



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

干扰环境下无人机群动态频谱决策方法

邱文静, 韩晨, 刘爱军

引用本文

邱文静, 韩晨, 刘爱军. 干扰环境下无人机群动态频谱决策方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(12): 326-331.

QIU Wen-jing, HAN Chen, LIU Ai-jun. [Dynamic Spectrum Decision-making Method for UAV Swarms in Jamming Environment](#) [J]. Computer Science, 2022, 49(12): 326-331.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[蜜罐博弈中信念驱动的攻防策略优化机制](#)

Belief Driven Attack and Defense Policy Optimization Mechanism in Honeypot Game

计算机科学, 2022, 49(9): 333-339. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400011>

[D2D辅助移动边缘计算下的卸载策略优化](#)

Optimization of Offloading Decisions in D2D-assisted MEC Networks

计算机科学, 2022, 49(6A): 601-605. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210200114>

[基于注意力机制和门控网络相结合的混合推荐系统](#)

Hybrid Recommender System Based on Attention Mechanisms and Gating Network

计算机科学, 2022, 49(6): 158-164. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210500013>

[面向铁路集装箱的高可靠低时延无线资源分配算法](#)

Wireless Resource Allocation Algorithm with High Reliability and Low Delay for Railway Container

计算机科学, 2022, 49(6): 39-43. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211200143>

[空中传感器网络中负载均衡的地理路由协议](#)

Load-balanced Geographic Routing Protocol in Aerial Sensor Network

计算机科学, 2022, 49(2): 342-352. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201000155>

干扰环境下无人机群动态频谱决策方法

邱文静¹ 韩晨² 刘爱军¹

¹ 陆军工程大学通信工程学院 南京 210007

² 国防科技大学第六十三研究所 南京 210007

(qqwwjj0536@163.com)

摘要 无人机通常以集群组网的方式进行协作传输,其凭借成本低廉、部署灵活等特点,在军事领域得到了广泛应用。由于无线通信的广播特性及无人机视距传输的特点,无人机群容易受到恶意干扰攻击。同时,由于无线频谱资源的稀缺性,无人机群需要共享有限的频谱资源以提升频谱效率,从而需要面对内部节点间的互扰问题,因此形成了干扰环境下无人机群最大化集群和速率的优化问题。为了提高干扰环境下无人机群数据传输的有效性和可靠性,提出了一种基于联盟形成博弈的分布式协同频谱决策方法,以应对外部的恶意干扰威胁及无人机群内部的互扰问题,进而实现干扰威胁下无人机群动态、高效、智能的频谱决策。借助势能博弈理论证明了所提抗干扰联盟形成博弈可以实现稳定的联盟分组,并可得到纳什均衡解。

关键词: 无人机群;频谱决策;通信抗干扰;协同通信;博弈论

中图分类号 V243.1

Dynamic Spectrum Decision-making Method for UAV Swarms in Jamming Environment

QIU Wen-jing¹, HAN Chen² and LIU Ai-jun¹

¹ College of Communications Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China

² The 63th Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China

Abstract Unmanned aerial vehicles(UAVs) are widely used in the military field due to their low cost and flexible deployment, which are usually carried out in the form of cluster network for cooperative transmission. Because of the broadcasting nature of wireless transmission and the line-of-sight transmission characteristics, UAV swarm is vulnerable to malicious jamming attacks. Moreover, due to the scarcity of spectrum resources, the UAV swarm needs to share the limited spectrum resources, which will introduce severe co-channel interference. Therefore, the problem of cooperative spectrum sharing among UAV swarm is not only threatened by the malicious jamming, but also limited by the mutual interference among UAVs. Specifically, an optimization problem is formulated to maximize the sum rate of UAV swarms in the jamming environment. To improve the effectiveness and reliability of the UAVs' transmission, this paper proposes a distributed spectrum decision-making method based on the coalition formation game, to deal with the external jamming threats and the internal mutual interference. Thus, the dynamic, efficient and intelligent spectrum control can be realized for the UAV swarm under the jamming threat. Meanwhile, with the help of potential game, the proposed anti-jamming coalition formation game turns out to be able to form the stable alliance grouping, and achieve the Nash equilibrium.

Keywords UAV swarms, Spectrum decision-making, Anti-jamming communications, Cooperative communication, Game theory

1 引言

无人机作为一种新型的智能无人系统,通常以协同编队的方式执行作战任务^[1]。无人机群数据传输的可靠性和有效性是制约其作战性能的重要因素。如何构建高效、

稳健的无人机通信网络是当前研究的热门课题^[2]。一方面,无人机群容易遭受来自外部的恶意干扰攻击;另一方面,受限于稀缺的频谱资源,无人机群内部频谱共享导致的互扰问题也是限制其网络规模和通信性能的关键^[3]。因此,如何实现无人机群动态、高效、智能的协同频谱

到稿日期:2022-04-24 返修日期:2022-08-18

基金项目:国家自然科学基金(62201593);国家重点研发计划(2018YFB1801103);江苏省前沿引领技术基础研究专项项目(BK20192002);国防科技大学科研计划项目(ZK22-08)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62201593), National Key Research and Development Program of China(2018YFB1801103), Natural Science Foundation on Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu Province(BK20192002) and Research Program of National University of Defense Technology(ZK22-08).

通信作者:韩晨(chenhan2017lgd@163.com)

决策,是一个值得关注的重点问题。

无人机通信因其具有无线广播特性和视距传输特点容易受到恶意干扰攻击^[4-5]。现有文献中普遍通过无人机功率控制、中继选择、轨迹优化等技术抵御恶意干扰攻击,以提高安全性和可靠性^[6-8]。文献[9]应用贝叶斯-斯坦伯格博弈研究了干扰环境下无人机的功率控制问题。文献[10]应用静态博弈和动态博弈方法研究了无人机通信网络中的功率控制问题,采用Q学习算法获得了最优功率控制策略。文献[11]将无人机辅助下物联网的抗干扰问题建模为斯坦伯格博弈,并应用强化学习算法动态优化无人机和物联网节点的发射功率,以提高抗干扰性能。文献[12]采用零和博弈建模无人机与恶意攻击者之间的对抗问题,以增强无人机飞行控制的空间安全性。文献[13]研究了干扰威胁下的无人机中继选择问题,将其建模为抗干扰中继博弈模型,并推导得到其纳什均衡解。文献[14]以最大化中继通信吞吐量为优化目标,研究了干扰威胁下的无人机轨迹规划和功率控制的联合优化问题。文献[15]研究了无人机抗干扰三维轨迹控制方案以提高无人机传感器网络的传输可靠性。文献[16]通过轨迹优化和功率控制以最大化干扰威胁下无人机上行链路的数据吞吐量。文献[17]提出了一种基于知识模型的强化学习方案,通过压缩无人机决策空间来加速抗干扰策略的收敛速度,从而实现高效的无人机抗干扰轨迹规划。

现有文献中大多数工作主要针对单架次无人机和功率域的抗干扰技术进行研究,但少有文献研究无人机群在干扰环境下综合考虑外部干扰和内部互扰的频谱决策问题。为了提高干扰环境下无人机群数据传输的有效性和可靠性,有效应对外部的恶意干扰威胁及无人机群内部的频率互扰问题,本文将无人机群多节点协同用频问题建模为联盟形成博弈,以低复杂度、分布式的方式实现了无人机网络的动态、高效、智能的频谱决策。

2 系统模型与问题建模

本文考虑由 M 架无人机 $\mathcal{M}=[m_1, m_2, \dots, m_M]$ 组成集群编队执行数据传输任务。无人机群共用 N 个可用频点 $F=[f_1, f_2, \dots, f_N]$ 。由于无人机数量大于频点数($M>N$),因此需要多架无人机共用同一频点进行数据传输,但共用同一频点的无人机之间存在互扰。此外,当前区域内存在干扰机,其对通信频点施加动态干扰,与无人机群进行频谱对抗。

为了应对干扰威胁,无人机群采用能量检测法检测干扰环境。各无人机节点根据各频点信干噪比的检测结果,将受扰严重的频点从可用频点集合中剔除。选择同一频点的无人机节点形成一个频率分组 Co ,组内无人机使用同一频点通信,并通过控制信道广播当前传输速率。频率分组 Co_n 由使用频点 f_n 的所有无人机节点组成,彼此之间存在互扰:

$$Co_n = \{m_i | F(m_i) = f_n\} \quad (1)$$

$$\exists m_i \in \mathcal{M}, \bigcup_{n=1}^N Co_n = \mathcal{M}$$

其中, $F(m_i)$ 表示无人机 m_i 使用的通信频点。对于使用频点 f_n 的无人机 $m_i \in Co_n$,其可实现的最大传输速率为:

$$R_i^* = \log_2 \left(1 + \frac{p_i |\beta_i^n| d^{-\alpha}}{N_n^0 + p_{j,i} + CCI(m_i)} \right) \quad (2)$$

其中, p_i 和 N_n^0 分别表示无人机 m_i 的传输功率和频点 f_n 的信道噪声水平。本文采用 Nakagami 模型建模传输信道, $d^{-\alpha}$ 表示传输距离为 d 时的路径传输损耗, α 为路径衰落系数, β_i^n 是瞬时随机量, $E[\beta_i^n] = 1$ ^[18]。 $CCI(m_i) = \sum_{m_k \in Co_n \setminus m_i} p_k |\beta_k^n| d_{k,i}^{-\alpha}$ 表示与 m_i 使用同一频点的其他无人机 ($m_k \in Co_n \setminus m_i$) 对 m_i 的同频干扰, $d_{k,i}$ 为 m_k 与 m_i 之间的相对距离。

如图1所示,干扰机功率受限,干扰信号强度随干扰距离的增加而衰减。有效干扰范围为半径为 d_n 的圆形区域, $p_{j,i}$ 为干扰机作用于 m_i 的有效干扰功率。

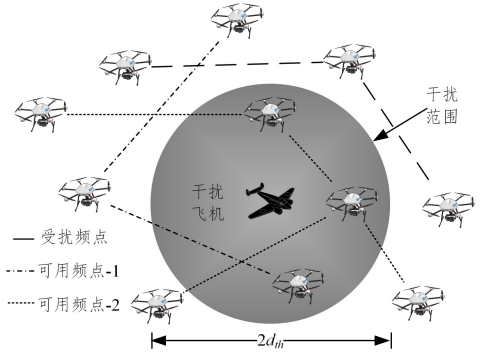


图1 系统模型图

Fig.1 System model diagram

在干扰环境中,无人机群不仅要解决由于共用频点导致的节点间互扰,还需要具备高效的抗干扰决策能力。位于干扰范围内的无人机节点的可用频点集合将受到严重威胁,因此,在无人机群频谱决策时,既需要共用同一频点的无人机节点之间保持充足的空间隔离,以尽可能削减互扰影响,同时又要考虑干扰攻击的动态性,有针对性地进行抗干扰频谱决策,实现高效的协同用频和动态的频谱控制。因此,干扰环境下无人机群通过协同用频以最大化集群和速率,实现动态高效的频谱决策是本文研究的核心问题。

$$P: \max_{\{Co\}} R_{\text{sum}} \quad (3)$$

其中, $R_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{|Co_n|} R_i$ 表示所有无人机节点的和速率。

3 博弈建模与博弈分析

3.1 抗干扰频率分组形成博弈

无人机群动态调整频率分组策略,以实现抗干扰协作通信,并降低各无人机间的同频互扰。但是,由于大规模无人机节点的频率分组问题的复杂性,集中式优化方案可能导致“维度灾难”,难以实现高效的抗干扰性能。因此,本文将无人机群的频率分组问题建模为抗干扰联盟形成博弈(Anti-jamming Coalition Formation Game, ACFG)^[19]。

定义1 无人机节点集合可分为多个不重叠的联盟 $\{Co_n\}$, $\bigcup_{n=1}^N Co_n = \mathcal{M}$ 。每个无人机节点有各自的联盟偏好准则 $\mathcal{P}=(\succ_1, \succ_2, \dots, \succ_N)$, 决定各自对不同联盟的偏好程度。策略 $(\mathcal{M}, \mathcal{P})$ 构成联盟形成博弈。

无人机节点按照各自的效用函数,以分布式的方式选择通信频点,形成多个频率分组(即联盟)以降低互扰,并在干扰威胁下实现动态的频率分组,提高无人机网络的抗干扰性能。

每个无人机节点的博弈效用定义为:

$$u_i = E[Co_n] - E[Co_n \setminus m_i] \quad (4)$$

$$\forall Co_n, \forall m_i \in Co_n$$

其中, $E[Co_n] = \sum_{m_k \in Co_n} R_k$, 即所有使用通信频率 f_n 的无人机节点的和速率。 $E[Co_n \setminus m_i] = \sum_{m_k \in Co_n \setminus m_i} R_k$, 即当 m_i 不使用通信频率 f_n 时, Co_n 中其他节点 $m_k \in Co_n \setminus m_i$ 的和速率。实际上, u_i 可以表征在考虑了 m_i 使用频点 f_n 对其他无人机造成互扰后, 此时的频率分组 Co_n 内各无人机节点的和速率的增量。

联盟偏好准则是联盟形成博弈最关键的影响因素, 它代表每个无人机节点对各频率分组的偏好倾向, 即该准则决定着 m_i 是否愿意离开或者加入该频率分组。同时联盟偏好准则影响着联盟形成博弈的稳定性。常用的联盟偏好准则为帕累托准则^[20]。本文提出局部准则以加强 ACFG 的分布式性能。

定义 2 若 ACFG 采取帕累托准则, 则节点 $m_i \in Co_{n'}$ 和频率分组 $\{Co_n, Co_{n'}\}, n, n' \in [1, N]$, 满足式(5):

$$Co_n >_i Co_{n'} \Leftrightarrow u_i(Co_n \cup m_i) > u_i(Co_{n'}) \& \& u_j(Co_n \cup m_i) \geq u_j(Co_n), \forall m_j \in Co_n \& \& u_g(Co_{n'} \setminus m_g) \geq u_g(Co_{n'}), \forall m_g \in Co_{n'} \setminus m_i \quad (5)$$

定义 3 若 ACFG 采用局部准则, 则节点 $m_i \in Co_n$ 和频率分组 $\{Co_n, Co_{n'}\}, n, n' \in [1, N]$, 满足式(6):

$$Co_n >_i Co_{n'} \Leftrightarrow u_i(Co_n \cup m_i) > u_i(Co_{n'})$$

$$\Leftrightarrow E(Co_n \cup m_i) - E(Co_n) > E(Co_{n'}) - E(Co_{n'} \setminus m_i)$$

$$\Leftrightarrow E(Co_n \cup m_i) + E(Co_{n'} \setminus m_i) > E(Co_{n'}) + E(Co_n) \quad (6)$$

根据帕累托准则, 各无人机节点改变频率分组时不能损害其他任何节点的效益。根据局部准则, 各无人机节点若改变频率分组, 则将进一步增加原属频率分组 $Co_{n'}$ 和当前新的频率分组 Co_n 的和速率, 从而进一步增加整个无人机群的和速率。

3.2 博弈分析

无人机节点选择频率分组, 以分布式的方式实现高效的抗干扰防御并最小化群内的同频互扰。本节首先分析所提 ACFG 的稳定性和最佳性。

定义 4 若没有无人机节点可以独自改变频率分组策略从而单方面增加己方效用, 则该频率分组策略 $\{Co_n\}_{n \in [1, N]}$ 是稳定的。

$$u_i(Co_n, Co_{-n}) \geq u_i(Co_{n'}, Co_{-n})$$

$$\forall m_i \in Co_n \quad (7)$$

$$\forall Co_n, Co_{-n} \in \{Co_n\}_{n \in [1, N]}, Co_n \neq Co_{n'}$$

其中, Co_{-n} 表示使用其他频点 f_{-n} 的无人机节点的频率分组。

定理 1 若采用局部准则作为联盟偏好准则, 所提 ACFG 可以实现稳定的频率分组。

证明: 基于定义 3, 当所有的无人机节点根据局部准则选择频率分组时, 改变频率分组只能增加之前旧的频率分组和当前新的频率分组总的和速率。因此, 整个无人机群的和速率会随着各无人机节点改变频率分组而持续增加。同时, 由于频点数有限, 各无人机节点可供选择的频率分组策略是

有限的, 因此, 无人机群和速率会收敛到极大值, 最终得到稳定的频率分组。

反之, 若最终的频率分组 $\{Co\}^*$ 是不稳定的, 则必然存在节点和相应的策略可以改变频率分组。根据局部准则, 整个无人机群的和速率将会进一步增加。这与有限策略及有限收益的假设相悖, 因此最终的频率分组必然是稳定的。证毕。

其次, 本文借助精确势能博弈 (Exact Potential Game, EPG) 证明所提 ACFG 得到的稳定频率分组是问题 P 的次最优解。

定义 5 若该博弈模型是 EPG, 则必然存在一个满足式(8)的势能函数 ϕ :

$$\phi(\pi_n, \pi_{-n}) - \phi(\pi_{n'}, \pi_{-n'})$$

$$= u_i(\pi_n, \pi_{-n}) - u_i(\pi_{n'}, \pi_{-n'}), \forall \pi_n, \pi_{n'} \in \{\pi\} \quad (8)$$

其中, π_n 表示节点 n 的动作策略。

定理 2 若各无人机节点的效用函数如式(4)所示, 则所提 ACFG 是一个 EPG。因此, ACFG 存在至少一个纳什均衡解, 且问题 P 的全局最优解是纳什均衡解。

证明: 定义势能函数为整个无人机群的和速率, 即 $\phi = R_{\text{sum}}$ 。当无人机节点 m_i 改变频率分组, 即由 $Co_{n'}$ 变为 Co_n 时, 势能函数的增量为:

$$\phi(Co_n, Co_{-n}) - \phi(Co_{n'}, Co_{-n'})$$

$$= E[Co_n \cup m_i] + E[Co_{n'} \setminus m_i] + E[\{Co_n\}_{n \in [1, N]} \setminus \{Co_n \cup m_i\} \setminus \{Co_{n'} \setminus m_i\}] - E[Co_n] - E[Co_{n'}] - E[\{Co_n\}_{n \in [1, N]} \setminus Co_n \setminus Co_{n'}]$$

$$= E[Co_n \cup m_i] - E[Co_n] - (E[Co_{n'}] - E[Co_{n'} \setminus m_i]) \quad (9)$$

由于无人机改变频率分组只会影响原属频率分组 $Co_{n'}$ 和当前新的频率分组 Co_n 的和速率, 而不会影响其他频率分组, 因此 $E[\{Co_n\}_{n \in [1, N]} \setminus \{Co_n \cup m_i\} \setminus \{Co_{n'} \setminus m_i\}]$ 与 $E[\{Co_n\}_{n \in [1, N]} \setminus Co_n \setminus Co_{n'}]$ 相等。

效用函数的增量为:

$$u_i(Co_n) - u_i(Co_{n'})$$

$$= E[Co_n \cup m_i] - E[Co_n] - (E[Co_{n'}] - E[Co_{n'} \setminus m_i]) \quad (10)$$

当无人机改变频率分组时, 其势能函数和效用函数的增量相同, 即:

$$\phi(Co_n, Co_{-n}) - \phi(Co_{n'}, Co_{-n'})$$

$$= u_i(Co_n) - u_i(Co_{n'}) \quad \forall m_i \in \mathcal{M}, \forall Co_n, Co_{n'} \in \{Co\}_{n \in [1, N]} \quad (11)$$

因此, 所提 ACFG 是一个 EPG。根据文献[21], EPG 至少有一个纳什均衡解, 且势能函数的全局最优解是一个纳什均衡解。因此, 当式(4)设为各无人机节点的效用函数时, 无人机群可以实现稳定的频率分组, 且相对应的无人机群的和速率至少可以收敛到次最优解。故所提方案能以分布式的方式实现和速率最大化, 所得频率分组方案是问题 P 的次最优解。证毕。

4 分布式动态抗干扰频率分组算法

本文提出分布式动态抗干扰频率分组算法 (Distributed Dynamic Anti-jamming Frequency Grouping Algorithm,

DDAFG),以实现动态高效的协同频谱决策。

无人机群检测干扰环境并进行自主抗干扰协同用频决策,如其中 π_n 表示节点 n 的动作策略。

如定理 2 所示,若各无人机节点采用式(4)作为效用函数,则 ACFG 可以收敛到稳定的次最优解。所提 DDAFG 算法采取随机优化的方式,使用局部准则形成频率分组。当无人机节点 m_i 选择一个新的频率分组时,根据该频点上的控制信道广播的其他节点的速率,计算博弈效用。基于局部准则, m_i 决定维持原来的频率分组还是加入新的频率分组。然后继续选择其他节点重复以上过程,直至算法收敛。具体流程如算法 1 所示。

算法 1 分布式动态抗干扰频率分组形成算法

输入:根据能量检测法得到的受扰频点 \mathcal{L} 及各无人机节点的可用频点集合

输出:无人机群中各节点的频率分组方案 $\{Co\}^*$

1. 对于每一个节点 m_i ,记录其当前所属的频率分组 Co_{n_i} 和相应的效用 $u_i^{n_i}$;
2. for $t=1:T$
3. m_i 选择一个新的通信频点 f_n ,并试图加入该频率分组 Co_n ,根据该频点上的控制信道广播的其他节点速率,计算新效用 $u_i^{n_i}$;
4. 根据局部准则,若 $u_i^{n_i}(Co_n) > u_i^{n_i}(Co_{n_i})$,则 m_i 选择离开原属频率分组 Co_{n_i} ,加入新频率分组 Co_n ,否则维持原频率分组;
5. $t \leftarrow t+1$;
6. end

5 仿真实验

本节通过仿真实验验证所提方案的有效性,仿真参数如表 1 所列^[22]。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Area Coverage	$X \times Y = 1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$
Jammer Effective Interference Zone	$d_m = 0.3 \text{ km}$
Maximum Interference Power	$p_j = 3 \text{ W}$
UAV Transmit Power	$p = 1 \text{ W}$
Path-loss Factor	$\alpha = 2$

无人机节点随机分布在目标区域,各节点的初始分布如图 2(a)所示($M=10$)。当没有干扰攻击时,根据所提算法得到的无人机群协同用频分组如图 2(b)所示($N=5$)。各频点的信道噪声功率为 $N_0 = [0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1] \text{ W}$ 。由图 2 可知,为了降低组内互扰,距离相近的节点使用不同的频点,而使用相同频率的无人机节点相距较远。

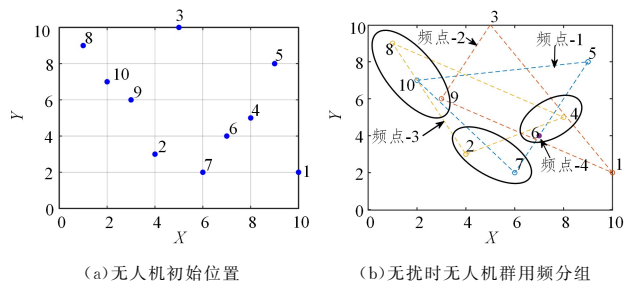


图 2 无干扰时无人机群位置及用频分组

Fig. 2 Location and frequency coalition of UAV without jamming

当干扰机针对频点 1 和频点 2 施加干扰攻击时,根据所提算法得到的无人机群协同用频分组如图 3 所示。由图 3 可知,在干扰范围内的无人机将避免使用受扰频点,转而切换到无扰频点进行通信,并与远方无人机共用频点,以降低互扰,提高频谱效率。此外,干扰范围之外的无人机不受干扰威胁,依然可以使用信道质量更高的频点 1 和频点 2 进行通信。由图 3 可知,在干扰威胁下,整个无人机群仍然可以实现高效的协同用频,既可有效抵御干扰攻击,又兼顾了集群内部的同频互扰。

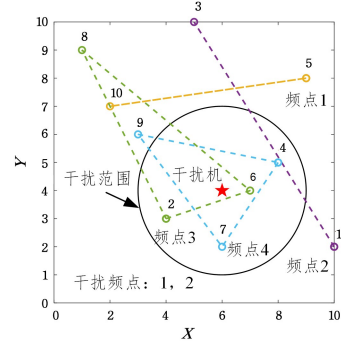


图 3 干扰威胁下的无人机群协同用频分组

Fig. 3 UAV frequency coalitions under jamming threats

在干扰威胁下,所提联盟形成方案使用局部准则,所提方案与其他联盟形成博弈方案^[23]的性能对比如图 4 所示。根据帕累托准则,各无人机节点若想改变联盟,则在提高己方收益的同时,不能损害其他任何节点的收益。帕累托准则由于其最为严苛的联盟约束,限制了各节点的联盟改变,因此所得收益最低。根据自私准则,各无人机节点在改变联盟时,只考虑己方的收益提升,而不考虑其他节点。因此在自私准则下,各无人机节点竞相选择有利于己方收益的决策,从而导致整个无人机集群的和速率在得到有限的提升后陷入震荡状态,如图 4 中的波浪状曲线所示。由于本文的优化目标是最大化整个无人机群的和速率,因此根据所提局部准则,各无人机节点可以朝着有利于提升新旧联盟总的和速率的方向进行迭代优化。结合图 4 的仿真结果及定理 2 中的理论分析可知,所提局部准则更有利于无人机群和速率的提升。

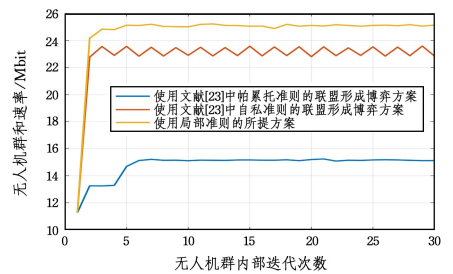


图 4 所提联盟形成方案与其他博弈方案的性能比较

Fig. 4 Performance comparison between the proposed scheme based on coalition formation game and other schemes

图 5、图 6 给出了无人机群节点数量和可用频点数量对所提算法性能的影响。由图 5 可知,随着频点数量的增加,无人机群的和速率逐渐增加,并趋向饱和。充足的频谱资源可使得无人机群在避开受扰频点的同时,基本消除内部的频率互扰。

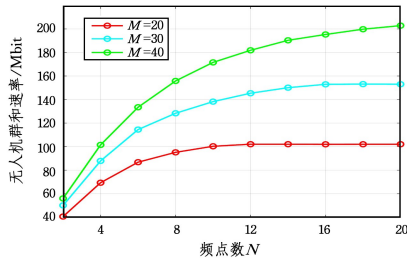


图5 频点数对所提算法的性能影响

Fig. 5 Influence of the number of frequency points on the performance of the proposed algorithm

由图6可知,在频谱资源充足时,增加无人机数量可以提高资源利用率,并提高无人机群的和速率。但是,当频谱资源不足时,继续增加无人机数量,会加重频率互扰现象,从而限制了无人机群的通信性能。

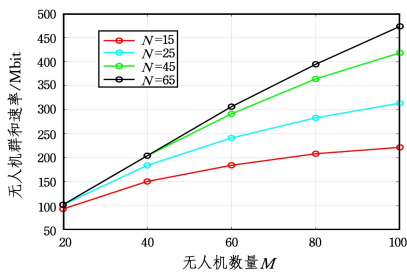


图6 无人机数量对所提算法的性能影响

Fig. 6 Influence of the number of UAVs on the performance of the proposed algorithm

如图7所示,所提算法以分布式的方式实现干扰环境下的无人机群协同用频决策,算法的收敛速度与无人机节点数量弱相关。因此,所提分布式算法对大规模无人机群具有较好的可拓展性。

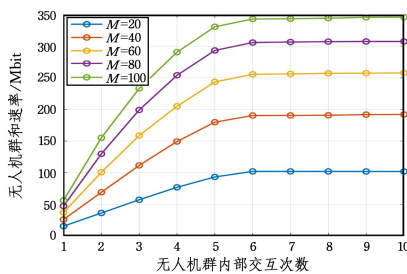


图7 所提算法的分布式收敛性能

Fig. 7 Distributed convergence performance of the proposed algorithm

结束语 本文研究了干扰威胁下的无人机群频谱决策问题,提出了基于联盟形成博弈的协同用频方法。在干扰环境中,无人机群动态调整频率协同策略,实现了高效的分布式协同频谱决策,以应对外部的恶意干扰威胁及无人机群内部同频互扰。借助势能博弈理论证明了所提抗干扰联盟形成博弈可以实现稳定的联盟分组,并可得到纳什均衡解。

参考文献

[1] NI Y, YANG H, JIANG B. Fault Tolerant Game Control of

Swarm Confrontation with Decision Faults[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 524978-524978.

- [2] WU Z B, YI J Q. Cooperative Communication Relay Selection Method for UAV Formation Support Networks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S2): 724319-724319.
- [3] ZHANG H W, DA X Y, HU H, et al. Energy-efficient Cooperative Optimization for Multi-UAV-aided Cognitive Radio Networks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 324548-324548.
- [4] WANG H, WANG J, DING G, et al. Robust Spectrum Sharing in Air-Ground Integrated Networks: Opportunities and Challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(3): 148-155.
- [5] FOTOUHI A, QIANG H, DING M, 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.
- [6] WU Q, MEI W, ZHANG R. Safeguarding Wireless Network with UAVs: A Physical Layer Security Perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 12-18.
- [7] WANG H, ZHANG X, JIANG J. UAV-involved Wireless Physical-layer Secure Communications: Overview and Research Directions[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 32-39.
- [8] SUN X, NG D W K, DING Z, et al. Physical Layer Security in UAV Systems: Challenges and Opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 40-47.
- [9] XU Y, REN G, CHEN J, et al. A One-leader Multi-follower Bayesian-Stackelberg Game for Anti-jamming Transmission in UAV Communication Networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 21697-21709.
- [10] LV S, XIAO L, HU Q, et al. Anti-jamming Power Control Game in Unmanned Aerial Vehicle Networks[C] // 2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017). 2017: 1-6.
- [11] ZHANG M J, ZHAO R, WANG P C, et al. Anti-jamming Algorithm with Reinforcement Learning in UAV-aided Internet of Things[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(1): 11-18.
- [12] SANJAB A, SAAD W, BAŞAR T. Prospect Theory for Enhanced Cyber-physical Security of Drone Delivery Systems: A Network Interdiction Game[C] // 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2017: 1-6.
- [13] XIAO L, LU X, XU D, et al. UAV Relay in VANETs Against Smart Jamming with Reinforcement Learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4087-4097.
- [14] WU Y, YANG W, GUAN X, et al. UAV-enabled Relay Communication Under Malicious Jamming: Joint Trajectory and Transmit Power Optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8): 8275-8279.
- [15] DUO B, WU Q, YUAN X, 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.
- [16] GAO Y, WU Y, CUI Z, et al. Robust Design for Turning and Climbing Angle-constrained UAV Communication Under Mali-

- cious Jamming[J]. *IEEE Communications Letters*,2021,25(2): 584-588.
- [17] LI Z,LU Y,LI X, et al. UAV Networks Against Multiple Manoeuvring Smart Jamming with Knowledge-based Reinforcement Learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 12289-12310.
- [18] WU Q,XU Y,WANG J, et al. Distributed Channel Selection in Time-varying Radio Environment;Interference Mitigation Game with Uncoupled Stochastic Learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,2013,62(9):4524-4538.
- [19] LI C L,YANG Z,LI J. Research on Group Multiuser Detection Coalition Models and Coalition Formation Algorithm[J]. *Chinese Journal of Electronics*,2010,38(10):2447-2452.
- [20] BOGOMOLNAIA A,JACKSON M O. The Stability of Hedonic Coalition Structures [J]. *Games Economic Behavior*, 2002, 38(2):201-230.
- [21] XU Y,WANG J,WU Q, et al. Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks;Global Optimization Using Local Interaction Games[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*,2012,6(2):180-194.
- [22] SAY S,INATA H,LIU J, et al. Priority-based Data Gathering Framework in UAV-assisted Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Sensors Journal*,2016,16(14):5785-5794.
- [23] CHEN J,WU Q,XU Y, et al. Joint Task Assignment and Spectrum Allocation in Heterogeneous UAV Communication Networks;A Coalition Formation Game-Theoretic Approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*,2021,20(1): 440-452.



QIU Wen-jing, born in 1982, postgraduate. Her main research interests include satellite communication, communication anti-jamming technology, and signal processing.



HAN Chen, born in 1993, Ph. D. His main research interests include communication anti-jamming technology and satellite communication.

(责任编辑:喻藜)