

# 基于联盟图博弈的地下空间无人机应急通信网络拓扑控制算法

王博文 孙彦景\*

(中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221008)

(徐州市智能安全与应急协同工程研究中心 徐州 221008)

**摘要:** 地下空间灾害事故对极端环境下应急通信网络快速重组与灾情信息实时回传提出了严峻挑战, 亟需构建具备按需动态重构、快速响应能力的无人机(UAV)应急通信网络。针对拓扑快变等动态不确定性造成的网络连通性频繁失效等问题, 该文利用图论对时变拓扑的关键信息提取简化后, 将联盟博弈(CG)引入时变拓扑图, 提出一种基于联盟图博弈的自适应拓扑控制算法(CGG-ATC), 通过协同决策建立远程传输链路(LLs)维护拓扑连通性。仿真结果表明, 与其他现有算法相比, 该算法能更好地实现拓扑连通性、平均传输时延与链路损耗3种性能之间的权衡优化。此外, 该算法具有较快的收敛速度, 能支持灾后动态不确定场景下组网决策随拓扑快变弹性适变。

**关键词:** 地下空间应急通信网络; 无人机组网; 拓扑控制; 图论; 博弈论

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)03-0996-10

DOI: 10.11999/JEIT211205

## Coalitional Graph Game Based Topology Control Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Emergency Networks in Underground Space

WANG Bowen SUN Yanjing

(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology,  
Xuzhou 221008, China)

(Xuzhou Engineering Research Center of Intelligent Industry Safety and Emergency Collaboration,  
Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Frequent disasters and accidents in underground space pose severe challenges to the rapid reconfiguration of emergency communication networks and the real-time transmission of disaster information in extreme environments. It is urgent to build the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) emergency communication networks with the capabilities of dynamic reconstruction and real-time response. For the problems of frequent failure of network connectivity caused by dynamic uncertainties such as rapidly changing topologies, after extracting and simplifying the key topology information using graph theory, the Coalitional Game (CG) is combined with time-varying topology graphs and the Coalitional Graph Game based Adaptive Topology Control (CGG-ATC) algorithm, which can maintain the connectivity through collaborative establishment of Long-range Links (LLs), is proposed. The simulation results shows that the proposed algorithm can achieve the better trade-off among connectivity, average transmission delay, and link cost compared with other existing algorithms. Besides, due to its fast convergence speed, the network decision is elastic and adaptive with the rapid topology changes when considering the dynamic uncertainties of post-disaster scenarios.

**Key words:** Emergency communication networks in underground space; Unmanned Aerial Vehicle(UAV) networking; Topology control; Graph theory; Game theory

收稿日期: 2021-11-02; 改回日期: 2022-02-16; 网络出版: 2022-02-28

\*通信作者: 孙彦景 yanjingsun\_cn@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(62101556, 62071472), 江苏省自然科学基金(BK20210489), 江苏省教育厅未来网络科研基金(FNSRFP-2021-YB-12), 中国矿业大学“工业物联网与应急协同”创新团队资助计划(2020ZY002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62101556, 62071472), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20210489), The Future Network Scientific Research Fund Project (FNSRFP-2021-YB-12), The Program for “Industrial IoT and Emergency Collaboration” Innovative Research Team in CUMT (2020ZY002)

## 1 引言

近年来,地下大型综合体、地铁、矿井等地下空间规模化开发利用造成了地下空间灾害事故频发。当塌陷、火灾、矿井冲击地压等地下空间灾害事故发生时,首要的任务就是实时获取灾情信息并建立临时通信网络,为后续的救援工作提供支撑。我国地下空间事故应急救援体系尚未建立健全,导致地下空间应急救援网络的研究工作相对滞后<sup>[1]</sup>。轻小型、高负载、高续航无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技术的突破,使得UAV在地下空间应急救援的应用成为可能。空天地一体化网络是6G的核心方向之一,现有关于6G潜在关键技术的预研工作中,明确将灾后应急救援作为6G空天地一体化网络的主要应用场景<sup>[2,3]</sup>。

UAV网络作为空天地一体化网络的重要组成部分,可在地下空间突发灾害事故应急救援的“探、搜、救”不同阶段发挥关键作用<sup>[4]</sup>。2018年,应急管理部发布《应急管理信息化发展战略规划框架》,要求整合UAV等空基网络资源,实现对地下空间等灾害事故易发、多发、频发区域全方位、立体化、无盲区的灾情监测与通信覆盖<sup>[5]</sup>。如图1所示,应急指挥中心在灾情探测阶段对灾情进行推演预判后,派遣全地形可移动的UAV集群深入地下空间对可疑目标点进行协同搜索,携带不同类型传感与通信设备的UAV终端共同形成UAV应急通信网络,为后续的灾害救援工作提供支撑。

与传统的地面自组织网络或智能化自主网络相

比,其相同之处在于地下空间无人机应急通信网络同样需要分布式自组织的决策能力作为实现地下空间无人机集群拓扑控制的基础;其不同之处在于地下空间的复杂不确定性与无人机节点的高速移动性需要地下空间无人机应急通信网络具备无人机群的群体智能与高效的信息交互能力,并通过更高效快速的群体决策以适应快变网络拓扑。文献<sup>[6]</sup>详细综述了UAV集群在矿井应急场景中的典型应用。文献<sup>[7]</sup>针对灾后应急场景UAV中继与空中基站两种典型应用中的路径规划与功率控制问题展开研究。上述文献忽略了UAV集群协同作业时的组网需求,考虑到地下空间灾害事故具有复杂继发、耦合叠加等特性,具备抗毁、容错性的网络架构是UAV集群智能与高效任务协同的关键。文献<sup>[8,9]</sup>详细分析了UAV自组网的网络特性与拓扑控制方法,当前有关UAV组网的相关文献主要针对低动态场景,研究以网络持续连通为目标的拓扑控制,较少考虑场景的动态不确定性。基于网络连通性的拓扑控制通过功率控制,节点移动控制等措施实现网络拓扑连通。拓扑功率控制即通过调整部分节点的传输功率构建远程传输链路(Long-range Links, LLS),从而获取更丰富的端到端路径;节点移动控制通过改变节点的移动轨迹进而改善网络节点间的相对位置,从而获取期望的连通特性<sup>[10]</sup>。地下空间灾后应急救援场景UAV节点移动性与搜救、覆盖任务紧密关联,因此本文主要通过功率控制实现网络持续连通性。文献<sup>[11]</sup>提出一种基于功率与轨迹联合控

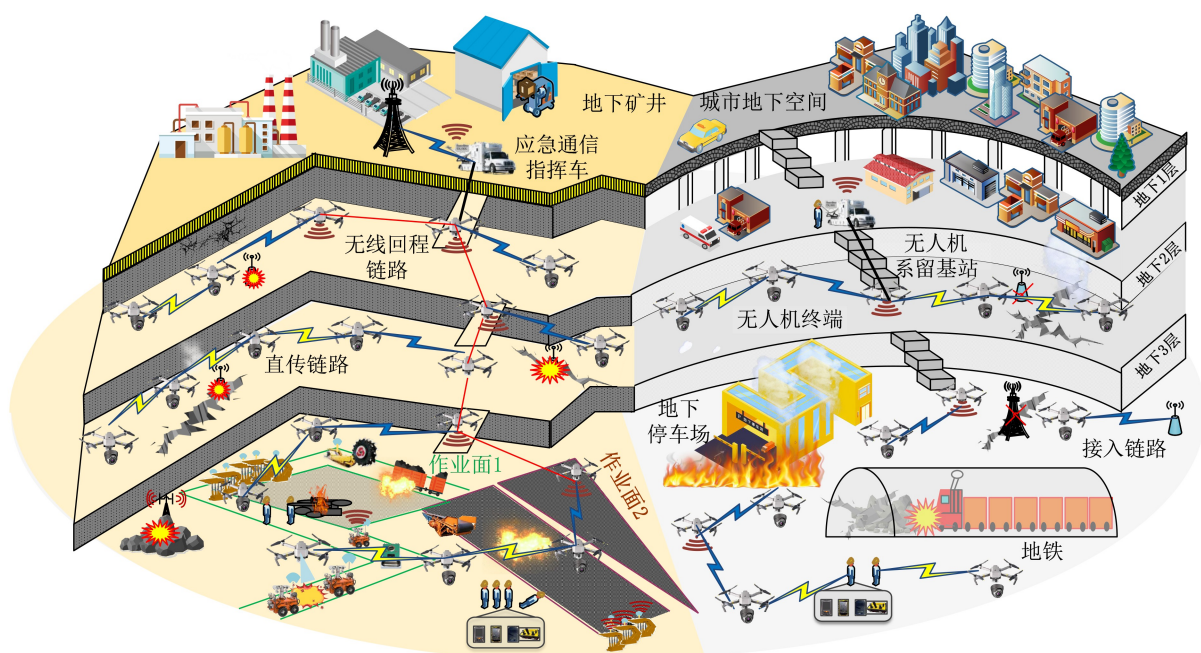


图1 地下空间灾后UAV应急通信网络

制的UAV集群自组网拓扑控制方法,但该方法仅能实现网络拓扑的单连通性,任意节点的离开均会造成连通性失效。考虑到地下空间应急场景UAV的易毁性,需要通过更高等级的连通性确保网络的容错抗毁性。

文献[12]利用块-割树(Block-Cut Tree, BCT)提取连通图中的关键信息,通过构建强化边实现最小代价的2-连通性。文献[13]利用Prim算法搜索BCT中的强化边,进而指导LLs构建的方向,实现UAV自组网拓扑图的2-连通性。然而,该方法没有考虑不同LLs对于网络连通性、链路损耗、端到端时延的差异化影响。在联盟博弈(Coalitional Game, CG)中,联盟内参与者之间的关联性会对联盟的总效用值产生重要影响[14]。其中,联盟图博弈(Coalitional Graph Game, CGG)将图论与联盟博弈结合,利用图中节点间的关联刻画效用独立关系,即联盟效用与参与者之间的连接方式有关[15]。因此,可将CG引入时变拓扑图,利用CGG对LLs构建进行问题建模,从而实现多种指标的权衡优化,保证网络连通性的同时,提升容错能力。文献[16]分别提出一种启发式LLs构建算法与基于转换操作的CGG算法,然而上述算法并没有考虑连通性的优化,且算法复杂度较高、决策时间较长,极易造成组网决策与快变拓扑不匹配,连通性频繁失效,不适用于拓扑结构随灾情演变快速变化的UAV应急通信网络。

地下空间灾后特殊的应用环境要求UAV应急通信网络减少端到端传输时延,保证稳定可靠的信息交互与灾情实时回传。地下空间无人机集群的拓扑结构同时受到搜救任务需求、组网决策与有限遮蔽空间结构的影响,如井下巷道狭长的带状空间中,无人机集群的飞行活动受限,网络拓扑结构呈“一”字形。此外,UAV集群在执行搜救任务时,地下空间灾害事故的高动态不确定性导致网络拓扑迅速变化,连通性频繁失效,UAV应急通信网络在满足机群间低时延通信需求的同时,还需通过保障网络的韧性(容错抗毁)与柔性(按需动态重构)维护网络的持续连通性,实现传输的连续性,亟需设计高效低复杂度的拓扑控制方法实现对拓扑变化的快速响应。为此,本文首先将UAV应急通信网络拓扑控制问题建模为CGG,然后通过BCT对时变拓扑图中的关键信息提取,用以指导CGG中决策空间的简化与连通性优化;最后提出一种分布式低复杂度的轮转互操作方法得到纳什稳定均衡(Nash-Stable Equilibrium, NSE)的联盟结构。仿真结果表明,与其他现有算法相比,所提算法能更好地实

现拓扑连通性、端到端平均传输时延与链路损耗3种性能之间的权衡优化,且具有较快的收敛速度,能够实现灾后动态不确定场景下组网决策与快变拓扑的适配。

## 2 系统模型与问题表述

如图1所示,初始时刻构建的地下空间UAV应急通信网络共有 $N$ 个UAV节点。随着搜救与覆盖任务的演进,由于电池容量的限制与高移动性,UAV频繁进退网,拓扑快速变化,本文将总任务执行时长划分为 $T$ 个等间隔时隙,即用 $\{1, 2, \dots, t, \dots, T\}$ 表示连续时隙集。假设 $t$ 时刻的节点数目为 $N(t)$ ,节点集合可表示为 $U(t) = \{u_i\}_{i=1}^{N(t)}$ 。不失一般性地,本文假设空对空(Air-to-Air, A2A)视距(Line-of-Sight, LoS)传输信道为自由空间路径损耗模型[17],则 $t$ 时刻节点 $u_i$ 与 $u_j$ 之间直传链路的信道增益可表示为

$$g_{i,j}(t) = \eta_0 d_{i,j}^{-\alpha}(t) \quad (1)$$

其中, $\eta_0$ 表示单位参考距离1 m下LoS信道的功率增益, $\alpha$ 表示路径损耗指数。为了保障每条链路都有专用的传输时隙,每个UAV以多信道时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)的方式实时回传。给定 $u_i$ 在 $t$ 时刻的发送功率 $P_i(t)$ ,接收端 $u_j$ 的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)可表示为

$$\gamma_{i,j}(t) = \frac{P_i(t)g_{i,j}(t)}{\sigma^2} \quad (2)$$

其中, $\sigma^2$ 为高斯白噪声的方差。基于式(2), $t$ 时刻节点 $u_i$ 与 $u_j$ 之间直传链路的传输速率可进一步表示为 $R_{i,j}(t) = b_{i,j}(t)\log_2(1 + \gamma_{i,j}(t))$ ,其中 $b_{i,j}(t)$ 为 $t$ 时刻 $u_i$ 与 $u_j$ 之间直传链路所分配的信道带宽。此外,为了保障A2A链路的成功传输,需满足 $\gamma_{i,j}(t) \geq \gamma_{th}$ ,则所需传输功率为

$$P_i(t) \geq \frac{\sigma^2 \gamma_{th} d_{i,j}^{\alpha}(t)}{\eta_0} \quad (3)$$

由式(3)可知发送功率与传输距离成正比,因此建立LLs会产生更多的功率消耗。假设初始时刻所有节点的功率均为最小发送功率 $P_{min}$ ,且装有全向天线,则一跳通信范围可表示为半径为 $r_i(t)$ 的球体,其中

$$r_i(t) \leq \left( \frac{P_{min} \eta_0}{\sigma^2 \gamma_{th}} \right)^{-\alpha} \quad (4)$$

如图2所示,将时变网络拓扑结构抽象为一组连续时隙的无向图 $(G_1, G_2, \dots, G_t, \dots, G_T)$ , $G_t = (V(t), E(t))$ 表示 $t$ 时刻的网络拓扑结构图,其中 $V(t)$ 表示点集合,即 $t$ 时刻的节点集合;当两个节点处于彼



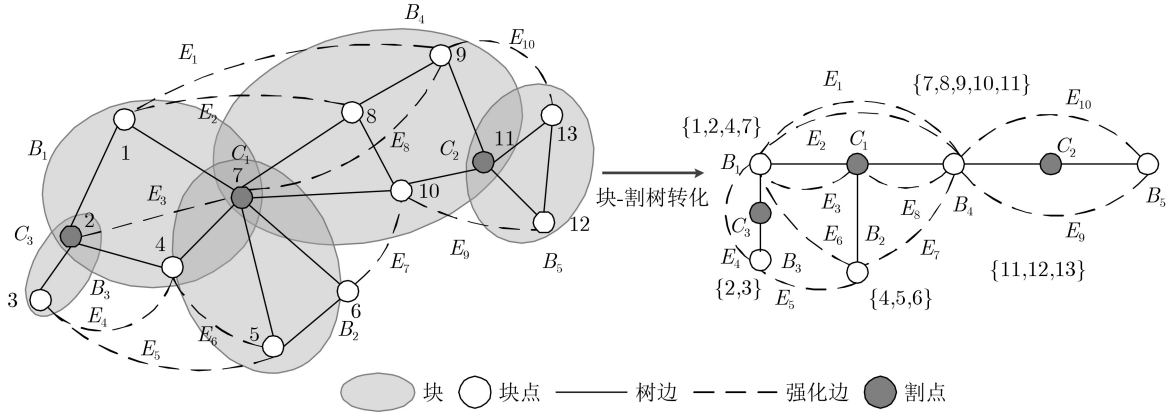


图2 时变网络拓扑图与BCT转化

此的一跳通信范围内，在两个节点之间添加一条无向边， $E(t)$ 表示传输链路集合。考虑到UAV通信范围的有限性，网络拓扑中任意两点大多通过多跳链路传输，造成了端到端时延难以保障。UAV应急通信网络需要把灾情信息汇聚至接近中心度(Closeness Centrality, CC)最高的节点 $u_D$ 后，由 $u_D$ 实时回传至地面应急指挥中心，则 $t$ 时刻整个网络的端到端平均传输时延可表示为

$$T_{ave}(t) = \frac{1}{N(t) - 1} \sum_{i \in V(t)} T_{i,D} \quad (5)$$

其中， $T_{i,D}$ 为节点 $u_i \sim u_D$ 的传输时延，给定传输数据包长 $F_i$ ，假设节点 $u_i$ 与 $u_D$ 之间的最短路为 $H_{i,D}$ ，则 $T_{i,D}$ 可表示为

$$T_{i,D} = \sum_{(j,k) \in H_{i,D}} \frac{F_i}{R_{j,k}(t)} \quad (6)$$

因此，可通过在距离较远的两节点之间构建LLs的方式建立直连通信，减少 $u_i \sim u_D$ 的跳数 $|H_{i,D}|$ ，进而缩短传输时延。在图论中， $k$ -连通图是指最少移除 $k$ 个节点后，连通性失效， $k$ 为图的连通度。移除后使单连通图失效的节点为关键节点，也称为割点。首先，为了确保式(6)成立，即任一节点 $u_i$ 与 $u_D$ 间均存在通路，需至少确保网络的单连通性，因此本文采用文献[17]中的集群移动模型，该模型既能模拟UAV集群的协同行为，又能保障两点间的距离在一跳通信范围内，进而保障网络的单连通性，避免出现孤立节点。复杂地形环境下的无人机航路规划问题中的避障飞行是核心难题，现有的工作大多将多个启发式算法的优势进行结合，采用鲸鱼算法等新型群体智能算法实现对优化问题更高效的求解。文献[18]提出一种改进鲸鱼优化算法，实现了两点之间的代价最优的避障飞行。通过对无人机节点与通信链路的图论建模，可用节点之间的连

通性刻画无人机的高速移动性，因此移动模型的选择仅影响拓扑连通性变化的频率。复杂环境下可将集群移动模型与鲸鱼优化算法结合，通过群体感知与信息交互实现集群避障。此外，移动模型的选择不影响算法性能且纵深较长的地下空间灾后应急场景，可通过合理设置飞行高度避障，因此本文主要研究无人机集群高速移动场景下的拓扑控制问题，重点关注拓扑连通性变化频率。

在单连通图中，割点UAV的移除与移动均会导致网络连通性失效。因此，LLs的建立有助于进一步提升网络的连通度，从而提升UAV应急通信网络的容错性与抗毁性，其中容错性与抗毁性表示多跳传输链路中单一中继节点失效时，可通过其他连通链路实现断点续传，实现传输连续性。考虑到连通度提升与远程链路能耗的权衡，本文拟设计满足基本的2-连通的LLs建立方案，即单一节点的失效不影响网络的连通性。为了实现拓扑的2-连通，需要添加强化边消除拓扑中的割点，可通过式(3)控制功率构建LLs来实现。

将图2所示的网络拓扑中的割点、块及消除割点的强化边进行标记，其中割点所关联的最大2-连通子图称为块，即在该连通子图中任一节点的移除不影响连通性且任一相邻节点的加入均造成该子图的2-连通失效。进而将左图中的整个块映射为右图中一个块点，将关联同一个割点和块点的边合并，并映射为树边，再将关联同一个割点和同一个块点的强化边合并(如 $E_1$ 与 $E_2$ 可合并为一条边)，可以将时变拓扑图的非关键信息简化，建立右图所示的BCT。基于BCT，可以判断每条LLs的构建对于拓扑连通性的贡献 $S_t(i, j)$ ， $S(i, j)$ 为强化边 $(i, j)$ 的建立所消除的割点数，如 $E_1$ 对于拓扑连通性的贡献为1， $E_3$ 的贡献为0。此外，强化边 $(i, j)$ 的建立往往伴随着功率的消耗，用 $C_t(i, j) = c \cdot P_i(t)$ 表示LLs的链路损耗，其中 $c$ 为单位功率下的损耗常数。

综上所述, 地下空间UAV应急通信网络中LLs构建的优化目标可表示为端到端平均传输时延、网络连通性与链路损耗的权衡优化

$$\min_x \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\omega_1 T_{\text{ave}}(t) + \sum_{i,j \in V(t)} x_{i,j,t} (\omega_2 C_t(i,j) - \omega_3 S_t(i,j))) \quad (7a)$$

$$\text{s.t. } x_{i,j,t} \in \{0, 1\}, \forall t \in T, u_i \in U, u_j \in U \quad (7b)$$

$$P_{\min} \leq P_i(t) \leq P_{\max}, \forall t \in T, u_i \in U \quad (7c)$$

优化目标式(7a)中 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 和 $\omega_3$ 为控制变量,  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ , 用于调节3项指标的优化比重; 限制条件式(7b)中 $x_{i,j,t}$ 为2元决策变量, 表示 $t$ 时刻 $u_i$ 与 $u_j$ 之间是否建立LLs, 如果建立, 则 $x_{i,j,t} = 1$ , 否则 $x_{i,j,t} = 0$ ; 限制条件式(7c)表示功率控制的范围。由式(7b)中的2元决策变量可知本文优化问题具有组合优化的特征, 因此是一个典型的NP-hard (Non-deterministic Polynomial hard)问题, 该问题的非凸性导致传统的优化方法难以高效求解。传统的集中式优化工具虽然能求得高质量的近似最优解, 但所需计算复杂度极高, 并不适用于拓扑快变的地下空间灾后应急场景, 极易造成耗费大量决策时间后得到的近似最优解与当前拓扑不匹配, 造成决策失效; 启发式算法利用限制条件在解空间内多次迭代搜索近似最优解, 虽然单次求解收敛速度较快, 但求解质量较低, 且在动态场景中仍然面临着时隙更新后从头重复计算带来的计算复杂度消耗, 效率大为降低。基于上述算法的优缺点, 本文将把优化问题式(7)建模为CGG, 然后通过BCT指导CGG中决策的指向, 简化决策空间, 最后提出一种轮转交换方法在时隙更新后以较快的速度收敛至NSE。

### 3 基于联盟图博弈的自适应拓扑控制算法设计

#### 3.1 CGG建模

传统的CG通过合并-拆分准则将用户集合分割为多个不相交的联盟, 解决用户分簇、资源分配等问题, 实现所有联盟效用函数的最优化。CGG将图论引入CG, 使得联盟效用与联盟内成员的连接方式相关, 即将同一条边相连的两点划分为同一联盟。因此, 可将LLs构建问题抽象为CGG, 即将在图 $G_t = (V(t), E(t))$ 上建立LLs的两点划分为同一联盟。基于上述分析, 可将该CGG表示为 $\mathcal{G}_t = (\mathcal{N}_t, \mathcal{X}_t, \mathcal{U}_t)$ , 其中 $\mathcal{N}_t$ 代表 $t$ 时刻的博弈参与者, 即UAV节点集合 $V(t)$ 。 $\mathcal{X}_t$ 为UAV节点的策略集合,

每个UAV节点的决策空间为当前时刻除自身外的其他UAV节点, 即通过2元决策变量选择与其他UAV节点建立LLs。定义每个UAV节点的决策为 $x_i(t) \in \mathcal{X}_i(t)$ , 其中 $\mathcal{X}_i(t) = \{1, 2, \dots, N(t)\}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的可行策略空间。 $x_i(t)$ 可由2元决策变量 $x_{i,j,t}$ 一一映射, 如 $x_{i,j,t} = 1$ 表示 $x_i(t) = j$ 。此外, 令 $x_{-i}(t) = (x_1(t), \dots, x_{i-1}(t), x_{i+1}(t), \dots, x_{N(t)}(t))$ 表示除 $x_i(t)$ 外其他节点的策略集集合。为了进一步简化决策空间, 本文通过BCT指导无连通性贡献节点的删减。如图2所示, 对于块点 $B_1$ 内的节点1, 可通过BCT首先排除与块内节点建立LLs, 再通过强化边的指向判断与该块内节点建立LLs是否有助于消除割点, 进而缩减每个节点的策略集合。

$\mathcal{U}_t$ 为UAV应急通信网络中所有节点的总效用, 考虑到无人机集群的协同性, 在本文所提模型中, 所有节点通过相互协作共同提升 $\mathcal{U}_t$ 。对于节点 $i$ , 其 $t$ 时刻的效用函数应与优化目标式(7)保持一致。值得注意的是, 本文的优化目标为最小化时延、损耗与连通性贡献度三者之间的权衡值, 而CGG的优化目标一般为效用的最大化, 因此效用函数可表示为

$$U_i(x_i(t), x_{-i}(t)) = \omega_1 \Delta T_{\text{ave}}(x_i(t)) + \omega_3 S_t(i, x_i(t)) - \omega_2 C_t(i, x_i(t)) \quad (8)$$

式(8)表示节点 $i$ 的效用函数是由 $i$ 与其他节点的策略共同作用而成的。为了符合CGG效用最大化的优化目标,  $\Delta T_{\text{ave}}(x_i(t))$ 表示LLs建立前后网络平均链路时延的差值;  $S_t(i, x_i(t))$ 表示 $i$ 与 $x_i(t)$ 建立LLs时割点减少的数目;  $C_t(i, x_i(t))$ 表示 $i$ 与 $x_i(t)$ 建立LLs时增加的链路损耗, 加负号表示最小化该项指标。因此, 该CGG的优化目标可进一步表示为

$$\max_{x_i(t) \in \mathcal{X}_i(t)} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \mathcal{N}_t} U_i(x_i(t), x_{-i}(t)) \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } x_i(t) \in \mathcal{X}_i(t), \forall t \in T, i \in \mathcal{N}_t \quad (9b)$$

$$P_{\min} \leq P_i(t) \leq P_{\max}, \forall t \in T, i \in \mathcal{N}_t \quad (9c)$$

#### 3.2 算法设计与性能分析

传统求解CGG的方法大多采用局部最优反应(Local Best Response, LBR)策略求得局部最优的纳什均衡解, 但该方法的收敛速度较慢且容易收敛至质量较差的局部最优解。文献[16]提出一种基于转换操作的联盟博弈算法(Coalition Game algorithm based on SWitch operation, CG-SW), 能够在有限的转换次数内得到质量较好的近似最优解。然而, 该算法的转换操作仅在两个联盟间进行, 忽略了多联盟互操作所带来的收敛速度与求解质量两方

面的提升。考虑到频谱资源的限制以及能量的有限性，假设 $t$ 时刻最多建立 $M(t)$ 条LLs，本文令 $M$ 为实现2-联通所需建立的最小强化边数。进一步地，定义联盟集合 $\Pi_t = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K)$ ，其中 $K_t = N(t) - M(t)$ 表示最终形成的联盟数目，其中由 $M(t)$ 个联盟内有两节点， $N(t) - 2 \cdot M(t)$ 个联盟内为单节点。

**定义1** 给定 $t$ 时刻联盟集合 $\Pi_t$ 与属于不同联盟的节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ ，且每个节点隶属于不同联盟，如果通过转换操作 $(v_1 \rightarrow \pi_{v_2}), (v_2 \rightarrow \pi_{v_3}), \dots, (v_{i-1} \rightarrow \pi_{v_i}), (v_i \rightarrow \pi_{v_1})$ 使得联盟划分策略从 $\Pi_t$ 转为 $\hat{\Pi}_t$ ，且满足 $U(\hat{\Pi}_t) > U(\Pi_t)$ ，则 $\{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ 构成轮转互操作联盟，其中 $U(\Pi_t)$ 表示所有联盟的总效用。

本文用 $(v_1 \rightarrow \pi_{v_2})$ 表示节点 $v_1$ 离开当前联盟 $\pi_{v_1}$ ，转而替换 $v_2$ 加入 $\pi_{v_2}$ ，即断开与 $\pi_{v_1}$ 中与另一节点建立的LLs转而替换 $v_2$ 与 $\pi_{v_2}$ 中的另一节点建立LLs，实现 $x_i(t)$ 的转换。考虑到单节点联盟与两节点联盟之间的互操作，可用 $v_1 \rightarrow \pi_{v_2}$ 且 $\emptyset \rightarrow \pi_{v_1}$ 表示 $v_1$ 加入联盟 $\pi_{v_2}$ 且不替换 $\pi_{v_2}$ 内的任何联盟成员。CGG通过联盟的划分得到满足NSE的联盟结构，NSE表示在当前的策略集合中不存在任一策略使得联盟总效用得到提升，结合上述轮转互操作联盟的定义，可将NSE进一步转换为如下定义。

**定义2** 联盟 $\Pi_t$ 为NSE联盟当且仅当联盟间不存在轮转互操作联盟。

进一步地，用 $v_1 \rightarrow v_2$ 表示 $v_1$ 替换 $v_2$ 加入 $\pi_{v_2}$ 且 $v_2$ 离开 $\pi_{v_2}$ ，用 $\Delta U(v_1 \rightarrow v_2)$ 表示该操作所引发的总效用值变化，则 $\Delta U(v_1 \rightarrow v_2)$ 可表示为

$$\Delta U(v_1 \rightarrow v_2) = U_2(\pi_{v_2} \setminus v_2 \cup v_1) - U_1(\pi_{v_1}) \quad (10)$$

根据上述分析与推导，轮转互操作联盟可进一步表示为 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots, v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_1$ ，进而可抽象为图论中的有向环<sup>[18]</sup>。在进行初始联盟划分后，当前联盟结构仍不稳定，大量联盟成员 $v_i$ 存在离开当前联盟转而加入其他联盟的意愿，因此可将 $v_i$ 替换 $v_j$ 加入 $\pi_{v_j}$ 的意愿 $v_i \rightarrow v_j$ 用一从 $v_i$ 指向 $v_j$ 的有向边表示，该有向边的权值 $w_{i,j}$ 设为 $\Delta U(v_1 \rightarrow v_2)$ ，进而建立有向图 $G_t^D = (V^D(t), E^D(t))$ 。

**引理1** 给定 $t$ 时刻联盟集合 $\Pi_t$ 与属于不同联盟的节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ ，一个轮转互操作联盟可用 $G_t^D$ 中边权值之和为正的有向环表示。

**证明：**基于式(10)可进一步得到

$$U(\hat{\Pi}_t) - U(\text{var}\Pi_t) = \sum_{k=1}^i \Delta U(v_k \rightarrow v_{k'}) \quad (11)$$

其中， $k' = (k \bmod i) + 1$ 。又因为 $w_{i,j} = \Delta U(v_1 \rightarrow v_2)$ ，因此 $U(\hat{\Pi}_t) - U(\Pi_t) = \sum w_{i,j}$ ，引理1得证。

**推论1** 如果 $G_t^D$ 中不存在边权值之和为正的有向环，当前联盟划分策略 $\Pi_t$ 为NSE联盟。

**证明：**根据引理1，在当前联盟结构中搜寻一个轮转互操作联盟 $\{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ 等价于在有向图 $G_t^D$ 中搜索有向环 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots, v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_1$ 。再根据定义2中关于NSE的满足条件可证明推论1。

通过以上转换，可将轮转互操作联盟的搜索问题转换为有向环搜索问题，通过不断搜寻并消除有向环，进而消除轮转互操作联盟，最终实现NSE。此外，由于联盟数固定，消除轮转互操作联盟所提升的性能有上界，如果每次搜寻具有最大权值的有向环，可进一步提升轮转互操作联盟消除的收敛速度。因此，本文首先将拓扑控制优化问题式(7)建模为CGG，进而通过引理1将CGG的优化问题式(9)进一步转换为最大权有向环搜索问题。该问题同样是NP-hard问题，现有的有向环搜索算法大多基于深度优先搜索(Depth First Search, DFS)或颜色编码方法，复杂度较高且精度较低<sup>[18]</sup>。为了避免遍历相同点或边多次，本文提出一种启发式算法，将DFS中回溯遍历的操作与图染色的思想融合，在只遍历每个点和边一次的情况下，寻找边权值近似最大环，其复杂度为 $\mathcal{O}(|V^D(t)| + |E^D(t)|)$ 。基于上述分析，最大权轮转互操作联盟搜索(Maximum Weight Rotation Switch coalition search, MWRS)算法与CGG-ATC算法分别总结在表1与表2。

**推论2** CGG-ATC算法能在有限次迭代后收敛至NSE。

**证明：**由于时变拓扑图 $G_t$ 与有向图 $G_t^D$ 的点集合与边集合均为有限集合，因此CGG的策略空间有限，又因为轮转互操作 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots, v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_1$ 的性能非减性且消除轮转互操作联盟所提升的性能有上界，因此CGG-ATC算法步骤2的迭代次数有上界。当算法收敛时，代表当前联盟策略 $\Pi_t$ 中不存在轮转互操作联盟，根据推论1可证当前联盟策略 $\Pi_t$ 为NSE联盟。此外，CGG-ATC算法通过BCT进一步简化了策略空间，因此具有较快的收敛速度。

CGG-ATC算法的计算复杂度由4部分组成：首先计算网络中任意两节点间的端到端平均传输时延时需要 $\mathcal{O}(N^3(t))$ 复杂度，上界为 $\mathcal{O}(N^3)$ ；构建BCT的复杂度为 $\mathcal{O}(N(t))$ ，上界为 $\mathcal{O}(N)$ ；构建有向图 $G_t^D$ 的复杂度为 $\mathcal{O}(|V^D(t, k)| + |E^D(t, k)|)$ ，BCT限制了有向边的数目，上界为 $\mathcal{O}(N)$ ；寻找最大环的复杂度为 $\mathcal{O}(|V^D(t)| + |E^D(t)|)$ ，其中 $k$ 表示第 $k$ 次迭代。假设步骤2迭代次数为 $\tau$ ，则步骤2复杂度为 $\mathcal{O}(\sum |V^D(t)| + |E^D(t)|)$ ，因此CGG-ATC算法的复杂度为 $\mathcal{O}(\tau N^3)$ 。在最差情况下每个环内只



表1 最大权轮转互操作联盟搜索(MWRS)算法

- 
- (1) **初始化:** 给定联盟结构 $\Pi_t$ , UAV节点通过信息交换建立 $G_t^D$ , 每架UAV用一个1 bit标签表示当前状态: 还未收到替换请求用白色表示, 已收到替换请求但未在环内用灰色表示, 已在环内用黑色表示, 初始化所有节点标签为白色。ch( $v_i$ )为 $v_i$ 的子节点集, 初始化 $C_{mw}$ 为空集记录当前最大权有向环。
  - (2) **while**  $\exists v_i \in G_t^D$  且  $v_i$  标签为白
  - (3)       调用函数 $\text{Traverse}(v_i)$ 遍历 $v_i$ 的子节点集,  $v_i$ 标签转换为灰色;
  - (4) **end while**
  - (5) **Return**  $C_{mw}$
  - (6)  $\text{Traverse}(v_i)$ :
  - (7)   **for**  $\forall v_j \in \text{ch}(v_i)$  执行
  - (8)    **If**  $v_j$ 为白色
  - (9)      $\text{Traverse}(v_j)$ ;
  - (10)    **else if**  $v_j$ 为灰色
  - (11)     找到环 $C$ ;
  - (12)       **If**  $C$ 权值之和大于 $C_{mw}$ 的权值之和, 环内没有节点在同一联盟内且环内任一边相连的
  - (13)         两个节点对之间交换次数不超过两次(避免乒乓球效应),  $C_{mw} = C$ ;
  - (14)       **end if**
  - (15)       **else**
  - (16)         结束本次循环;
  - (17)    **end if**
  - (18) **end for**
- 

表2 基于联盟图博弈的自适应拓扑控制(CGG-ATC)算法

- 
- (1)步骤1 进入下一时刻 $t$
  - (2)根据拓扑结构变化更新时变拓扑图 $G_t = (V(t), E(t))$ , 并转化为BCT确定最大联盟数 $K$ 并指导CGG重构与策略空间的简化, 通过信息交换更新效用函数值后, 根据当前不稳定的联盟结构 $\Pi_{t-1}$ 确定联盟转换意愿, 初始时刻 $\Pi_0$ 通过随机联盟划分确定;
  - (3)步骤2 轮转交换互操作
  - (4)根据联盟转换意愿建立 $G_t^D$ , 调用MWRS算法得到一个最大权轮转互操作联盟 $\{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ ;
  - (5)执行轮转互操作 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots, v_{i-1} \rightarrow v_i \rightarrow v_1$ 后得到当前联盟结构 $\Pi_t$ ;
  - (6)重复步骤2直到 $\Pi_t$ 中不存在轮转互操作联盟;
  - (7)输出NSE联盟策略 $\Pi_t$ 。
- 

有2条有向边且任意2节点最多交换两次, 则 $\tau$ 的上界为 $N(N-1)$ , 考虑到MWRS算法每次搜寻具有最大权值的有向环,  $\tau$ 的实际值远小于理论值, 将进一步通过仿真验证。

#### 4 仿真结果与性能分析

为了验证上述章节关于所提算法理论分析的可靠性, 本节通过数值仿真对所提算法的端到端平均时延、功率损耗、连通性以及收敛性进行综合评估。本文仿真场景设置为全长1000 m、宽200 m、埋深40 m的地下空间, 总任务时长为10000 s, 共划分为5000个持续时长为2 s的等间隔时隙。为了更好地模拟UAV节点执行任务的协同性并保障网络的连通性, 本文采用文献[17]中的集群移动模型, 且移动模型参数、能量模型参数与充电行为参

数的设置均与文献[17]保持一致。此外, 在通信模型中, 单位距离信道增益为 $\eta_0 = -60$  dB, 路径损耗系数为 $\alpha = 2$ , 噪声功率为 $-120$  dBm, 发送功率范围为 $20 \sim 30$  dBm, SNR阈值 $\gamma_{th}$ 设为 $30$  dB, 每条链路分配的信道带宽为 $5$  MHz, 包长大小的范围为 $1 \sim 10$  Mbit, 控制变量 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$ 。考虑到每时刻开始UAV节点的位置与进退网行为(离开当前网络到地面站充电或充电结束回到当前网络)的动态随机性, 本文采用蒙特卡罗仿真评估1000次仿真下算法的平均性能。

为了更好地验证所提算法的有效性, 本文将以下3种算法作为对照算法进行性能对比:

(1) 基于块-割树的局部拓扑功率控制算法(Localized topology Power Control Algorithm Based on block-cut tree, LPCBA)<sup>[13]</sup>: 该算法采用

贪婪算法的思想，基于图论中经典的Prim算法，通过多次迭代搜索BCT中损耗最小的强化边作为LLs，复杂度为 $\mathcal{O}(KN^4)$ ， $K$ 为拟构建LLs的数目。

(2)CG-SW<sup>[16]</sup>：该算法利用两联盟间的互换操作实现NSE，复杂度为 $\mathcal{O}(IN^3)$ ，其中 $I$ 为迭代次数。

(3)穷尽搜索算法(Exhaustive Search, ES)，分别得到各项性能的全局最优解(仅优化每项仿真所评估的性能)，获得性能上界，复杂度为 $\mathcal{O}(C_{|E|}^K)$ ，即在所有可能的强化边中选择 $K$ 条LLs的所有可能性。

图3—图6绘制了以上所提算法在1000次仿真下端到端平均时延、功率损耗、连通性以及收敛性场景中UAV节点数目变化的情况。其中在收敛性性能的评估时，由于ES算法复杂度极高，仅对比本文算法与LPCBA和CG-SW的收敛速度。

从图3结果来看，随着UAV数量的增加，网络规模逐渐扩大，可构建的LLs逐渐增多，CGG-ATC的联盟的结构也更加复杂。随着任意两节点之间跳数的增加，端到端平均时延逐渐上升，LLs的构建在一定程度上缓和了时延上升趋势。与两两联盟互换的CG-SW算法相比，本文所提CGG-ATC算法通过多联盟的互操作得到更高质量的近似最优解。

图4绘制了网络连通性随UAV数量变化的趋势，本文用当前网络中存在的平均割点数衡量该性能。由图4可知即使是可以得到全局最优解的ES算

法仍会存在一定数量的割点，这是因为UAV节点功率上界的限制导致部分LLs无法构建。由于CG-SW算法仅优化端到端平均时延与链路损耗，忽略了网络连通性的维护，导致容错性与抗毁性较差，可能会由于割点UAV的损坏导致当前网络拓扑传输连续性难以保障。

图5展示了链路损耗随UAV数量变化的趋势，本文用平均发送功率来评估该性能。随着UAV数量的增加，可构建的LLs逐渐增多，越来越多的UAV节点通过提升功率来构建LLs，但当网络规模增加到一定程度时，由于地下空间的区域限制，UAV节点活动范围有限，网络连通性逐渐增强，可构建的LLs数目逐渐减缓，最终出现平均发送功率的上升趋势减缓。该项仿真中，ES算法的优化目标为单一性能(连通性或时延，选用连通性)保障下的链路损耗最小化，LPCBA由于仅考虑链路损耗的最小化而忽略了时延的优化，可达到该项性能的近似最优。

图6进一步对比了本文算法与LPCBA和CG-SW的收敛速度，与LPCBA算法相比，CGG-ATC算法虽然迭代次数略高，单次迭代所需的时间复杂度远低于LPCBA算法；与CG-SW算法相比，虽然单次迭代所需的时间复杂度相近，但CGG-ATC通过最大权有向环搜索大大减少了迭代次数，能更好地适配快变拓扑。

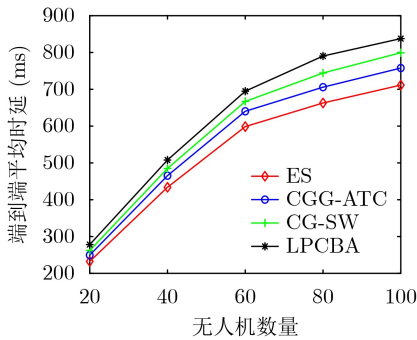


图3 端到端平均时延性能对比

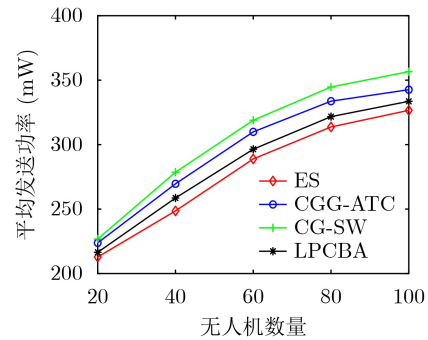


图5 链路损耗性能对比

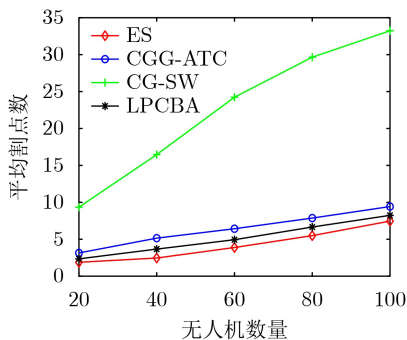


图4 网络拓扑连通性对比

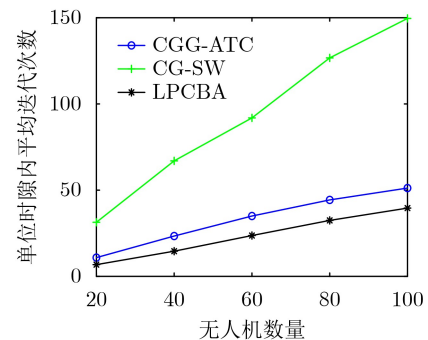


图6 收敛性能对比



综上所述,相较于全局最优的集中式ES算法,本文算法通过牺牲部分端到端平均时延、连通性与链路损耗性能实现了高动态场景的适用性;与启发式的LPCBA算法相比,本文算法在复杂度相近的情况下,通过少量连通性与链路损耗的牺牲提升了端到端平均时延;与传统的联盟图博弈算法CG-SW相比,本文算法实现了性能全面提升。

## 5 结束语

针对地下空间灾后应急场景,本文从图论简化、博弈论决策的角度,将图论与博弈论结合,把LLs构建问题转化为CGG;然后通过BCT简化博弈空间,将CGG的效用最大化问题进一步转化为图论中的最大权有向环搜索问题,并提出一种MWRS算法搜寻最大权轮转互操作联盟;最后提出一种高效低复杂度的CGG-ATC算法快速收敛至NSE联盟结构。仿真结果表明,与现有算法相比,本文所提CGG-ATC算法不仅能更好地实现端到端平均传输时延、拓扑连通性与链路损耗3种性能之间的权衡优化,且具有更快的收敛速度,能够实现高动态场景下的高效自适应拓扑控制。未来将进一步研究灾后极端环境下网络动态重构与确定性调度方法,为构建韧性可重构、柔性自适应的地下空间UAV应急通信网络提供理论基础和方法支撑。

## 参考文献

- [1] 胡青松,杨维,丁恩杰,等.煤矿应急救援通信技术的现状与趋势[J].通信学报,2019,40(5):163-179. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019123.  
HU Qingsong, YANG Wei, DING Enjie, et al. State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(5): 163-179. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019123.
- [2] YOU Xiaohu, WANG Chengxiang, HUANG Jie, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(1): 110301. doi: 10.1007/s11432-020-2955-6.
- [3] 徐常志,靳一,李立,等.面向6G的星地融合无线传输技术[J].电子与信息学报,2021,43(1):28-36. doi: 10.11999/JEIT200363.  
XU Changzhi, JIN Yi, LI Li, et al. Wireless transmission technology of satellite-terrestrial integration for 6G mobile communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(1): 28-36. doi: 10.11999/JEIT200363.
- [4] DEEPAK G C, LADAS A, SAMBO Y A, et al. An Overview of post-disaster emergency communication systems in the future networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(6): 132-139. doi: 10.1109/MWC.2019.1800467.
- [5] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部信息化发展战略规划框架(2018-2022年)[EB/OL]. [http://yjglt.jiangxi.gov.cn/art/2020/6/19/art\\_37823\\_1917424.html](http://yjglt.jiangxi.gov.cn/art/2020/6/19/art_37823_1917424.html), 2020.
- [6] PARK S and CHOI Y. Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: A review[J]. *Minerals*, 2020, 10(8): 663. doi: 10.3390/min10080663.
- [7] 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.
- [8] BEKMEZCI İ, SAHINGOZ O K, and TEMEL Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3): 1254-1270. doi: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004.
- [9] LAKEW D S, SA'AD U, DAO N N, et al. Routing in flying ad hoc networks: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 1071-1120. doi: 10.1109/COMST.2020.2982452.
- [10] AZIZ A A, SEKERCIOGLU Y A, FITZPATRICK P, et al. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 121-144. doi: 10.1109/SURV.2012.031612.00124.
- [11] QI Xiaohan, YUAN Peng, ZHANG Qinyu, et al. CDS-based topology control in FANETs via power and position optimization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(12): 2015-2019. doi: 10.1109/LWC.2020.3009666.
- [12] LJUBIĆ I and RAIDL G R. A memetic algorithm for minimum-cost vertex-biconnectivity augmentation of graphs[J]. *Journal of Heuristics*, 2003, 9(5): 401-427. doi: 10.1023/B:HEUR.0000004810.27436.30.
- [13] QI Xiaohan, JIN Haojie, ZHANG Qinyu, et al. A distributed bi-connectivity maintenance mechanism for flying ad hoc network Topology[C]. IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Changchun, China, 2019: 961-966. doi: 10.1109/ICCChina.2019.8855947.
- [14] SAAD W, HAN Zhu, DEBBAH M, et al. Coalitional game theory for communication networks[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(5): 77-97. doi: 10.1109/MSP.

- 2009.000000.
- [15] MYERSON R B. Graphs and cooperation in games[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1977, 2(3): 225–229. doi: [10.1287/moor.2.3.225](https://doi.org/10.1287/moor.2.3.225).
- [16] ZHAO Yulei, LI Yong, MAO Hongliang, *et al.* Social-community-aware long-range link establishment for multihop D2D communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 9372–9385. doi: [10.1109/TVT.2016.2516248](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2516248).
- [17] WANG Bowen, SUN Yanjing, DO-DUY T, *et al.* Adaptive D-hop connected dominating set in highly dynamic flying ad-hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021, 8(3): 2651–2664. doi: [10.1109/TNSE.2021.3103873](https://doi.org/10.1109/TNSE.2021.3103873).
- [18] 吴坤, 谭劭昌. 基于改进鲸鱼优化算法的无人机航路规划[J]. *航空学报*, 2020, 41(S2): 724286. doi: [10.7527/s1000-6893.2020.24286](https://doi.org/10.7527/s1000-6893.2020.24286).
- WU Kun and TAN Shaochang. Path planning of UAVs based on improved whale optimization algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S2): 724286. doi: [10.7527/s1000-6893.2020.24286](https://doi.org/10.7527/s1000-6893.2020.24286).
- 王博文: 男, 1994年生, 副教授, 研究方向为无人机应急通信网络、图论、博弈论、匹配理论.
- 孙彦景: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为工业物联网与应急协同.
- 责任编辑: 余蓉