}) = \\ &-k_d \dot{\zeta}_{\text{root}}^T \dot{\zeta}_{\text{root}} = 0, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_2 &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\dot{\zeta}_i^T \ddot{\zeta}_i + \ddot{\zeta}_i^T \dot{\zeta}_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla U_{ij} \dot{\zeta}_i^T = \\ &\sum_{i=1}^N \dot{\zeta}_i^T (\ddot{\zeta}_i + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla U_{ij}) = \\ &\sum_{i=1}^N \dot{\zeta}_i^T (\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{F}_{ij} - k_d \dot{\zeta}_i + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla U_{ij}) = \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^N \dot{\zeta}_i^T \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} -\nabla U_{ij} - k_d \dot{\zeta}_i + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla U_{ij} \right) = -k_d \sum_{i=1}^N \dot{\zeta}_i^T \dot{\zeta}_i, \quad (21)$$

所以有

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = -k_d \sum_{i=1}^N \dot{\zeta}_i^T \dot{\zeta}_i, \quad (22)$$

对于正阻尼系数 k_d , \dot{Q} 为半负定. 因 Q 满足以下3个条件: 当且仅当 $\zeta = 0$ 时, $Q = 0$; 当且仅当 $\zeta \neq 0$ 时, $Q > 0$; 当 $\zeta \neq 0$ 时, $\dot{Q} \leq 0$.

根据李雅普诺夫稳定性理论得出, 该系统在李雅普诺夫意义下具有稳定性. 进一步, 当 $\dot{\zeta}_i = 0$ 时, 满足 $\dot{Q} < 0$ 条件, 可得出该系统呈现渐近稳定性. 因此, 任何节点最终都将收敛至稳定点.

将稳定点设定为根节点, 所有节点将朝着根节点方向移动, 如图7所示, 直至部署完成. 在节点朝根节点方向移动的过程中, 若遇到已部署节点, 则该节点将根据算法顺时针环绕整个 p -编队, 直至所有节点部署完毕. 证毕.

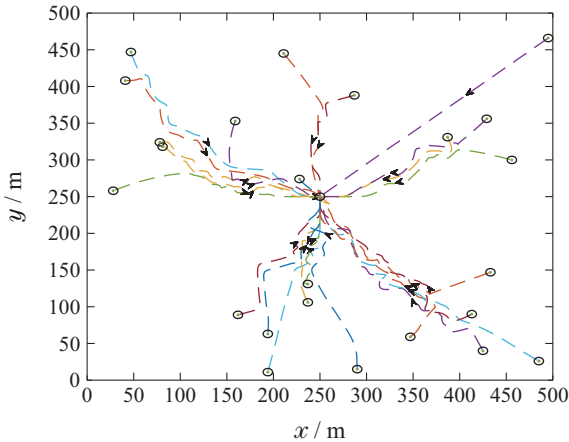


图7 李雅普诺夫收敛示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Lyapunov convergence

通过定理1可知, 无人机节点可通过VFLA算法构建实现 p -编队. 接下来, 给出定理2, 证明采用VFLA算法生成的 p -编队的集群网络满足 $(2f+1)$ -鲁棒图性质, 即具备特定的容忍网络入侵的能力.

定理2 VFLA构建的 p -编队, 其中

$$p = p_{\min}(4f + 1),$$

令通信半径 $R_c \geq \rho_{\beta}(p_{\min}(4f+1) + p_{\min}(2f+1))$, 则此时能找到一个现有的安全一致性算法, 使得集群在至多存在 f 个恶意节点的情况下, 执行该安全一致性算法, 仍旧可以令所有正常节点某一状态值达成一致.

证 根据引理2可知, 若存在一个 p -编队, 编队中每个节点的通信半径如果满足 $R_c \geq \rho_{\beta}(p_{\min}(4f +$

$1) + p_{\min}(2f + 1))$, 则该 p -编队系统的通信拓扑为 $(2f+1)$ -鲁棒图.

文献[30]中, 作者提出一种称为W-MSR的安全一致性算法, 并表明, 若集群的通信拓扑为一个 $(2f+1)$ -鲁棒图, 那么系统可以在至多存在 f 个恶意节点的情况下, 通过执行W-MSR算法实现状态值趋同. 证毕.

经定理1与定理2的证明, 已可得知若集群中节点的通信半径满足一定要求, 则使用VFLA算法构造所得的 p -编队通信拓扑满足 $(2f+1)$ -鲁棒图条件.

定理3 对于一个通信拓扑满足 $(2f+1)$ -鲁棒性的 p -编队, 若所有节点的通信半径 R_c 满足 $R_c = \rho_{\beta}(p_{\min}(4f+1) + p_{\min}(2f+1))$, 那么在系统运行MLA算法后, p -编队能向编队外的一个目标区域拓展, 且拓展后编队的通信拓扑依旧满足原编队的 $(2f+1)$ -鲁棒图条件.

证 根据定理1, 只要系统内存在游荡节点, 节点会持续部署, 直至满足预定的阶数. MLA算法的核心在于选择下一个中心节点, 具体选取方式为

$$\zeta_{\text{nextCenter}} = \min_{i \in \mathcal{N}_{\text{center}}} d(\zeta_i, \zeta_{\text{target}}), \quad (23)$$

其中: $\zeta_{\text{nextCenter}}$ 为下一个中心节点的位置, ζ_i 表示当前中心节点的邻居的位置, ζ_{target} 表示目标区域的位置. 算法一旦选定下一中心节点, 则开始使用VFLA算法完成此阶的编队构造. 完成后再选取下一个中心节点, 不断重复, 则会有

$$\lim_{k \rightarrow \infty} d(\zeta_{\text{center}}[k], \zeta_{\text{target}}) = l', \quad l' \leq l, \quad (24)$$

其中: $\zeta_{\text{center}}[k]$ 表示第 k 次迭代后中心节点的位置, l' 表示拓展完成后 p -编队中心与目标位置 ζ_{target} 的距离. 可以推出, 编队中心与目标区域的距离最终收敛到一个定值, 即 p -编队能收敛到指定区域.

假设 \mathcal{C}_1 为通信拓扑满足 $(2f+1)$ -鲁棒性的 p -编队中节点的集合, \mathcal{F}_1 为编队覆盖区域的轨迹, 其中 $p = p_{\min}(4f+1)$. 设集合 \mathcal{C}_2 为集合 \mathcal{C}_1 的子集, 亦可推出 \mathcal{C}_2 的轨迹 \mathcal{F}_2 为轨迹 \mathcal{F}_1 的子集. 要求集合 \mathcal{C}_2 可以构成一个满足 $p = p_{\min}(2f+1)$ 的 p -编队, 且符合 $p_{\min}(4f+1) > p_{\min}(2f+1)$ 的条件. 再假设 p -编队内的每个节点的通信半径满足

$$R_c = \rho_{\beta}(p_{\min}(4f+1) + p_{\min}(2f+1)). \quad (25)$$

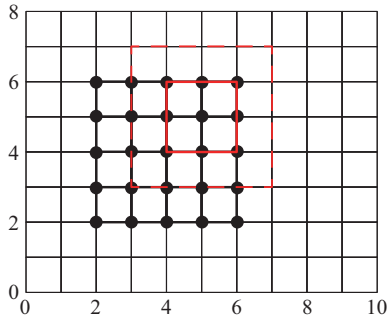
从上述假设可得, $|\mathcal{C}_2| \geq 2f+1$, 且 \mathcal{C}_2 内的所有节点都落在以 ζ_c 为圆心, $\rho_{\beta}(p_{\min}(2f+1))$ 为半径的圆形区域内. 亦可推出

$$R_c = \rho_{\beta}(p_{\min}(4f+1) + p_{\min}(2f+1)) > 2\rho_{\beta}(p_{\min}(2f+1)). \quad (26)$$

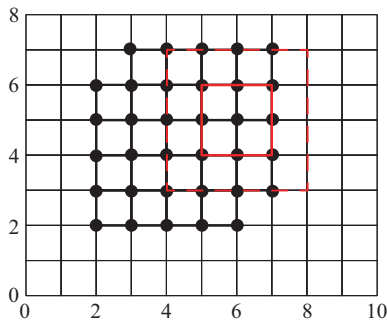
根据引理1有: 任何围绕以 ζ_c 为圆心, $\rho_{\beta}(p_{\min}(4f+1) + p_{\min}(2f+1)) - \rho_{\beta}(p_{\min}(2f+1)) = \rho_{\beta}(p_{\min}(4f +$

1))为半径的区域部署节点,部署完成后编队的通信拓扑依旧满足原编队的 $(2f+1)$ -鲁棒图性质. 证毕.

图8展示了使用编队拓展算法下的一个示例. 图中实线框表示 $p=p_{\min}(2f+1)$ 的 p -编队,虚线框表示 $p=p_{\min}(4f+1)$ 的 p -编队. 只要确保实线框落在编队内,将虚线范围内的空余位置填满,如定理3所述,拓展后编队的通信拓扑依旧符合 $(2f+1)$ -鲁棒图条件,即原编队在添加新节点后并不会影响其网络容侵能力.



(a) 第1次拓展



(b) 第2次拓展

图8 定理3拓展方式

Fig. 8 Theorem 3 extension method

5 仿真实验

本节通过2组多无人机编队数值仿真实验来验证所提方案的有效性. 2组实验均采用GoLand环境进行算法模拟,并将得到的模拟结果用MATLAB软件绘制成图的形式呈现. 本节实验所有节点都位于区域 $\{(x, y) \mid 0 < x < 500 \text{ m}, 0 < y < 500 \text{ m}\}$ 内. 且算法中参数的设置如表3所示.

表3 参数设置

Table 3 Parameter setting

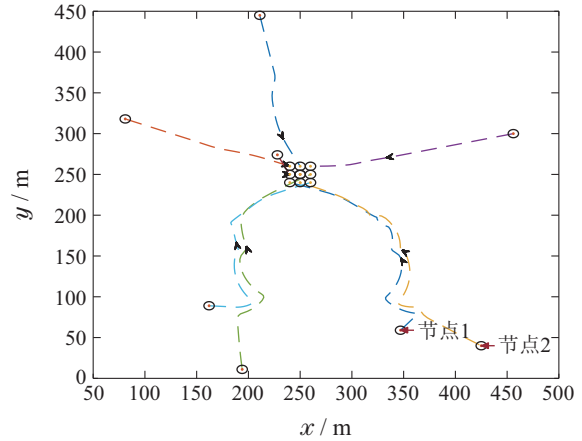
参数	R_C	d	l	δ	W_A	W_B
数值	$90\sqrt{2}$	10	10	125	10	0.25

5.1 实验仿真

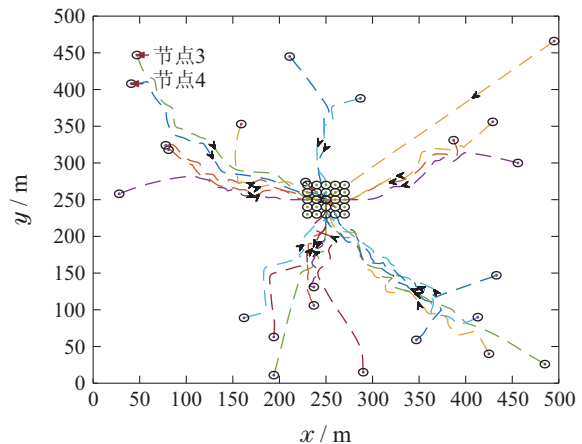
为了评估所提VFLA算法的有效性,分别考虑了由9个和25个节点组成的2个集群系统. 首先,随机地

将这些节点部署到平面区域内,然后让节点运行VFLA算法,并观察这些节点的轨迹变化.

图9显示了采用VFLA算法的节点在拟合过程中的运动轨迹. 具体地,图9(a)展示了9个节点从初始位置在VFLA算法作用下形成1-编队的过程;图9(b)展示了后续16个节点在VFLA算法下形成2-编队的过程.



(a) 1-编队运动轨迹



(b) 2-编队运动轨迹

图9 编队使用VFLA算法后的运动轨迹

Fig. 9 The motion trajectory of the cluster using the VFLA algorithm

实验结果表明,在使用所提的VFLA算法后,随机分布的节点可以按照预定的策略收敛到指定的 p -编队. 此外,在 p -编队构建过程中,节点能够有效地避免发生碰撞,这一点可以从图9中的运动轨迹得到验证,因为轨迹在同一时刻并不存在交集,即节点间成功避免了碰撞.

进一步,为了验证所提出的VFLA在存有大量节点的平面区域上的运行性能,在相同的仿真环境中,对121个节点组成的集群系统进行了实验. 首先,将121个节点随机分布在平面区域内,如图10(a)所示,再让节点运行本文提出的VFLA算法后,得到图10(a)-(d)中展示的实验结果.

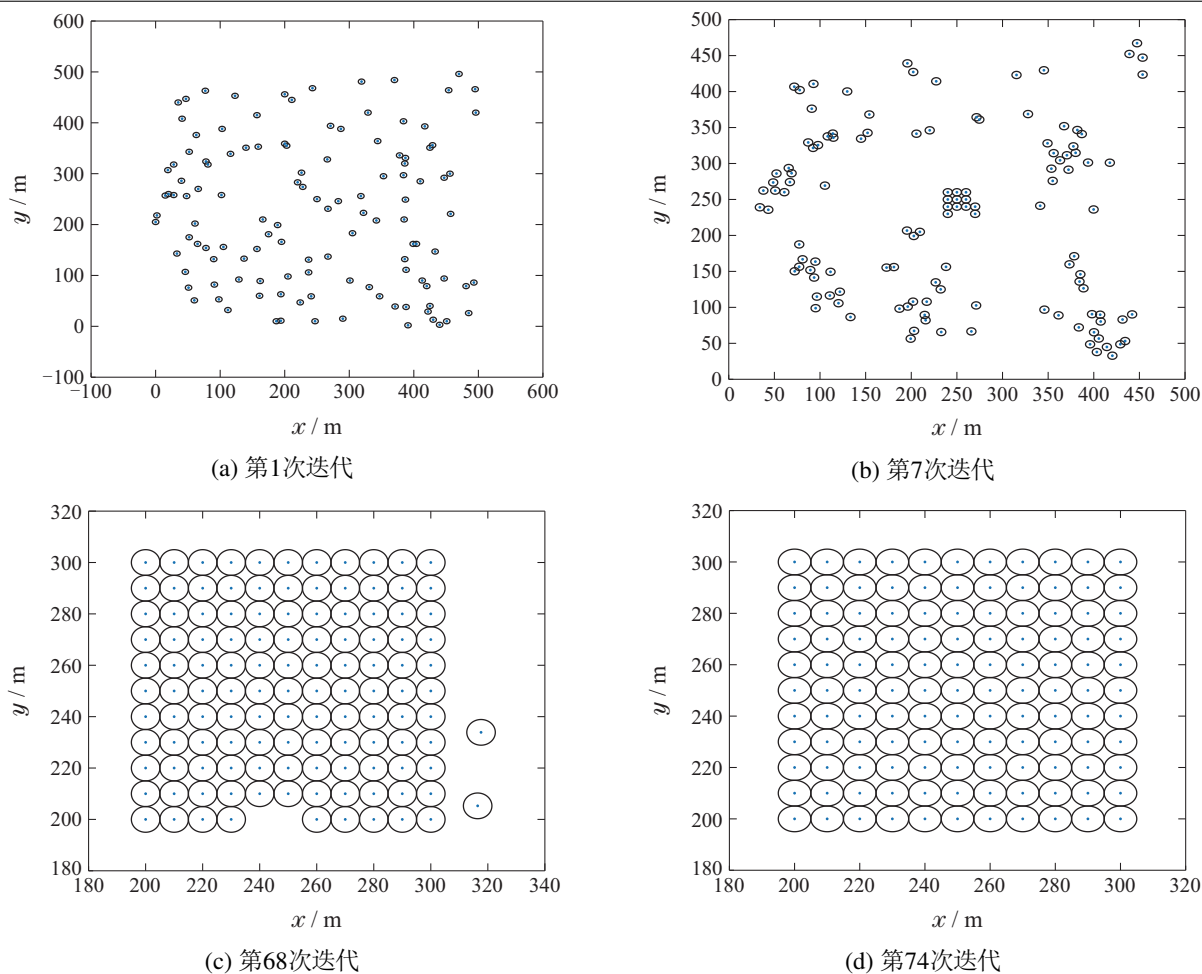


图 10 使用VFLA算法后编队的位置变化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the position change of the formation after using the VFLA algorithm

可以看出,在VFLA算法的作用下,平面区域内随机分布的节点能够主动形成一个5-编队。值得注意的是,从图10(c)到图10(d)可以观察到,在节点部署过程中,VFLA算法遵循实际应用场景并不会让节点直接穿越其他节点。相反,算法会促使节点绕过已形成的编队,顺时针寻找合适的空余位置去部署节点。

同时,为验证本文所构造的编队网络是否具有网络容侵能力,将部分节点设置成恶意节点,然后采用本文所提算法构造 p -编队,随后集群运行安全一致性算法,最后观察各个节点的状态值收敛情况。

首先,给出如图10(a)所示编队的收敛结果,如图11所展示,在未考虑鲁棒策略的随机分布编队系统中,如果此时考虑不存在恶意节点,系统则需要经过约50次更新迭代达到收敛状态,收敛时间较长。

接着,在随机分布编队中任意选取20个节点作为恶意节点,观察图12数据可以发现,在编队系统中存在20个恶意节点时,系统将无法实现收敛,恶意节点对整个系统状态值的趋同过程产生了严重影响。

随后,采用本文提出的VFLA算法构建5-编队。图10(d)展示了一个包含20个恶意节点的5-编队,根据

图13的观察结果,应用本文提出的VFLA算法构建鲁棒编队进行状态值一致性控制时,整个编队系统不仅能有效抵抗恶意节点的干扰,而且相较于随机分布编队,其一致性收敛速度也有显著提升。

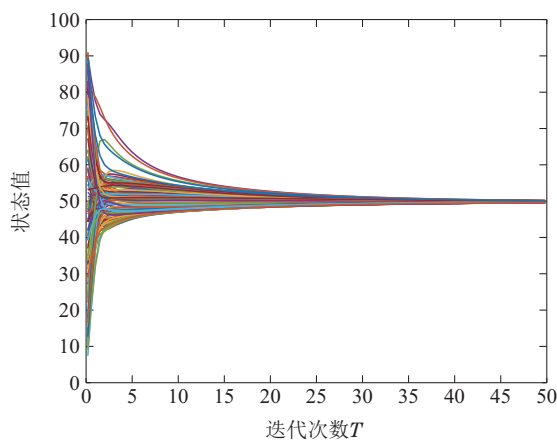


图 11 随机分布无恶意节点收敛情况

Fig. 11 Random distribution without malicious node convergence

最后,对MLA算法进行仿真实验。在一个原有的2-编队上运行MLA算法后,可以得到图14所示拓展步

骤变化图. 其中星号表示欲要拓展到的指定区域. 如图14所示, 2-编队在经过5次拓展后, 达到欲拓展的指

定区域, 且此算法保证拓展后得到的编队通信拓扑依旧是 $(2f+1)$ -鲁棒图.

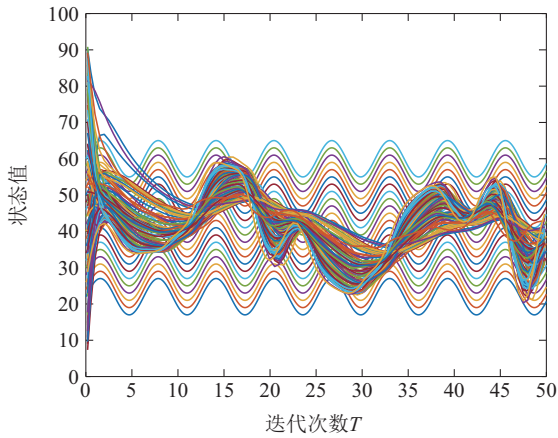


图 12 随机分布存在恶意节点收敛情况

Fig. 12 Random distribution with malicious node convergence

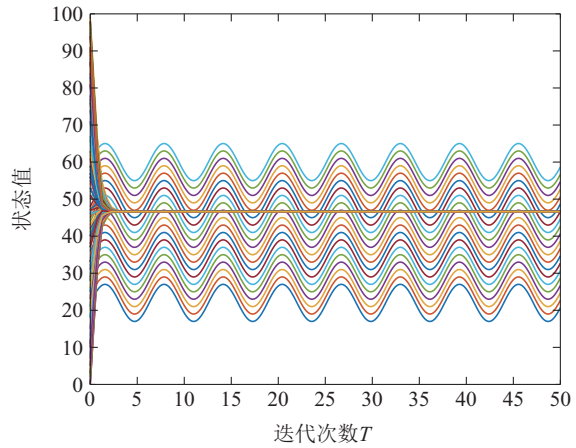
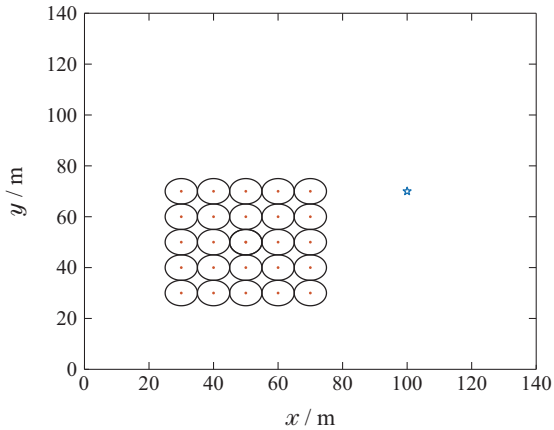
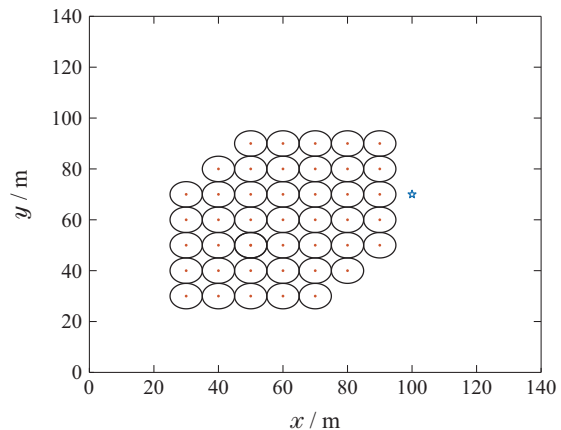


图 13 5-编队的趋同结果

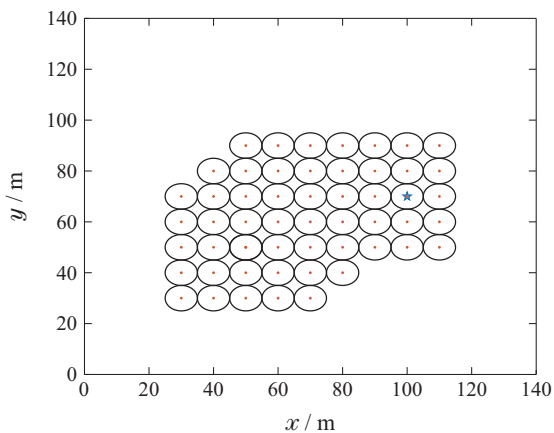
Fig. 13 Convergence results for 5-formations



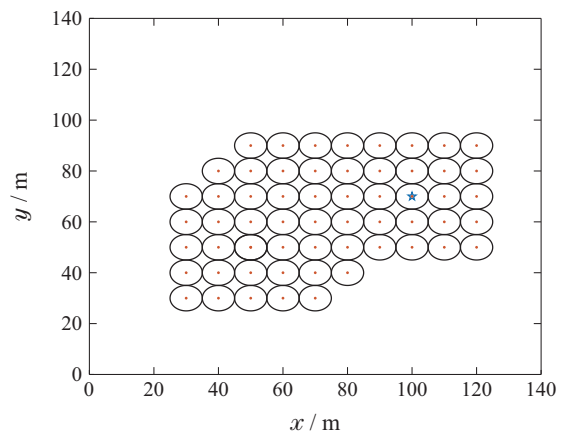
(a) 第1次拓展



(b) 第3次拓展



(c) 第4次拓展



(d) 第5次拓展

图 14 使用MLA算法后编队拓展示意图

Fig. 14 Schematic diagram of formation expansion of MLA algorithm

为不失一般性, 针对 MLA 算法以及定理 3 所述的内容, 在2-编队上进行拓展实验, 经过数次拓展, 且每次拓展的起始位置和终点都不一样, 可以得到一个如图15所示的编队. 拓展后的编队具有229个节点, 其中

随机选取6个节点, 将其设置为恶意节点. 对拓展后编队节点运行状态趋同算法, 所有节点的状态值变化曲线如图16所示. 从图可以看出整个编队系统在存在6个恶意节点的情况下依旧能达到快速一致性收敛

的目的, 说明系统运行MLA算法后拓展所得到的新编队具备原先集群的网络容侵能力.

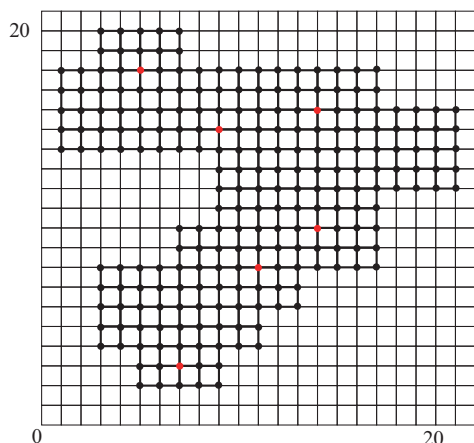


图 15 2-编队多次拓展结果示意图

Fig. 15 Schematic diagram expansion for multiple times

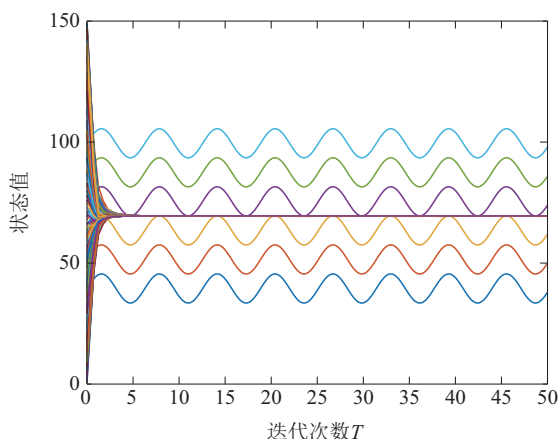


图 16 拓展编队状态值收敛结果示意图

Fig. 16 Diagram of convergence for expanded formation

5.2 算法分析

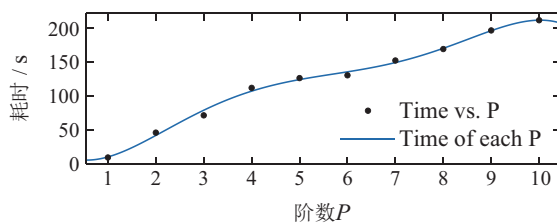
本小节主要对本文所提的VFLA算法进行性能分析. 首先针对VFLA每一阶的部署时长进行分析. 在本实验中, 将同一阶层的第1个节点被部署到最后一个节点部署完毕的时间, 当作此阶层部署所需要的时长.

将部署时长除此阶层节点数量, 当作此阶层节点平均部署时长. 如图17所示, 分别展示每一阶层的部署时长与每阶层每个节点平均部署时长的拟合结果.

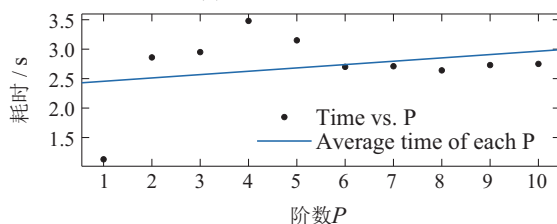
如图17(a)所示, 曲线在后面增长的速度逐渐放缓, 可以看出随着要部署的节点数量逐渐增加, 阶数 p 的增大, 整个系统的部署时间的增加趋势逐渐放缓. 从图17(b)可以看出, 随着阶层 p 的增加, 阶层中的节点的平均部署时间先是增加, 然后在减少, 最后在一个时长上小范围上下波动.

接下来论述本文所提的算法是否具有实现碰撞避免的能力. 下面对图9中两个相邻节点之间的距离做出以下研究. 首先对图9(a)中右下方节点1与节点2距离进行统计, 得到如图18(a)所示的结果. 然后对图

9(b)中左上角节点3与节点4的距离进行统计, 得到如图18(b)所示的结果. 由此可以得出, VFLA算法借助势场法来实现碰撞避免在实验上是成功的.



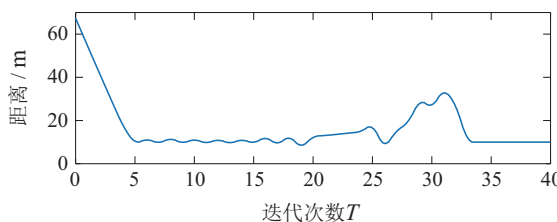
(a) 每阶部署总时长



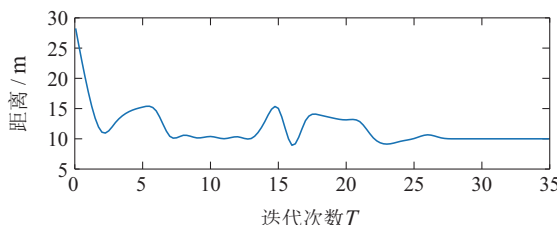
(b) 不同阶节点平均部署时长

图 17 节点部署时间成本示意图

Fig. 17 Node deployment time cost diagram



(a) 节点1与节点2距离变化示意图



(b) 节点3与节点4距离变化示意图

图 18 两节点之间的距离变化示意图

Fig. 18 Schematic diagram of distance change between two nodes

6 总结

本文考虑实际环境中, 多无人机集群可能面临的欺骗攻击、拜占庭攻击等网络攻击情形, 提出了一种分布式无人机集群协同编队组网控制策略, 该策略能够将初始阶段随机部署的无人机节点牵引构造成一个通信拓扑, 满足所谓的 r -鲁棒图的队形网络, 从而赋予集群具备容忍网络入侵的能力. 进一步, 提出了一种集群网络拓展编队策略, 所提策略能够使得以 p -编队网络向指定区域进行拓展延伸, 并维持整体集群网络原先的容侵能力不变. 仿真实验结果验证了本文所提方法的有效性.

参考文献:

- [1] HAYAT S, YANMAZ E, MUZAFFAR R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2624 – 2661.
- [2] YAO H, QIN R, CHEN X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications-A review. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1443.
- [3] REYES L A, TANNER H G. Flocking, formation control, and path following for a group of mobile robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 23(4): 1268 – 1282.
- [4] LUO Jiexiang, GUAN Zhenfeng, LIU Haiming, et al. Robot formation algorithm with limited communication. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(7): 1091 – 1101.
(罗家祥, 关振峰, 刘海明, 等. 通讯受限条件下的机器人编队算法. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 1091 – 1101.)
- [5] LI J, ZHANG B, CUI L, et al. An extended virtual force-based approach to distributed self-deployment in mobile sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 8(3): 1 – 14.
- [6] LI Zhengping, XIAN Bin. Robust distributed formation control of multiple unmanned aerial vehicles based on virtual structure. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(11): 2423 – 2431.
(李正平, 鲜斌. 基于虚拟结构法的分布式无人机鲁棒编队控制. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2423 – 2431.)
- [7] SANTILLI M, FRANCESCHELLI M, GASPARRI A. Dynamic resilient containment control in multirobot systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 38(1): 57 – 70.
- [8] ZHANG H, SUNDARAM S. Robustness of information diffusion algorithms to locally bounded adversaries. *American Control Conference*. Montreal: IEEE, 2012, 10: 1147 – 1158.
- [9] PARK H, HUTCHINSON S. A distributed robust convergence algorithm for multi-robot systems in the presence of faulty robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems*. Germany: IEEE, 2015, 10: 2980 – 2985.
- [10] YU X, SHISHIKA D, SALDANA D, et al. Modular robot formation and routing for resilient consensus. *American Control Conference*. Denver: IEEE, 2020, 1: 2464 – 2471.
- [11] SAULNIER K, SALDANA D, PROROK A, et al. Resilient flocking for mobile robot teams. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 1039 – 1046.
- [12] OLFATI R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 215 – 233.
- [13] WEI R, BEARD R, ATKINS E. A survey of consensus problems in multi-agent coordination. *American Control Conference*. Portland: IEEE, 2005, 10: 1859 – 1864.
- [14] YU X, SALDANA D, SHISHIKA D, et al. Resilient consensus in robot swarms with periodic motion and intermittent communication. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 1(38): 110 – 125.
- [15] WEI C, LI C, TANNER H G. Synchronous rendezvous for periodically orbiting vehicles with very-low-range interactions. *American Control Conference*. Milwaukee: IEEE, 2018: 1641 – 1646.
- [16] ZHOU N, CASSANDRAS C G, YU X, et al. The price of decentralization: Event-driven optimization for multiagent persistent monitoring tasks. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2020, 8(2): 976 – 986.
- [17] USEVITCH J, PANAGOUD D. R-robustness and (r, s)-robustness of circulant graphs. *The 56th Annual Conference on Decision and Control*. Melbourne: IEEE, 2017, 2: 4416 – 4421.
- [18] GUERRERO-BONILLA L, SALDANA D, KUMAR V. Design guarantees for resilient robot formations on lattices. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 4(1): 89 – 96.
- [19] YU X, HSIEH M. Synthesis of a time-varying communication network by robot teams with information propagation guarantees. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 1413 – 1420.
- [20] SALDANA D, PROROK A, CAMPOS M, et al. Triangular networks for resilient formations. *Dars-international Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2018, 2(6): 147 – 159.
- [21] FIORE D, RUSSO G. Resilient consensus for multi-agent systems subject to differential privacy requirements. *Automatica*, 2019, 1(106): 18 – 26.
- [22] YASSAIE N, HALLAJIYAN M, SHARIFI I, et al. Resilient control of multi-microgrids against false data injection attack. *ISA Transactions*, 2021, 1(110): 238 – 246.
- [23] REN W, BEARD R W, ATKINS E M. A survey of consensus problems in multi-agent coordination. *American Control Conference*. Portland: IEEE, 2005: 1859 – 1864.
- [24] LIU X, ZHANG D. Robust consensus control for nonlinear multi-agent systems. *The 36th Chinese Control Conference*. Montreal: IEEE, 2017, 14: 8131 – 8136.
- [25] GUERRERO-BONILLA L, PROROK A, KUMAR V. Formations for resilient robot teams. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 841 – 848.
- [26] GUERRERO-BONILLA L, SALDANA D, KUMAR V. Dense r-robust formations on lattices. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York, USA: IEEE, 2020, 3: 6633 – 6639.
- [27] ZHANG H, FATA E, SUNDARAM S. A notion of robustness in complex networks. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2015, 2(3): 2490 – 2502.
- [28] WANG Gangyang, XU Ming, WU Yiming, et al. Group agent formation for resilient average consensus under attacks. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(7): 1071 – 1081.
(王刚阳, 徐明, 伍益明, 等. 面向网络攻击下弹性均值趋同的多智能体群组编队. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 1071 – 1081.)
- [29] LEBLANC H, ZHANG H, KOUNTSOUKOS X, et al. Resilient asymptotic consensus in robust networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(4): 766 – 781.
- [30] ZHANG H, SUNDARAM S. A simple median-based resilient consensus algorithm. *Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*. Monticello, IL, USA: IEEE, 2012, 10: 1734 – 1741.
- [31] ZOU Y, CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces. *Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2003, 3: 1293 – 1303.

作者简介:

章招铭 硕士研究生, 目前研究方向为无人集群系统编队控制,

E-mail: zzm@hdu.edu.cn;

伍益明 副教授, 目前研究方向为无人集群系统网络安全、分布式系统数据隐私保护, E-mail: ymwu@hdu.edu.cn;

郑宁 研究员, 目前研究方向为网络与信息管理系统安全, E-mail: nzheng@hdu.edu.cn;

朱晨睿 博士研究生, 目前研究方向为多智能体系统调度与协同, E-mail: zzzcr2022@gmail.com;

孟伟 教授, 目前研究方向为无人自主系统、协同控制, E-mail: meng0025@gdut.edu.cn.