

干扰环境下基于博弈论的无人机群部署与组网方法

韩晨^① 刘爱军*^② 安康^① 童新海^② 梁小虎^{②③}

^①(国防科技大学第六十三研究所 南京 210007)

^②(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)

^③(东南大学信息科学与工程学院 南京 210018)

摘要: 该文研究了干扰环境下基于博弈论的无人机(UAV)群部署与组网方法。首先,基于拥塞博弈,提出一种分布式无人机群部署算法(CUD)。每架无人机可以通过与邻近无人机的有限交互,实现自主的位置优化,以提高数据采集量,并增强干扰躲避能力。其次,基于联盟形成博弈,提出一种无人机群动态组网算法(USACF),可使无人机群在干扰威胁下实现分布式动态子网形成,提高数据传输质量,并增强无人机网络的鲁棒性和可靠性。此外,借助精确势能博弈,从理论上证明了所提博弈模型可以获得稳定的纳什均衡解。最后,仿真结果表明,所提算法相较于传统算法有明显的性能提升。

关键词: 无人机群; 抗干扰; 博弈理论

中图分类号: TN915.08

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)03-0860-11

DOI: 10.11999/JEIT210992

Deployment and Networking Methods of UAV Swarm in Jamming Environments Based on Game Theory

HAN Chen^① LIU Aijun^② AN Kang^① TONG Xinhai^② LIANG Xiaohu^{②③}

^①(The 63th Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

^②(College of Communications Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China)

^③(The School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: A deployment and networking methods of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm based on game theory in the jamming environments is investigated in this paper. Firstly, a Congestion-game based UAV swarm Deployment algorithm (CUD) is proposed. Each UAV can autonomously optimize its position through limited interaction with adjacent UAVs to increase the amount of collected data and enhance the anti-jamming capabilities. Secondly, a UAV Swarm Anti-jamming Coalition Formation algorithm (USACF) is proposed, which enables the UAV swarm to form dynamic sub-networks in a distributed way under the threat of hostile jamming, thus improving the transmission performance and enhancing the robustness and reliability of the UAV networks. Furthermore, it is proved theoretically that the proposed game model can achieve a stable Nash equilibrium with the aid of exact potential game theory. Finally, simulation results verify that the proposed algorithms have obvious performance improvement compared with the conventional algorithms.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm; Anti-jamming; Game theory

收稿日期: 2021-09-16; 改回日期: 2022-02-16; 网络出版: 2022-02-28

*通信作者: 刘爱军 liuaj.cn@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801103), 国家自然科学基金(61901502), 江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20192002), 人力资源与社会保障部博士后创新人才支持计划(BX20200101)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2018YFB1801103), The National Natural Science Foundation of China (61901502), The Natural Science Foundation on Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu Province (BK20192002), The National Postdoctoral Program for Innovative Talents (BX20200101)

1 引言

空天地互联网络是6G通信的重要研究内容,其中,无人机群是空中接入网络的重要组成部分^[1]。由于部署灵活、成本低廉等优势,无人机群在紧急救援、环境监测、数据采集、D2D(Device-to-Device)通信等多方面发挥着重要作用,其应用研究引起了学者广泛的关注^[2-6]。但是,无人机通信的视距传输特点和无线广播特性使其容易受到干扰攻击^[7,8]。文献^[9]针对频率域的恶意干扰,提出一种基于差分博弈的无人机抗干扰算法。文献^[10,11]应用强化学习和博弈理论研究了无人机通信网络的抗干扰问题,通过优化发射功率提高抗干扰性能。文献^[12]应用斯坦伯格博弈和多臂赌博机模型提出一种针对无人机通信网络的联合抗干扰算法,实现功率和频率的联合优化。文献^[13]研究了无人机在干扰场景下的中继问题,通过抗干扰博弈分析,得到其稳定的纳什均衡策略。文献^[14]研究了面向无人机辅助的蜂窝通信网络的抗干扰框架,应用强化学习为受扰的移动用户选择中继节点。文献^[15]研究了干扰环境中的无人机轨迹规划问题,以增强无人机传感器网络的传输可靠性。文献^[16]研究了无人机与干扰机之间的对抗博弈,通过合理的对抗策略增强无人机飞行控制的可靠性。干扰环境下无人机网络的高动态、强对抗等特点加剧了无人机群抗干扰的技术难度。因而,在干扰威胁下执行数据采集任务的无人机群需要具备灵活自主的部署方法和组网策略,以提高数据采集量,并增强抗干扰能力。

现有文献中,已有许多工作对无人机的位置部署问题展开研究。通过高效的部署优化,无人机群可以对目标区域提供无线覆盖并执行数据采集任务。文献^[17]通过优化多架无人机的位置部署,提高了对物联网设备的数据采集量。文献^[18]提出一种无人机快速部署方案,应用动态规划理论提高对地覆盖性能。文献^[19]综合考虑了无人机的飞行距离和高度,提出一种启发式算法以优化无人机群的位置部署。文献^[20]考虑了地面终端的密度变化,研究了多架无人机的最优部署和运动问题。文献^[21]提出一种基于连续凸近似的算法,以优化无人机群的位置部署。文献^[22]应用Circle packing理论研究无人机基站的无线覆盖及部署问题。文献^[23]基于K均值聚类算法,研究了NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access)系统中的无人机位置部署和数据中继问题。然而上述工作主要关注集中式的优化方案,需要一定的先验信息和全局信息。同时,恶意干扰威胁以及敌对环境的高动态性要求无人机群具备灵活自主的部署方式,并加强抗干扰能力^[24]。

作为一种新型的无人智能系统,无人机通常以集群的形式执行任务,并通过合适的组网策略,提高通信效率^[5,25]。文献^[26]研究了面向无人机自组织网的编队控制策略,及其对通信组网技术的不同需求。文献^[27]针对灾害救援场景,提出一种基于5G和无人机智能组网的应急通信系统。文献^[28]研究了改进贪婪算法在无人机组网路由技术中的应用。文献^[29]应用网络动力学知识,研究了无人机组网中的同步问题。文献^[30]依照雁群行为机制研究了无人机群的仿生飞行控制方法,实现多无人机编队的保持及控制。文献^[31]应用平均场理论将无人机集群对抗问题,建模为单机与集群平均效果之间的交互过程,以建模无人机群的网络动态。现有文献中对于无人机群在干扰环境中的组网技术研究相对较少。但是恶意干扰环境下的强对抗和高动态特性对无人机组网技术提出了更高的要求。因此,研究无人机群自主智能的组网策略,对于增强无人机通信网络的鲁棒性和可靠性具有重要意义。

本文研究干扰环境下基于博弈论的无人机群部署与组网方法。在地面干扰机的影响下,针对无人机群执行对地的数据采集问题,无人机群通过优化部署策略在躲避干扰区域的基础上最大化覆盖范围,并提高数据采集量。其次,针对无人机群上传数据到升空平台编队时受空中干扰机影响的问题,采用将无人机群形成联盟分组实现协作传输的方案。同一联盟分组内的无人机将各自采集得到的数据传输给簇头无人机,簇头无人机将汇总的数据上传给邻近的升空平台。在选择簇头无人机时,本文同时考虑空中干扰机的影响以及本地的数据采集量和传输能力之间的相对关系。

2 系统模型与问题建模

本文考虑的系统模型如图1所示, M 架无人机以编队形式执行对地的数据采集及上传任务,通过协同位置部署实现数据采集,并将采集数据上传给升空平台编队。敌对环境中同时存在地面干扰机和空中干扰机。地面干扰机会影响无人机对目标区域的覆盖部署和信息采集,空中干扰机会影响无人机之间的协作组网,以及无人机群与升空平台编队之间的视距传输。因此,考虑到地面干扰机的影响,无人机群通过协同位置部署以提高数据采集量,并有效规避干扰区域。同时,为了抵御空中干扰机的影响,各无人机形成联盟分组,同一联盟内的无人机将各自采集数据传输给簇头无人机。簇头无人机将汇总数据上传给邻近的升空平台。如图1所示,无人机群的数据采集任务可分为3个阶段:数据采集阶段、组网阶段、数据上传阶段。在数据采集阶

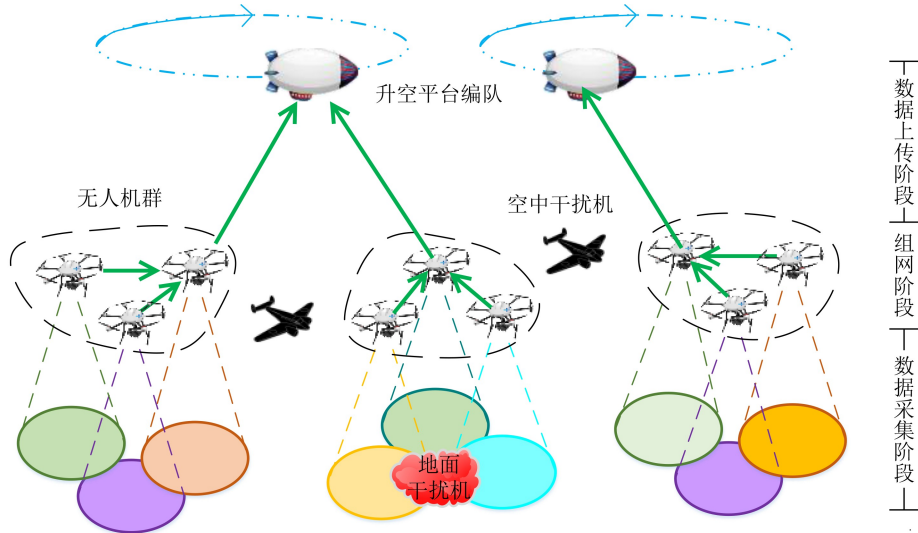


图1 干扰威胁下的无人机集群部署及组网问题

段, 无人机群通过位置部署优化, 规避干扰区域, 并提高数据采集量。在组网阶段, 无人机群形成联盟子网, 各无人机将采集数据传输给子网内的簇头无人机。最后, 在数据上传阶段, 簇头无人机将汇总数据上传给升空平台。

2.1 干扰环境下无人机群部署优化问题

将目标区域离散化为 X 个网格, 以网格中心的坐标表征该网格位置。无人机 u 的水平投影坐标为 $l_u = (x_u, y_u)$, 其数据采集半径为 F 。各个网格可采集的数据量服从泊松分布, 则第 g 个网格(坐标为 $l_g = (x_g, y_g)$)可采集的数据量为 $\Gamma(g) \sim \mathcal{P}(\lambda_g)$ ^[32],

$$\Pr \{ \Gamma(g) = k \} = \frac{(\lambda_g)^k}{(k)!} e^{-\lambda_g} \quad (1)$$

其中, λ_g 为泊松系数。各网格区域按照泊松参数随机产生数据流量, 但不同网格区域的 λ_g 各不相同。无人机 u 实际的数据采集量为

$$Q(u) = \delta_u (J_g = 1) \sum_{i=1}^{|\Theta(u)|} \frac{\Gamma(g)}{m(g)} \quad (2)$$

$$\Theta(u) = \{ l_g \mid \|l_u - l_g\| \leq F \}$$

其中, $\Theta(u)$ 表示无人机 u 可采集数据的网格集合, $|\Theta(u)|$ 为集合 $\Theta(u)$ 中的网格个数。 $\|l_u - l_g\|$ 表示 l_u 与 l_g 之间的距离。如果网格 l_g 同时被 $m(g)$ 架无人机覆盖, 则由于重叠覆盖的无人机之间的互相干扰, 各架无人机可采集的数据量减少为 $\Gamma(g)/m(g)$ 。此外, 如果无人机 u 的采集范围内存在地面干扰机 $J_g, g \in [1, N_g^J]$ (其中 N_g^J 表示地面干扰机的数量), 即 $\delta_u (J_g = 1) = 0$, 则该无人机将面临严重的干扰或者致毁威胁, 此时该无人机无法完成数据采集。无人机群总的的数据采集量为

$$C = \sum_{u=1}^M Q(u) \quad (3)$$

本文拟首先通过无人机群的协同位置优化 $\{l_1, l_2, \dots, l_M\}$ 最大化数据采集量:

$$P1: \max_{\{l_1, l_2, \dots, l_M\}} C \quad (4)$$

2.2 无人机群抗干扰组网问题

无人机群完成位置部署之后, 采集数据并将其传输给升空平台编队。由于升空平台与无人机群的运动特性, 各无人机与升空平台之间的视距链路动态变化。同时由于目标空域内存在空中干扰机 $J_a, a \in [1, N_a^J]$ (其中 N_a^J 表示空中干扰机的数量), 在干扰威胁下, 部分无人机与升空平台编队之间的视距传输链路受扰, 因而各无人机独立与升空平台通信将导致较低的传输速率。为了提高数据上传性能, 各无人机通过与邻近无人机组成动态子网, 选取簇头无人机, 统一将子网内的数据上传至升空平台, 以降低传输损耗, 提高网络鲁棒性。每架无人机配备GPS装置可以获取邻近无人机节点的位置信息, 但是只能与距离范围 d_{th} 内的节点通信。每架无人机可通信的邻近无人机节点集合为

$$A^i = \{ u_j \mid \|l_i - l_j\| \leq d_{th} \}, \forall u_i \in [1, M] \quad (5)$$

无人机群子网 Co_n 由 $\{u_0^n\} \cup \{u_i^n, i = 1, 2, \dots\}$ 组成, 其中 u_0^n 为 Co_n 中的簇头无人机,

$$\left. \begin{aligned} Co_n &= \{u_0^n, u_i^n, \dots\} \\ \text{s.t. } & i = 1, 2, \dots, |Co_n| - 1 \\ & \|l_0^n - l_i^n\| \leq d_{th}, \forall u_i^n \in Co_n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中, $|Co_n|$ 表示集合 Co_n 的势。 Co_n 内的无人机将各自数据传输给 u_0^n , 由 u_0^n 将所有接收得到的数据上

传给升空平台。Co_n中无人机 u_i^n 与簇头无人机 u_0^n 之间的数据传输速率为

$$R_{0,i}^n = B \log_2 \left(1 + \frac{p h_{0,i}}{n_0 B + \sum_{j=1}^{N_a^J} p_j^J h_{j,0}^{J,n}} \right) \quad (7)$$

其中, p , B , n_0 分别表示无人机传输功率、信道带宽、信道噪声, p_j^J 为空中干扰机 $J_{a,j}$ 的干扰功率。采用Nakagami-m模型建模传输信道^[33]。 $h_{0,i} = \|l_0^n - l_i^n\|^{-\alpha} \beta_{0,i}$ 表示信道增益, 其中 $\beta_{0,i}$ 是瞬时随机量, $E[\beta_{0,i}] = E[\beta_{i,0}] = 1$ 。干扰信道的增益为 $h_{j,0}^{J,n} = \|l_j^J - l_0^n\|^{-\alpha} \beta_{j,0}^{J,n}$, 其中 $\|l_j^J - l_0^n\|$ 为空中干扰机 $J_{a,j}$ 与 u_0^n 之间的距离。

因此选择最佳的子网形成策略, 以最大化干扰环境中无人机群在时间 T 内上传至升空平台的总数据量是本文关注的第2个优化目标

$$\left. \begin{aligned} \text{P2: } & \max_{\{\text{Co}\}_\pi} \mathbb{R} \\ \text{s.t. } & \mathbb{R} = \sum_{n=1}^N \min \{(T - \Delta t) R_0^n, \mathcal{R}_n\} \\ & \mathcal{R}_n = \sum_{i=1}^{|\text{Co}_n|} \min \{\Delta t R_{0,i}^n, C(u_i^n)\} \\ & \text{Co}_n = \{u_0^n, u_i^n, \dots\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, N 为形成的子网总个数, Δt 为无人机组网阶段的耗费时间, \mathcal{R}_n 为联盟Co_n在时间 Δt 内实际汇集到簇头无人机 u_0^n 的数据量, R_0^n 为簇头无人机 u_0^n 与邻近升空平台之间的上传速率, $\min \{(T - \Delta t) R_0^n, \mathcal{R}_n\}$ 为 u_0^n 实际上传至升空平台的数据总量, \mathbb{R} 为该无人机群形成的所有子网总的上传数据量。

3 博弈建模

如图1所示, 本文研究干扰威胁下无人机集群部署及组网问题, 并在第2节将其建模为以下两个问题: (P1)干扰环境下无人机群部署优化问题; (P2)无人机群抗干扰组网问题。本节应用博弈理论, 从分布式优化的角度分析无人机群的部署及组网问题。3.1节将问题P1建模为无人机覆盖拥塞博弈。3.2节将问题P2建模为联盟形成博弈。

3.1 无人机覆盖拥塞博弈

根据2.1节构建的系统模型, 本节将干扰环境下无人机群部署优化问题建模为无人机覆盖拥塞博弈。拥塞博弈可以建模多架无人机共享有限资源的问题。每架无人机选择资源以最大化己方效用, 而资源产生的效用与选择该资源的无人机的数量有关, 越多无人机选择该资源, 则该资源可产生的效

用越小^[34]。将无人机群的协同部署问题建模为拥塞博弈, 其定义如下。

定义1(无人机拥塞博弈): 定义无人机拥塞博弈为 $\varphi = [U, L, \Theta, Q]$, 其中 U 为无人机集合, L 为目标区域的网格集合, $\Theta(u) \subset L$ 表示无人机 u 的网格选择策略, q_l 表示无人机选择网格 $l \in L$ 时的可采集数据量, $q_l = \Gamma(l)/m(l)$ 仅取决于该网格以及选择该网格的无人机数量, 无人机总的数据采集量为 $Q(u) = \sum_{l \in \Theta(u)} q_l$ 。无人机的博弈效用函数为 $r_u = Q(u)$ 。

定义2(精确势能博弈): 如果存在一个满足下式的势能函数 ϕ , 当无人机改变选择策略时($\pi_n \rightarrow \pi_{n'}$), 其博弈效用的增量与势能函数的增量相等, 则该博弈模型为精确势能博弈。精确势能博弈模型至少有一个纯策略纳什均衡解。

$$\phi(\pi_n, \pi_{-n}) - \phi(\pi_{n'}, \pi_{-n'}) = r_i(\pi_n, \pi_{-n}) - r_i(\pi_{n'}, \pi_{-n'}) \quad (9)$$

定理1 所提无人机拥塞博弈是一个精确势能博弈, 至少存在一个稳定的纳什均衡解。

证明 基于Rosenthal函数^[35], 定义势能函数为

$$\Phi(l_u, l_{-u}) = \sum_{x \in [1, X]} \sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} \quad (10)$$

当无人机 u 的位置部署由 l_u 变为 l'_u 时, 该用户的博弈效用的变化量为¹⁾

$$r_u - r_{u'} = Q(u) - Q(u') = \sum_{i \in \Theta(u)} \frac{\Gamma(i)}{m(i)} - \sum_{j \in \Theta(u')} \frac{\Gamma(j)}{m'(j)} \quad (11)$$

其中, $\Theta(u)$, $\Theta(u')$ 分别表示无人机 u 位于 l_u 和 l'_u 时可收集数据的网格集合。受限于无人机的运动模式, 即无人机每次只能移动1个网格, 因此 $\Theta(u)$, $\Theta(u')$ 可能有交集。令 $\Theta(u)$, $\Theta(u')$ 的交集为 $\Xi = \Theta(u) \cap \Theta(u')$ 。此时, 对于 Ξ 中的网格而言, 覆盖这些网格的无人机数量没有变化, 因而该网格可采集的数据量不发生变化, 即 $\sum_{i \in \Xi} \Gamma(i) \setminus m(i) = \sum_{j \in \Xi} \Gamma(j) \setminus m'(j)$, 因此

$$r_u - r_{u'} = \sum_{i \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}} \frac{\Gamma(i)}{m(i)} - \sum_{j \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \frac{\Gamma(j)}{m'(j)} \quad (12)$$

此时集合 $\{\Theta(u) \setminus \Xi\}$ 为无人机 u 之前覆盖但现在不再覆盖的网格集合, 即对于 $k \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}$,

¹⁾ 为便于描述, 此处略去干扰项 $\delta_u(J_g = 1)$, 若 $\delta_u(J_g = 1) = 0$, 则可令 $\Gamma(g) = 0$ 。

有 $m'(k) = m(k) - 1$; 同理, 对于 $k \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}$, 有 $m'(k) = m(k) + 1$ 。

当无人机 u 的位置部署由 l_u 变为 l'_u 时, 势能函数的变化量为

$$\begin{aligned} & \Phi(l_u, l_{-u}) - \Phi(l_{u'}, l_{-u'}) \\ &= \sum_{x \in [1, X]} \sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} - \sum_{y \in [1, X]} \sum_{j=1}^{m'(y)} \frac{\Gamma(y)}{j} \quad (13) \end{aligned}$$

对于集合 $[1, X] \setminus \{\Theta(u) \setminus \Xi\} \setminus \{\Theta(u') \setminus \Xi\}$ 中的网格而言, 无人机 u 的位置改变前后, 覆盖这些网格的无人机数量没有发生变化, 因而

$$\begin{aligned} & \sum_{x \in [1, X] \setminus \{\Theta(u) \setminus \Xi\} \setminus \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} \\ &= \sum_{y \in [1, X] \setminus \{\Theta(u) \setminus \Xi\} \setminus \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \sum_{j=1}^{m'(y)} \frac{\Gamma(y)}{j} \quad (14) \end{aligned}$$

故势能函数的改变量为

$$\begin{aligned} & \Phi(l_u, l_{-u}) - \Phi(l_{u'}, l_{-u'}) \\ &= \sum_{x \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\} \cup \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} \\ & \quad - \sum_{y \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\} \cup \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \sum_{j=1}^{m'(y)} \frac{\Gamma(y)}{j} \\ &= \sum_{x \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}} \sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} + \sum_{x \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} \\ & \quad - \sum_{y \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}} \sum_{j=1}^{m'(y)} \frac{\Gamma(y)}{j} - \sum_{y \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \sum_{j=1}^{m'(y)} \frac{\Gamma(y)}{j} \\ &= \sum_{x \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} - \sum_{j=1}^{m'(x)} \frac{\Gamma(x)}{j} \right) \\ & \quad + \sum_{y \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \left(\sum_{i=1}^{m(y)} \frac{\Gamma(y)}{i} - \sum_{j=1}^{m'(y)} \frac{\Gamma(y)}{j} \right) \\ &= \sum_{x \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}} \left(\sum_{i=1}^{m(x)} \frac{\Gamma(x)}{i} - \sum_{i=1}^{m(x)-1} \frac{\Gamma(x)}{i} \right) \\ & \quad + \sum_{y \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \left(\sum_{j=1}^{m(y)} \frac{\Gamma(y)}{j} - \sum_{j=1}^{m(y)+1} \frac{\Gamma(y)}{j} \right) \\ &= \sum_{x \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}} \frac{\Gamma(x)}{m(x)} - \sum_{y \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \frac{\Gamma(y)}{m'(y)+1} \\ &= \sum_{x \in \{\Theta(u) \setminus \Xi\}} \frac{\Gamma(x)}{m(x)} - \sum_{y \in \{\Theta(u') \setminus \Xi\}} \frac{\Gamma(y)}{m'(y)} \quad (15) \end{aligned}$$

由于 $r_u - r_{u'} = \Phi(l_u, l_{-u}) - \Phi(l_{u'}, l_{-u'})$, 因此基于精确势能博弈的定义^[35], 所提博弈模型为精确

势能博弈, 根据精确势能博弈的性质, \wp 至少可以得到一个稳定的纳什均衡解。证毕

3.2 无人机联盟形成博弈

根据2.2节构建的系统模型, 本节将无人机群的动态子网形成问题建模为联盟形成博弈^[36]。定义如下。

定义 3 (联盟形成博弈): 无人机群 $\mathcal{M} = [1, M]$ 可以分为多个不重叠的联盟 $\{\text{Co}_n\}$, $\cup_{n=1}^N \text{Co}_n = \mathcal{M}$ 。每架无人机有各自的联盟偏好准则 $\mathcal{P} = (\succ_1, \succ_2, \dots, \succ_N)$, \succ_i 表示无人机 u_i 选择加入联盟的偏好排序, 则策略 $(\mathcal{M}, \mathcal{P})$ 构成联盟形成博弈。

无人机群形成动态子网, 子网内的无人机将采集数据传给簇头, 由簇头上传给邻近的升空平台。定义联盟 Co_n 中各无人机的上传的总数据量为

$$E(\text{Co}_n) = \max \{ \min \{ (T - \Delta t) R_0^n, \mathcal{R}_n \} \} \quad (16)$$

其中, R_0^n 表示 Co_n 中可实现最大上传数据量的簇头无人机的上传速率, \mathcal{R}_n 是 Co_n 中汇聚到簇头无人机的数据总量。定义无人机 u_i 选择 Co_n 的联盟效用为

$$\varphi_i = E(\text{Co}_n \cup u_i) - E(\text{Co}_n) \quad (17)$$

$E(\text{Co}_n \cup u_i)$ 表示 u_i 加入联盟 Co_n 后, 该联盟总的上传数据量。 φ_i 可表征无人机 u_i 的加盟对 Co_n 上传数据量的提升效果。

定义 4 (双赢准则): 各无人机节点按照双赢准则进行联盟选择, 如果节点 $u_i \in \text{Co}_{n'}$ 的联盟选择由 $\text{Co}_{n'}$ 变为 Co_n , 则原属联盟中的其他无人机 $\text{Co}_{n'}/u_i$ 和新联盟中的无人机的 $\text{Co}_n \cup u_i$ 的和效用增加, 则该变更成立。即

$$\begin{aligned} \text{Co}_n \succ_i \text{Co}_{n'} &\Leftrightarrow E(\text{Co}_n \cup u_i) + E(\text{Co}_{n'}/u_i) \\ &> E(\text{Co}_n) + E(\text{Co}_{n'}) \quad (18) \end{aligned}$$

其中, $E(\text{Co}_n)$ 为联盟 Co_n 中所有无人机的和速率。

按照双赢准则, 如果原属于 $\text{Co}_{n'}$ 的无人机 u_i 离开 $\text{Co}_{n'}$, 选择加入新联盟 Co_n , 则新旧联盟的所有无人机的总上传数据量增加。

定义 5 (稳定联盟形成): 如果没有无人机可以通过改变自己的联盟形成策略, 从而单方面提高己方的博弈效用, 则当前的联盟形成方案 $\{\text{Co}_n\}$ 是稳定的。

$$\begin{aligned} & \varphi_i(\text{Co}_n, \text{Co}_{-n}) \geq \varphi_i(\text{Co}_{n'}, \text{Co}_{-n'}) \\ & \forall u_i \in [1, M], \text{Co}_n \neq \text{Co}_{n'} \quad \} \quad (19) \end{aligned}$$

定理 2 所提联盟形成博弈可以得到稳定的联盟形成结果, 该结果为纳什均衡解。

证明 按照双赢准则的定义, 无人机每次改变联盟选择, 都会进一步增加新旧联盟的总的上传数据量, 从而进一步增加整个无人机群总的上传数据量。由于无人机数量和可上传的数据量都是有限的。

因此最终所有无人机的实际上传数据量会收敛到极大值，并得到稳定的联盟形成策略。

接下来，借助精确势能博弈理论证明所得到的稳定联盟形成策略是纳什均衡解。定义势能函数为所有联盟总的上传数据量

$$\Psi = \sum_{n=1}^N E(Co_n) \quad (20)$$

当无人机 u_i 的联盟选择由 $Co_{n'}$ 变为 Co_n 时，其效用函数的变化量为

$$\begin{aligned} \varphi_i(Co_n) - \varphi_i(Co_{n'}) &= E(Co_n \cup u_i) - E(Co_n) \\ &\quad - (E(Co_{n'}) - E(Co_{n'} \setminus u_i)) \end{aligned} \quad (21)$$

由于无人机 u_i 的联盟改变只影响 $Co_{n'}$ 与 Co_n ，而对于其他联盟没有影响，因此

$$\sum_{k \in [1, N] \setminus n \setminus n'} E(Co_k) = \sum_{k' \in [1, N] \setminus n \setminus n'} E(Co_{k'}) \quad (22)$$

因此，势能函数的变化量为

$$\begin{aligned} \Psi_i(Co_n) - \Psi_i(Co_{n'}) &= E(Co_n \cup u_i) + E(Co_{n'} \setminus u_i) - E(Co_n) - E(Co_{n'}) \\ &= E(Co_n \cup u_i) + E(Co_{n'} \setminus u_i) - E(Co_n) - E(Co_{n'}) \\ &= E(Co_n \cup u_i) - E(Co_n) - (E(Co_{n'}) - E(Co_{n'} \setminus u_i)) \end{aligned} \quad (23)$$

由于 $\varphi_i(Co_n) - \varphi_i(Co_{n'}) = \Psi_i(Co_n) - \Psi_i(Co_{n'})$ ，故所提联盟形成博弈为精确势能博弈，故至少具有一个稳定的纳什均衡解。证毕

4 干扰环境下无人机群部署与组网方案

4.1 无人机群分布式位置部署算法

按照3.1节的分析结果，无人机群的部署问题可建模为拥塞博弈。各无人机通过分布式的优化方式最大化己方的数据采集量。最终，无人机群可以得到稳定的位置部署。按照前述的问题建模及博弈分析，本文提出一种基于随机优化的无人机群分布式部署算法，如表1所示。根据当前无人机群的位置，各个网格更新可采集数据量，重复覆盖的网格可采集数据量降低。随机选择1架无人机，根据其

动作空间(上、下、左、右、左前、左后、右前、右后)，随机选择1个运动方向，如果变更后的位置可以采集更多数据，则变更该无人机位置，否则维持现状。在有限的步骤内，该算法能以迭代优化的方式得到稳定的收敛结果。

T 个时隙内，无人机 u 应用表1进行位置部署的计算复杂度主要集中于 u 在每个时隙的运动方向的选择。每个时隙，各无人机有8个可选方向。因此， T 个时隙内无人机 u 应用表1的标量乘法开销为 $\mathcal{O}(8T)$ 。

4.2 无人机群联盟形成算法

经过部署优化之后，无人机群可以实现高效的对地覆盖和数据采集。此时，各无人机采集的数据量各不相同。同时考虑到空中干扰机的影响，每架无人机与升空平台之间的传输速率也不尽相同。因此，无人机群之间形成联盟分组，组内无人机将各自采集的数据传给簇头无人机，并通过簇头无人机实现数据上传。本文提出一种无人机群抗干扰联盟形成算法，各无人机根据3.2节定义的联盟效用和双赢准则进行联盟选择。具体算法流程如表2所示。

无人机 u 应用表2形成联盟分组的计算复杂度主要在于无人机 u 的联盟选择过程，其标量乘法开销为 $\mathcal{O}(|A_u|)$ ，其中 $|A_u|$ 为无人机 u 邻近的其他无人机数量。

5 仿真实验

本节通过仿真验证所提算法的有效性，仿真参数如表3所示。

5.1 无人机对地覆盖性能

无人机群以分布式的方式执行对地的数据采集任务，干扰机随机分布在目标区域。各无人机需要通过邻近无人机之间的信息交互，优化各自的位置部署，提升整个无人机群的数据采集性能。

图2(a)所示为无人机群的初始位置。由图可知，当前位置部署下，部分无人机(例如U5, U8, U10, U11以及U4、U6)的数据采集范围存在重叠，

表1 基于拥塞博弈的无人机群部署算法(Congestion-game based UAV swarm Deployment algorithm, CUD)

输入：无人机群初始位置、地面干扰机位置、网格化目标区域及各网格的数据量
输出：无人机群位置部署

- (1) FOR $t = 1 : T$
- (2) 随机选择1架无人机，计算当前的可采集数据量
- (3) 从其动作空间中选择1个运动方向，更新各个网格的可采集数据量，重复覆盖的网格可采集数据量降低，并计算变更位置后该无人机可采集的数据量
- (4) 如果可采集数据量增加，则更新位置，反之则维持现状
- (5) END

因而重叠区域内，各无人机可采集的数据量将随着重叠无人机数量的增加而减少，造成数据采集效率降低。同时，无人机U4, U6的采集范围内存在干扰机，存在干扰机的网格内的数据无法被采集，且此时无人机U4, U6面临严重的干扰威胁。

各无人机按照所提CUD算法对各自的位置进行优化，所得结果如图2(b)所示。经过无人机群的拥塞博弈，各无人机会避开存在干扰机的网格，并趋向数据量更多的热点区域。同时，各无人机之间会尽量避免重叠的采集区域，从而提升整个集群的数据采集效率。

在无人机群的拥塞博弈过程中，整个集群的采

集数据总量的变化如图3所示。可见随着迭代的进行，无人机群的采集数据总量逐渐增加，并最终趋于稳定值。所得结果与3.1节的博弈分析吻合。

图4展示了所提算法与随机位置部署算法和均匀部署算法的性能比较。如果无人机的采集范围内存在干扰机，则该无人机将面临严重的干扰或者致毁威胁，此时该无人机无法完成数据采集。由图4(a)可知，所提算法相比随机部署方案有明显的性能提升。当无人机数量不足以完成对地完全部署时(即无人机数量少于25架)，所提算法的性能明显优于均匀部署算法。当无人机数量大于25架次时，均匀部署有可能获得略高的数据采集总量。但是此时的

表 2 无人机群联盟形成算法(UAV Swarm Anti-jamming Coalition Formation algorithm, USACF)

输入：无人机群的当前位置和采集数据量、空中干扰机位置、各无人机的数据上传能力	
输出：无人机群的联盟分组结果及簇头无人机的选择	
(1) 初始化联盟分组，各组仅包含1架无人机	
(2) FOR $t = 1 : \Delta t$	
(3) 随机选择1架无人机，在其所属联盟中选择簇头无人机，将采集数据传输给簇头无人机，簇头无人机上传汇总数据，并计算该无人机的联盟效用	
(4) 该无人机选择加入邻近的其他联盟，并计算新的联盟效用	
(5) 按照双赢准则，如果该无人机可以获得更高的联盟效用，则改变联盟，反之则维持当前联盟不变	
(6) END	

表 3 仿真参数

参数	数值	参数	数值
目标区域	10 km × 10 km	离散网格数	$X = 100$
热点网格平均流量	$\lambda^h \in [5, 10]$ Mbit	升空平台数量	$A = 3$
其他网格平均流量	$\lambda^l \in [3, 6]$ Mbit	路径损耗系数	$\alpha = 2$
无人机数量	$M = 12$	阴影莱斯信道参数	0.126, 10.1, 0.835
无人机感知范围	$F = 1$ km	升空平台高度	$H_u = 15$ km
无人机群通信距离	$d_{th} = 4$ km	地面干扰机数量	$J_g = 3$
无人机群高度	$H_u = 1$ km	空中干扰机数量	$J_a = 3$
通信功率(信噪比)	$p_u / \sigma^2 = 20$ dBW	空中干扰机高度	$H_J \in [5, 8]$ km
信道带宽	$B = 2$ MHz	干扰功率(干噪比)	$p_J / \sigma^2 = 23$ dBW

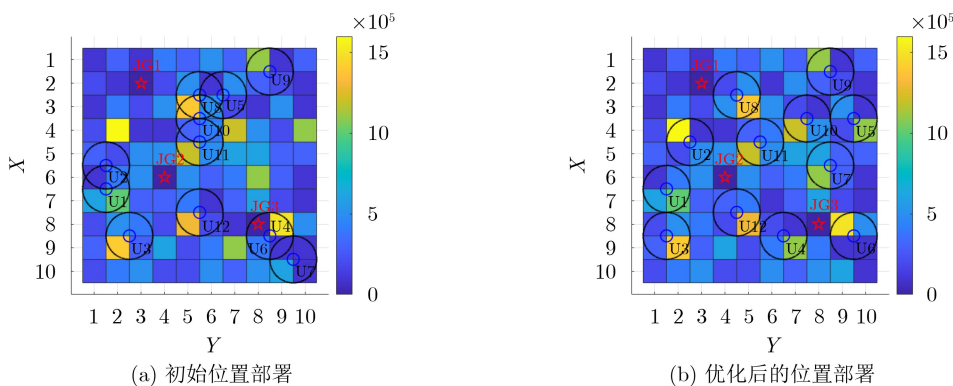


图 2 无人机群部署位置

均匀部署方案会面临严重的干扰威胁。因为必然存在部分无人机位于干扰机的攻击范围之内，从而对无人机群的安全性造成严重威胁。然而，对抗环境中的数据采集任务以无人机群的安全性为首要前提，在该前提下，无人机群通过位置部署以提高集群的数据采集量。如图4(b)所示，随着无人机数量的增加，各无人机平均可采集的数据量逐渐降低，所提算法相比于对比算法有较为明显的性能优势。

5.2 无人机联盟形成性能

各无人机收集的数据需要上传给升空平台编队。

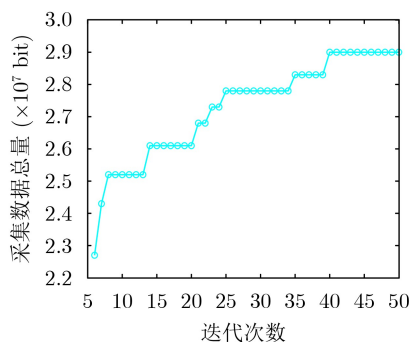


图3 拥塞博弈过程中无人机群采集数据总量变化情况

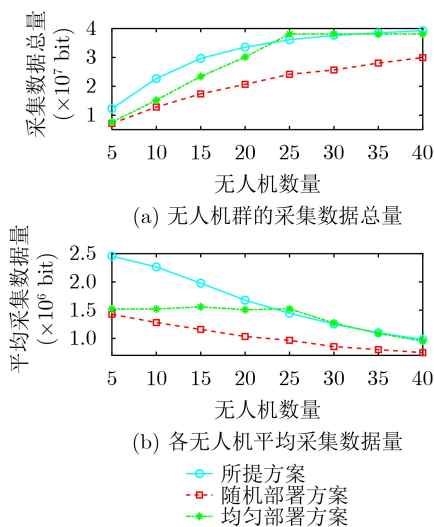


图4 拥塞博弈算法性能对比

如图5所示，各无人机的采集数据量各不相同，同时由于空中干扰机的影响，无人机群上传数据的传输能力也有较大差别。

为了最大化无人机群采集数据的总上传量，各无人机之间通过联盟分组实现协作传输。形成联盟分组的无人机将各自的采集数据传输给簇头无人机，簇头无人机将数据统一上传给邻近的升空平台。簇头无人机的选择不仅需要考虑到空中干扰机位置分布的影响，还需要综合考虑该无人机的数据上传能力和本地数据量的相对关系。当无人机的数据上传能力大于本地的采集数据量时，其他无人机的数据可以通过该无人机实现协作数据上传。无人机群(U)、空中干扰机(J)、升空平台(A)等各个节点，以及联盟分组及簇头无人机的选择结果如图6所示(黑色实心点为簇头无人机，同一颜色连线为同一个联盟分组，图6(b)为俯视平面图)。无人机群的联盟形成对比如图7所示。相比于基于帕累托准则的联盟形成算法，所提算法可以实现更高的数据上传量。

由于所提基于联盟分组的协作传输由联盟组网形成和簇头无人机数据上传两个阶段组成。因而，两个阶段传输时隙的分配，也会影响系统总的数据上传性能。如图8所示，当联盟组网阶段的分配时隙较少时(总时隙 $T=10$)，由于联盟内各无人机的数据没有完全传输给簇头无人机，因而数据上传量

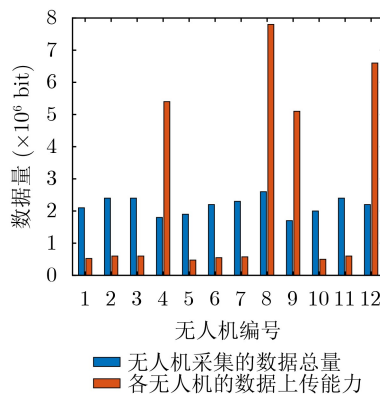
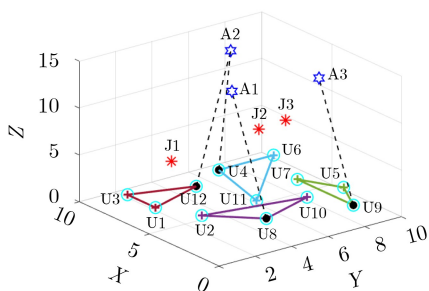
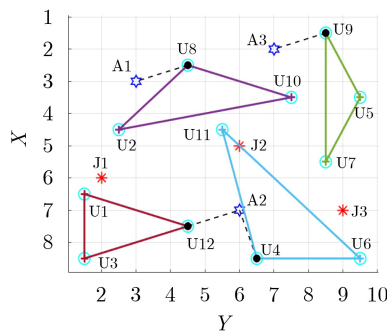


图5 各无人机采集数据量及数据上传能力



(a) 联盟形成结果立体图



(b) 联盟形成结果平面图

图6 无人机群联盟分组结果

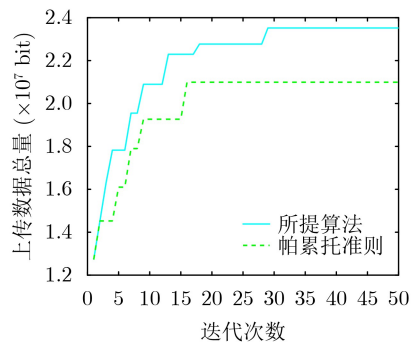


图7 联盟形成算法对比

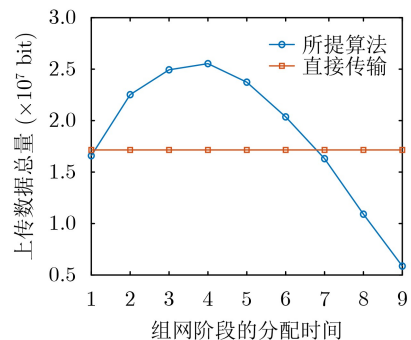


图8 组网阶段与数据上传阶段分配时间的影响

较低。同时，如果联盟分组阶段的分配时隙过多，则会因为簇头无人机的数据上传时间不够，导致传输性能降低。因而，合适的时隙分配同样会影响所提方案的传输性能。

6 结束语

本文研究了干扰威胁下，基于博弈理论的无人机群部署与组网问题。无人机群采用基于拥塞博弈的部署算法，可以实现对目标区域高效的数据采集，并以分布式优化的方式实现干扰躲避，提高数据采集量。各无人机采集完数据后，应用基于联盟形成博弈的抗干扰子网形成算法实现协作传输。联盟内无人机将采集数据传输给簇头无人机，簇头无人机将数据上传给升空平台编队，以增强无人机网络的鲁棒性和可靠性。最后，仿真结果表明，所提算法相较于传统算法有明显的性能提升。

参考文献

- [1] JIA Ziye, SHENG Min, LI Jiandong, *et al.* LEO-satellite-assisted UAV: Joint trajectory and data collection for internet of remote things in 6G aerial access networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(12): 9814–9826. doi: [10.1109/JIOT.2020.3021255](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3021255).
- [2] ZHAO Nan, LI Yanxin, ZHANG Shun, *et al.* Security enhancement for NOMA-UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 3994–4005. doi: [10.1109/TVT.2020.2972617](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2972617).
- [3] 李晓辉, 方坤, 樊韬, 等. 基于支持向量机的无人机定位信号分离算法研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(9): 2601–2607. doi: [10.11999/JEIT200725](https://doi.org/10.11999/JEIT200725).
LI Xiaohui, FANG Kun, FAN Tao, *et al.* Research on unmanned aerial vehicle location signal separation algorithm based on support vector machines[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(9): 2601–2607. doi: [10.11999/JEIT200725](https://doi.org/10.11999/JEIT200725).
- [4] ZHAO Nan, LU Weidang, SHENG Min, *et al.* UAV-assisted emergency networks in disasters[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 45–51. doi: [10.1109/MWC.2018.1800160](https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1800160).
- [5] 高杨, 李东生, 程泽新. 无人机分布式集群态势感知模型研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1271–1278. doi: [10.11999/JEIT170877](https://doi.org/10.11999/JEIT170877).
GAO Yang, LI Dongsheng, and CHENG Zexin. UAV distributed swarm situation awareness model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(6): 1271–1278. doi: [10.11999/JEIT170877](https://doi.org/10.11999/JEIT170877).
- [6] WANG Xue, JIN Tao, HU Liangshuai, *et al.* Energy-efficient power allocation and Q-learning-based relay selection for relay-aided D2D communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(6): 6452–6462. doi: [10.1109/TVT.2020.2985873](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2985873).
- [7] WANG Haichao, WANG Jinlong, DING Guoru, *et al.* Robust spectrum sharing in air-ground integrated networks: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(3): 148–155. doi: [10.1109/MWC.001.1900398](https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900398).
- [8] FOTOUHI A, QIANG Haoran, DING Ming, *et al.* Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(4): 3417–3442. doi: [10.1109/COMST.2019.2906228](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2906228).
- [9] BHATTACHARYA S and BAŞAR T. Game-theoretic analysis of an aerial jamming attack on a UAV communication network[C]. 2010 American Control Conference, Baltimore, USA, 2010: 818–823. doi: [10.1109/ACC.2010.5530755](https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5530755).
- [10] 张孟杰, 赵睿, 王培臣, 等. 基于强化学习的无人机辅助物联网抗敌意干扰算法[J]. 信号处理, 2021, 37(1): 11–18. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2021.01.002](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2021.01.002).
ZHANG Mengjie, ZHAO Rui, WANG Peichen, *et al.* Anti-jamming algorithm with reinforcement learning in UAV-aided internet of things[J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(1): 11–18. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2021.01.002](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2021.01.002).
- [11] LV Shichao, XIAO Liang, HU Qing, *et al.* Anti-jamming power control game in unmanned aerial vehicle networks[C].

- 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2017.8253988](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8253988).
- [12] 李明, 任清华, 吴佳隆. 无人机多域联合抗干扰智能决策算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(2): 367–374. doi: [10.3969/j.issn.1000-2758.2021.02.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2758.2021.02.017).
- LI Ming, REN Qinghua, and WU Jialong. Exploring UAV's multi-domain joint anti-jamming intelligent decision algorithm[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(2): 367–374. doi: [10.3969/j.issn.1000-2758.2021.02.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2758.2021.02.017).
- [13] XIAO Liang, LU Xiaozhen, XU Dongjin, *et al.* UAV Relay in VANETs against smart jamming with reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4087–4097. doi: [10.1109/TVT.2018.2789466](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2789466).
- [14] LU Xiaozhen, XIAO Liang, DAI Canhuang, *et al.* UAV-aided cellular communications with deep reinforcement learning against jamming[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(4): 48–53. doi: [10.1109/MWC.001.1900207](https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900207).
- [15] DUO Bin, WU Qingqing, YUAN Xiaojun, *et al.* Anti-jamming 3D trajectory design for UAV-enabled wireless sensor networks under probabilistic LoS channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 16288–16293. doi: [10.1109/TVT.2020.3040334](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3040334).
- [16] SANJAB A, SAAD W, and BAŞAR T. Prospect theory for enhanced cyber-physical security of drone delivery systems: A network interdiction game[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7996862](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996862).
- [17] KUO Y C, CHIU J H, SHEU J P, *et al.* UAV deployment and IoT device association for energy-efficient data-gathering in fixed-wing multi-UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(5): 1934–1946. doi: [10.1109/TGCN.2021.3093453](https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3093453).
- [18] ZHANG Xiao and DUAN Lingjie. Fast deployment of UAV networks for optimal wireless coverage[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, 18(3): 588–601. doi: [10.1109/TMC.2018.2840143](https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2840143).
- [19] ZHANG Xiao and DUAN Lingjie. Energy-saving deployment algorithms of UAV swarm for sustainable wireless coverage[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 10320–10335. doi: [10.1109/TVT.2020.3004855](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3004855).
- [20] KOYUNCU E, SHABANIGHAZIKELAYEH M, and SEFEROGLU H. Deployment and trajectory optimization of UAVs: A quantization theory approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(12): 8531–8546. doi: [10.1109/TWC.2018.2878021](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2878021).
- [21] SUN Sujunjie, ZHANG Guopeng, MEI Haibo, *et al.* Optimizing Multi-UAV deployment in 3-D space to minimize task completion time in UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(2): 579–583. doi: [10.1109/LCOMM.2020.3029144](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3029144).
- [22] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, *et al.* Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(8): 1647–1650. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2578312](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312).
- [23] WANG Jie, LIU Miao, SUN Jinlong, *et al.* Multiple unmanned-aerial-vehicles deployment and user pairing for nonorthogonal multiple access schemes[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(3): 1883–1895. doi: [10.1109/JIOT.2020.3015702](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3015702).
- [24] HAN Chen, LIU Aijun, WANG Haichao, *et al.* Dynamic anti-jamming coalition for satellite-enabled army IoT: A distributed game approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(11): 10932–10944. doi: [10.1109/JIOT.2020.2991585](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2991585).
- [25] 赵太飞, 宫春杰, 张港, 等. 一种无人机集群安全高效的分区集结控制策略[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(8): 2181–2188. doi: [10.11999/JEIT200601](https://doi.org/10.11999/JEIT200601).
- ZHAO Taifei, GONG Chunjie, ZHANG Gang, *et al.* A safe and high efficiency control strategy of unmanned aerial vehicles partition rendezvous[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(8): 2181–2188. doi: [10.11999/JEIT200601](https://doi.org/10.11999/JEIT200601).
- [26] 程潇, 董超, 陈贵海, 等. 面向无人机自组网编队控制的通信组网技术[J]. 计算机科学, 2018, 45(11): 1–12, 51. doi: [10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.001](https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.001).
- CHENG Xiao, DONG Chao, CHEN Guihai, *et al.* Communication and networking techniques for formation control in UAV Ad hoc networks[J]. *Computer Science*, 2018, 45(11): 1–12, 51. doi: [10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.001](https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.001).
- [27] 钟剑峰, 王红军. 基于5G和无人机智能组网的应急通信技术[J]. 电讯技术, 2020, 60(11): 1290–1296. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2020.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2020.11.005).
- ZHONG Jianfeng and WANG Hongjun. Emergency communication technology based on 5G and drone intelligent networking[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(11): 1290–1296. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2020.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2020.11.005).
- [28] 逯建琦, 南建国, 李雪. 改进的贪婪算法在无人机组网中的研究与应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2020, 21(2): 41–46. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.006).
- LU Jianqi, NAN Jianguo, and LI Xue. Research and application of improved greedy algorithm in UAV network[J]. *Journal of Air Force Engineering*

- University: Natural Science Edition*, 2020, 21(2): 41–46. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.006).
- [29] 张建东, 李丹, 任齐凤, 等. 基于复杂网络有人机/无人机组网系统同步性分析[J]. 计算机应用, 2016, 36(S1): 12–15, 24. ZHANG Jiandong, LI Dan, REN Qifeng, *et al.* Synchronization analysis for manned/unmanned aerial vehicle networking system based on complex network[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(S1): 12–15, 24.
- [30] 周子为, 段海滨, 范彦铭. 仿雁群行为机制的多无人机紧密编队[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(3): 230–238. doi: [10.1360/N006-00138](https://doi.org/10.1360/N006-00138). ZHOU Ziwei, DUAN Haibin, and FAN Yanming. Unmanned aerial vehicle close formation control based on the behavior mechanism in wild geese[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(3): 230–238. doi: [10.1360/N006-00138](https://doi.org/10.1360/N006-00138).
- [31] 王泊涵, 吴婷钰, 李文浩, 等. 基于多智能体强化学习的大规模无人机集群对抗[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1739–1753. doi: [10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0476](https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0476). WANG Bohan, WU Tingyu, LI Wenhao, *et al.* Large-scale UAVs confrontation based on multi-agent reinforcement learning[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(8): 1739–1753. doi: [10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0476](https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0476).
- [32] WANG Liming and CHI Yuejie. Stochastic approximation and memory-limited subspace tracking for poisson streaming data[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(4): 1051–1064. doi: [10.1109/TSP.2017.2780041](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2780041).
- [33] PANG Xiaowei, LIU Mingqian, ZHAO Nan, *et al.* Secrecy analysis of UAV-based mmwave relaying networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 4990–5002. doi: [10.1109/TWC.2021.3064365](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3064365).
- [34] 罗睿辞, 叶蔚, 刘学洋, 等. 基于拥塞博弈的微服务运行时资源管理方法[J]. 电子学报, 2019, 47(7): 1497–1505. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2019.07.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2019.07.013). LUO Ruici, YE Wei, Liu Xueyang, *et al.* A runtime resource management approach of microservices based on congestion game[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(7): 1497–1505. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2019.07.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2019.07.013).
- [35] LIU Dianxiong, WANG Jinlong, XU Kun, *et al.* Task-driven relay assignment in distributed UAV communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(11): 11003–11017. doi: [10.1109/TVT.2019.2942095](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2942095).
- [36] 李翠莲, 杨震, 李君. 分组多用户检测联盟模型与联盟形成算法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2447–2452. LI Cuilian, YANG Zhen, and LI Jun. Research on group multiuser detection coalition models and coalition formation algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(10): 2447–2452.
- 韩晨: 男, 1993年生, 工程师, 研究方向为卫星通信、抗干扰、博弈论.
- 刘爱军: 男, 1970年生, 教授, 研究方向为卫星通信、信号处理.
- 安康: 男, 1989年生, 高级工程师, 研究方向为空天地网络、智能超表面、通信抗干扰.
- 童新海: 男, 1974年生, 教授, 研究方向为卫星通信、信号处理.
- 梁小虎: 男, 1989年生, 讲师, 研究方向为信号处理、卫星通信.

责任编辑: 马秀强