

# 基于二跳共同邻居的无人机群体网络演化算法\*

于冲, 司帅宗, 赵海, 朱剑, 邵士亮, 刘佳良



(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

通讯作者: 司帅宗, E-mail: sishuaizong@neuera.com

**摘要:** 无人机集群在执行任务过程中所面临的干扰,对集群通信网络的可靠性提出了新的挑战.针对这一问题,提出了能够同时反映网络非均匀性与节点之间相似性的二跳共同邻居指标.基于该指标,使用链路预测研究方法,考虑网络初始化阶段与网络维护阶段,提出了 LPTCN 无人机集群网络演化算法.从数学分析与仿真实验两个方面对算法的有效性进行验证,结果显示,使用 LPTCN 网络演化算法所构建的无人机集群通信网络具有良好的生存性和抗毁性,在随机攻击和蓄意攻击情况下均能保证通信网络的可靠.

**关键词:** 无人机群体;二跳共同邻居;链路预测;网络演化

**中图分类号:** TP393

中文引用格式: 于冲,司帅宗,赵海,朱剑,邵士亮,刘佳良.基于二跳共同邻居的无人机群体网络演化算法.软件学报,2020,31(11):3559-3570. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5827.htm>

英文引用格式: Yu C, Si SZ, Zhao H, Zhu J, Shao SL, Liu JL. Network evolution algorithm of unmanned aerial vehicle flocking based on two-hop common neighbor. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2020,31(11):3559-3570 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5827.htm>

## Network Evolution Algorithm of Unmanned Aerial Vehicle Flocking Based on Two-hop Common Neighbor

YU Chong, SI Shuai-Zong, ZHAO Hai, ZHU Jian, SHAO Shi-Liang, LIU Jia-Liang

(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The disturbance facing by UAV (unmanned aerial vehicle) flocking in the process of carrying out tasks post a new challenge to the reliability of the flocking communication network. To this end, a two-hop common neighbor metric is proposed to reflect the heterogeneity of network and the similarity between nodes simultaneously. Considering network initialization stage and network maintenance stage, a LPTCN (link prediction based on two-hop common neighbors) network evolution algorithm is proposed. Mathematical analysis and simulation experiments are applied to verify the validity of the algorithm. The results show that UAV flocking communication network constructed by the LPTCN network evolution algorithm has great survivability and invulnerability, and the communication network reliability can be guaranteed in the case of random attack and deliberate attack.

**Key words:** unmanned aerial vehicle flocking; two-hop common neighbor; link prediction; network evolution

随着无人机领域研究的不断深入,无人机智能化与自主化程度得到持续提升,无人机的普及和应用越来越广泛.相较于传统的单体无人机,无人机集群通过群体合作与协同,在多变的环境中执行复杂的任务,同时具有良好的任务执行效率和经济效益<sup>[1]</sup>.其可以灵活地部署在人类无法到达的恶劣环境中,能够独立完成灾害探测、搜寻救援、情报搜集以及军事作战等工作<sup>[2,3]</sup>,并且在执行任务过程中无需人工参与,很大程度地提高了安全性.

无人机集群可以看作是一种特殊的智能群体,集群中的个体通过通信和行为控制来完成协同配合.集群控

\* 基金项目: 国家级重大科技创新项目(N161608001)

Foundation item: National Major Science and Technology Innovation Project (N161608001)

收稿时间: 2018-05-03; 修改时间: 2018-07-04, 2018-09-30, 2018-11-02; 采用时间: 2019-01-30

制的启发性原则最早是由 Reynolds 提出的<sup>[4]</sup>,该原则包括 3 部分内容:(1) 集群中心:始终试图与邻近的智能体保持较近的距离.(2) 冲突避让:避免与邻近智能体发生碰撞.(3) 速度匹配:邻近的智能体尝试进行速度匹配.这 3 项原则通常也称成为聚合、分离和对齐原则.在此原则的基础上,无人机集群需要面临的主要问题是组队与躲避障碍物.栅格法、神经网络方法和人工势场法是目前解决群体编组避障控制问题的主要办法<sup>[5-7]</sup>.

无人机集群中控制方法的有效实施离不开彼此之间的信息交换,而在实际应用中,无人机之间的无线通信存在诸多不确定因素的影响,例如无人机发射功率较低并且处理能力不足导致无人机的通信范围有限、无人机移动性导致无人机网络的间歇连接和动态拓扑,这些问题的存在,无疑给无人机网络的体系结构设计、协议与资源配置方案带来了挑战<sup>[8]</sup>.

为了解决上述问题,许多学者针对无人机的通信问题展开研究.文献[9]为了保障数据传输速率,同时延长无人机的生命周期,提出了一种节能高效协作中继方案.此外,无人机可以被看作是飞行的机器人,因此许多研究通过控制无人机的运动来达到优化网络性能的目的.在文献[10]中,fadlullah 等人提出了一种动态轨迹控制算法,旨在提升无人机网络的吞吐量和延时.文献[11]对无人机网络和 D2D 通信网络共存的情况进行建模,并使用随机几何学对无人机网络的覆盖概率和传输速率进行了推导.文献[12]在保证网络原有稀疏程度的条件下,提出了一种网络规则化方法,可以将随机连通网络转换为规则网络,以提升网络的鲁棒性.文献[13]对无人机网络的连通性进行了建模与分析,提出了一种基于无人机移动特性与通信信道特征的信任模型,推导得到网络的物理连通概率和安全连通概率.

尽管现有研究对无人机集群的实现与应用起到了极大的推动作用,但在目前对无人机集群网络的研究中,始终忽视了一个非常重要的问题.集群在执行任务过程中将面对诸多扰动,例如无人机功能失效、恶意攻击等等.这些扰动将会造成集群网络结构的变化,严重时甚至会破坏无人机通信网络的完整度,导致集群中的信息传输受阻.所以,构建面临扰动依然能够维持通信可靠的无人机网络,是一个值得研究的热点问题.文献[14]中指出,链路预测方法可以用于分析已知节点之间、已知节点与未知节点之间、已知节点与未来节点之间的连接概率.因此,本文致力于使用链路预测方法构建无人机群体通信网络,以解决群体工作过程中因节点失效而导致的网络不可靠问题.

本文的主要工作可以归纳为以下几点:(1) 提出二跳共同邻居指标;(2) 提出考虑网络初始化与网络维护的基于二跳共同邻居指标的链路预测(link prediction based on two-hop common neighbor,简称 LPTCN)网络演化算法;(3) 从理论证明与实验验证两个角度证实了 LPTCN 网络演化算法的有效性.

## 1 二跳共同邻居

文献[15]的研究结果表明,复杂网络在随机故障之下的抗毁性与网络的非均匀性正相关.文献[16]指出:节点间的相似性越强,节点间产生连边的概率越高,在相似性高的节点之间建立通信链路有助于提升网络性能.故而使用网络非均匀性与结构相似性能够描述复杂网络的性质.在本节中,我们提出了二跳共同邻居指标,期望这一指标能够同时刻画复杂网络非均匀性和结构相似性,为后续网络演化模型的构建提供基点.

### 1.1 二跳共同邻居定义

复杂网络中,节点的度值是反映网络非均匀性的指标之一.最大度值与最小度值的差值越大,意味着网络非均匀性越强;相反,非均匀性越弱.共同邻居数目则是最常用的描述节点之间相似性的指标,它表示两个节点通信范围重叠区域内存在的节点个数,反映了节点间在网络拓扑结构层面上的联系.考虑到上述两个指标各自的特性,我们将两者进行结合,提出二跳共同邻居指标.

**定义 1.** 无人机集群网络可以用图  $G(v, \varepsilon)$  进行描述,其中,  $v = \{1, 2, \dots, n\}$  代表集群中所有节点的集合,  $\varepsilon = \{(i, j)\}$  表示集群中所有通信连边的集合.对于任意节点  $x$ ,与它之间存在通信连边的所有节点构成集合  $E_x = \{z: (x, z) \in \varepsilon\}$ ,我们将  $E_x$  中所有节点与节点  $y$  的共同邻居数量总和称为节点  $x$  与节点  $y$  的二跳共同邻居.我们使用  $C_{N_{(x,y)}}$  表示节点  $x$  与节点  $y$  的二跳共同邻居数目,  $T_{C_{(x,y)}}$  表示节点  $x$  与节点  $y$  的二跳共同邻居数目.那么根据二跳共同邻居的定义,其数学表达为

$$T_{C_{-(x,y)}} = \sum_{z \in E_x, z \neq y} C_{N_{-(z,y)}} \quad (1)$$

值得注意的是,节点  $x$  与节点  $y$  度值具有不对称性,导致  $E_x$  并不等同于  $E_y$ ,因此  $T_{C_{-(x,y)}} \neq T_{C_{-(y,x)}}$ .通过公式(1)我们能够发现, $T_{C_{-(x,y)}}$ 与  $C_{N_{-(z,y)}}$ 成正相关关系, $C_{N_{-(z,y)}}$ 表示节点  $z$  与节点  $y$  的相似性,那么  $T_{C_{-(x,y)}}$ 则可表示为邻居集  $E_x$  与节点  $y$  的相似性.

假设有  $N$  个通信半径为  $R$  的节点随机散布在边长为  $L$  的三维空间中,并且节点  $z$  在节点  $y$  的通信范围内.定义节点  $z$  与节点  $y$  之间的期望距离为  $\bar{d}$ .由于节点是随机分布的,所以节点  $z$  在节点  $y$  通信范围内任何一个位置上的概率相同,因而期望距离  $\bar{d}$  与节点  $y$  的通信范围  $4\pi R^3/3$  满足如下关系:

$$\frac{4}{3}\pi\bar{d}^3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (2)$$

节点  $z$  与节点  $y$  的空间位置关系如图 1 所示.

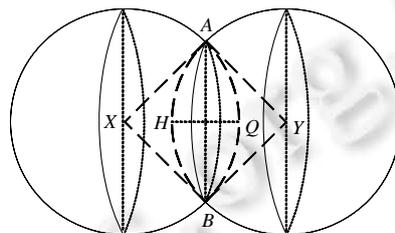


Fig.1 Spatial location relations of nodes

图 1 节点空间位置关系

通过图 1 可知,节点  $z$  与节点  $y$  的通信区域重叠范围为椭球体  $AHBQ$ .根据空间几何学知识,我们可以得到  $V_{AHBQ}=2(V_{XAQB}-V_{XAB})=2(V_{YAHB}-V_{YAB})$ ,由此,我们能够计算出两个节点之间的平均重叠范围为

$$\Omega = 2 \cdot 2/3(R - \bar{d}/2)\pi R^2 - 2/3\pi(R^2 - (\bar{d}/2)^2)\bar{d}/2 = 0.581\pi R^3 \quad (3)$$

由于空间中节点的密度为  $\rho=N/L^3$ ,则两个节点之间的平均共同邻居数可以表示为

$$C_{N\_average} = \Omega\rho = N\Omega/L^3 \quad (4)$$

$E_x, 1 \leq x \leq N$  中,节点个数的平均值可以用网络中节点的度值平均值  $\bar{k}$  表示.基于二跳共同邻居的基本定义,我们可以近似地将平均二跳共同邻居看作网络中节点的平均度值  $\bar{k}$  与平均共同邻居数  $C_{N\_average}$  的乘积,故有:

$$T_{C\_average} \approx \bar{k} \cdot C_{N\_average} = \bar{k} \cdot N\Omega/L^3 \quad (5)$$

许多复杂网络度分布规律符合  $P(k)=ck^{-\alpha}, \alpha \in (2,3)$ ,文献[17]推导出部分复杂网络中最大度值  $k_{max}$  与最小度值  $k_{min}$  的关系为  $k_{max} \approx k_{min} N^{\frac{1}{\alpha-1}}$ ,文献[18]计算得到微分方程常数项  $c$  与最小度  $k_{min}$  的关系为  $c \approx (\alpha-1)k_{min}^{\alpha-1}$ .根据上述信息,我们能够推导出:

$$\begin{aligned} T_{C\_average} &= \bar{k} \cdot N\Omega/L^3 = N\Omega/L^3 \int_{k_{min}}^{k_{max}} kP(k)dk \\ &= N\Omega/L^3 \int_{k_{min}}^{k_{max}} ck^{1-\alpha}dk \\ &= N\Omega/L^3 \frac{c}{2-\alpha} (k_{max}^{2-\alpha} - k_{min}^{2-\alpha}) \\ &= N\Omega/L^3 \frac{\alpha-1}{2-\alpha} k_{min} \left( N^{\frac{2-\alpha}{\alpha-1}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

### 1.2 二跳共同邻居指标分析

在节点总数为 100、节点分布区域边长为 1000m、通信半径为 500m、最小度值为 1 的条件下,描绘平均二跳共同邻居与度分布指数  $\alpha$  的关系图,其结果如图 2 所示.

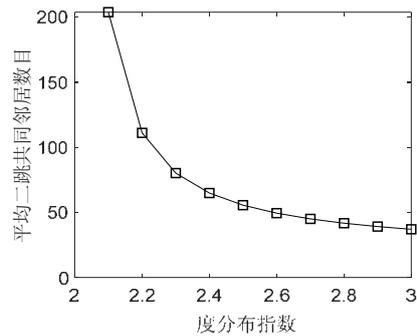


Fig.2 Average two-hop common neighbor varies with degree distribution exponents

图2 平均二跳共同邻居随度分布指数变化

现有的研究显示,最大度值  $k_{\max}$  与最小度值  $k_{\min}$  的差值能够体现网络的差异性.在最小度值  $m$  一定的情况下,可以直接用最大度值  $k_{\max}$  与度分布指数  $\alpha$  的关系表示网络的非均匀性.度分布指数  $\alpha$  的上升导致最大度的下降,这意味着网络的非均匀性在降低.通过观察图 2 我们可以发现,度分布指数  $\alpha$  与平均二跳共同邻居数目呈负相关关系.即在  $\alpha$  不断增大的过程中,平均二跳共同邻居数目逐渐下降.由此我们可以得出结论:随着度分布指数  $\alpha$  的变化,平均二跳共同邻居与最大度值表现出相同的变化趋势.因此,我们可以将平均二跳共同邻居作为一项衡量复杂网络非均匀性的指标,平均二跳共同邻居越多,表示网络的非均匀性越强.

图 3 描述了在相同实验场景下,网络中 1 号节点与 1 号~30 号节点之间的共同邻居数和二跳共同邻居数的对比图.

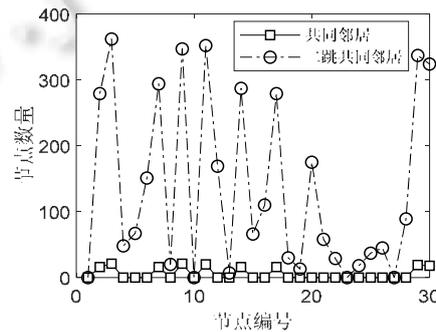


Fig.3 Comparison of common neighbors and two-hop common neighbors

图3 共同邻居与二跳共同邻居指标对比

通过图 3 我们可以看出,当我们在统计节点间共同邻居的时候,时常会出现多个节点对之间存在的共同邻居数目相同的情况.此时,我们只能认为它们的相似度一致.然而当多个节点对拥有相同的共同邻居数目时,它们拥有的二跳共同邻居数目却不尽相同.这是因为相较于共同邻居指标,二跳共同邻居指标考虑了节点的连接状态,这意味着节点连接状态的差异性会在二跳共同邻居指标中有所体现.由此可得:尽管共同邻居和二跳共同邻居均能够刻画节点之间的相似性,显然二跳共同邻居对网络相似性的描述更深刻、准确,对网络拓扑结构的反映更加完整,能够提供更多的信息量.

通过上述两个实验我们可以得出结论:相较于度值和共同邻居指标,二跳共同邻居在体现网络特性方面更加全面.它除了反映网络的非均匀性以外,兼顾展现网络中节点间的相似性.

## 2 无人机协同网络演化算法

无人机群体在实现编组、避障、进行群体作战的过程中,需要进行频繁的信息交换.由于无人机群体应用的特殊性,在其工作中不断面临敌方的干扰与攻击,部分无人机会因此失效而脱离群体.所以,时刻保障无人机群体通信网络结构的可靠,是我们研究的重中之重.链路预测的思想是,利用网络中已知的节点属性或者网络拓扑结构信息来预测网络中尚未产生连接的两个节点间产生连接的可能性<sup>[19]</sup>,这为无人机群体协同的路由路径选择问题提供了新的解决思路.因此,我们提出一种基于链路预测方法的无人机群体网络演化模型,为无人机群体的协同控制提供有效的通信保障.

### 2.1 网络布局

本文假设无人机同构,每一架无人机被赋予唯一的编号作为标示.定义无人机节点的通信半径为  $R$ ,如果两个无人机节点间的距离小于等于  $R$ ,则两者可以直接进行通信;否则,两者需要通过多跳传输进行通信.使用  $p_i$  表示无人机  $i$  所处的位置,那么无人机节点  $i$  的空间邻居集可以表示为  $n_i = \{j: \|p_i - p_j\| \leq R\}$ . 存在于  $n_i$  中的节点具备与节点  $i$  建立连接的基本条件.由于无人机群体的应用遍布了各个领域,为了拓展模型的可用性,我们设计无人机节点随机分布在三维立体空间中,区域的边长为  $L$ ,节点总数为  $N$ .

无人机群体的工作模式分为集中式和自组织式两种.工作在集中式模式下的无人机群体拥有一个控制中心,该控制中心通常由处于集群核心位置上的无人机担任.在执行任务的过程中,所有无人机将采集获取的信息上传至控制中心,控制中心对所有数据进行聚融、分析并做出决策,对集群进行统一调度调配.与集中式模式最大的区别是,工作在自组织式模式下的集群并不需要控制中心.对于无人机个体而言,它只需要时刻与它邻近的无人机进行信息交换与协同控制,以保证集群在局部上的收敛,进而保障整个集群的稳定.由于集中式集群工作模式中存在控制中心,当控制中心失效以后,整个集群处于瘫痪状态,这将给通信网络的可靠带来很大的危害.因此,我们设定本文中的无人机集群工作在自组织式工作模式下.

本文所提出的无人机群体通信网络的 LPTCN 演化算法包含网络初始化与网络维护两个部分.下面我们将针对这两个部分分别进行介绍.

### 2.2 网络初始化

我们使用图论来描述网络的演化过程,首先定义  $\hat{G}(\hat{v}, \hat{\varepsilon})$  表示初始网络,在网络演化伊始,我们从无人机节点集合  $v$  中随机选取  $m_0$  个节点构成集合  $\hat{v}$ ,作为网络初始节点,并在此  $m_0$  个节点之间随机产生  $n_0$  条连边构成集合  $\hat{\varepsilon}$ ,作为网络的初始连接.对于任意属于集合  $\hat{v}$  的节点  $i$  来说,其邻居节点集合可以表示为

$$N_i = \{j \in \hat{v} : \|p_i - p_j\| \leq R\}.$$

在网络演化过程中,  $\hat{v}, \hat{\varepsilon}$  中不断有新的元素加入,直至网络初始化结束.演化过程中,节点的加入与连边的选择可以描述为以下两个步骤:

- (1) 网络扩充:随机生成初始网络  $\hat{G}(\hat{v}, \hat{\varepsilon})$  之后,每次从  $\{i: i \in v \cap i \notin \hat{v}\}$  中随机选取一个节点  $x$ ,添加到集合  $\hat{v}$  中.
- (2) 选择连接概率:新加入的节点  $x$  与  $\hat{v}$  中现有节点形成  $m$  条新的连边,连接概率与节点之间的二跳共同邻居数目成正比.

$$P_{x,y} = \frac{T_{C_{(y,x)}}}{\sum_{z \in N_x} T_{C_{(z,x)}}} \quad (7)$$

我们之所以选择二跳共同邻居作为衡量节点连接概率的依据,是因为二跳共同邻居数目越多意味着两个节点的相似性越高,两者之间产生连接的可能性也就越大,同时也表示该节点能够为新加入节点提供更强的保护力.新加入的节点选择相似度高、保护能力强的节点进行连接,有利于提升网络整体的可靠性与稳定性.

### 2.3 网络维护

通信网络的初步形成并不意味着我们的工作就到此结束,在执行任务的过程中,通信网络结构会发生变化

甚至受到破坏.图4描述了无人机失效时,通信网络的变化情况.原始状态下,3架无人机之间存在3条通信链路,当其中一架无人机失效时,所有与此无人机相关的通信链路将不复存在.此时,通信网络的完整性受到了破坏.因此,我们要采取适当的手段对网络进行维护和修复,进而保持集群通信网络结构的完整与可靠.

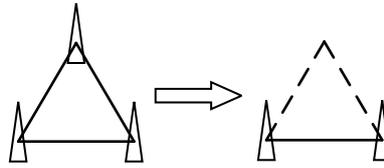


Fig.4 Change of net topology

图4 网络拓扑变化

存在以下3种场景会造成通信网络拓扑结构的变化.

- (1) 无人机个体加入或脱离集群.根据任务的难易程度、执行的进度等情况,集群会选择增加或者减少无人机的数量,在保证完成任务的同时降低成本.
- (2) 无人机节点发生故障.无人机在运行过程中,零部件的损坏以及能源燃料不足等问题,都会造成无人机无法正常运转.
- (3) 无人机受到攻击.在执行军事战斗、情报侦察等特殊任务的情况下,无人机会受到来自于敌方军事系统的干扰或攻击,这将导致无人机彻底丧失进攻与收集信息能力.

由于场景(2)、场景(3)这两种情况对网络的影响更为明显,所以本文着重关注这两种情况下通信网络的修复问题.

定义  $v' = \{j : (i, j) \in \hat{\varepsilon}\}$  表示与节点  $i$  存在通信连接的全部节点所构成的集合.假设在某一时刻无人机  $i$  失效,从集合  $\hat{v}$  中删除节点  $i$ ,同时,集合  $\hat{\varepsilon}$  中所有包含节点  $i$  的连边被删除,此后,  $v'$  中的节点将被赋予新的连边.依次遍历集合  $v'$  中的节点执行网络修复算法,  $g$  表示当前遍历的节点,受到节点通信能力的限制,只有在节点  $m$  通信范围内的节点可以作为建立连接的候选节点,候选节点的集合可以表示为  $C_g = \{h \in \hat{v} : \|p_g - p_h\| \leq R \cap (g, h) \notin \hat{\varepsilon}\}$ , 候选节点与节点  $g$  的连接概率表示为

$$P_{rep}(g, h) = \frac{T_{C_{-(h, g)}}}{\sum_{u \in C_g} T_{C_{-(u, g)}}} \quad (8)$$

比较所有候选节点的连接概率,选取连接概率最大的候选节点与节点  $g$  建立连接.整个网络演化算法伪代码如下算法1.

**算法1.** 网络演化算法.

initialize:  $v$  and  $\hat{G}(\hat{v}, \hat{\varepsilon})$

**while** ( $\hat{v} \neq v$ )

    picks a random  $x \in v$  and  $x \notin \hat{v}$

**for each**  $y \in \hat{v}$

**if** ( $(y, z : z \in \hat{v}) \in \hat{\varepsilon}$ )

$N_y$  add  $z$

            calculate  $T_{C_{-(y, x)}} = \sum_{z \in N_y, z \neq x} C_{N_{-(z, x)}}$

        find max  $T_{C_{-(y, x)}}$

$x$  join  $\hat{v}$ ,  $(x, y)$  join  $\hat{\varepsilon}$

**if remove**  $i$

$v' = \{j : (i, j) \in \hat{\varepsilon}\}$ ,  $\hat{v}$  delete  $i$ ,  $\hat{\varepsilon}$  delete  $(i, j)$

**for each**  $g \in v'$

$$C_g = \{h \in \hat{v} : \|p_g - p_h\| \leq R \cap (g, h) \notin \hat{\varepsilon}\}$$

calculate  $P_{rep}(g, h) = T_{C_{-(h,g)}} / \sum_{u \in C_g} T_{C_{-(u,g)}}$

find max  $P_{rep}(g, h)$   
 $(g, h)$  join  $\hat{\varepsilon}$

### 3 网络可靠性的数学证明

根据本文所提出的网络演化模型我们可以知道:对于任意一个集合  $\hat{v}$  中的节点  $y$  来说,导致其度值变化的原因主要分为 3 个方面.

- (1) 新加入的节点  $x$  以一定的概率选择与节点  $y$  建立连接.由于节点均匀的分布在边长  $L$  的立体空间中,所以新加入的节点  $x$  在节点  $y$  通信范围内的概率为  $V/L^3$ ,  $V=4\pi R^3/3$  表示节点的通信范围.除此以外,新加入的节点  $x$  将与  $\hat{v}$  中的  $m$  个节点形成连边,故  $\hat{v}$  中所有节点与节点  $x$  产生连接的概率将扩大  $m$  倍,从而我们能够得到节点  $x$  与节点  $y$  产生连接的可能性为  $mP_{x,y}V/L^3$ .
- (2) 由于节点故障失效等原因,会出现节点  $y$  自身连边丢失的情况,导致其度值发生变化.节点  $y$  在执行任务的工作中可能出现节点故障等状况,此时,与之相关的连接将全部断开,假设节点发生故障的概率为  $\rho$ ,那么由节点故障导致的度值减少量可以表示为  $\rho k_y$ .
- (3) 节点  $y$  的邻居节点中,有节点需要重新建立连边,节点  $y$  作为候选节点有一定概率被选中进行连边重建.节点通信范围内所有节点的度值总和为  $\sum_{w \in N_y} k_w$ ,由于节点  $y$  自身发生故障属于第(2)种情况,因此我们需要从  $\sum_{w \in N_y} k_w$  中将  $k_y$  去除.用  $p_{dis}$  表示节点之间不存在连边的概率,那么节点  $y$  作为连边重建的候选节点的概率可以表示为  $\rho \cdot p_{dis} \left( \sum_{w \in N_y} k_w - k_y \right)$ .在此基础上,得到节点  $y$  被选中进行连边重建的概率为  $\rho \cdot p_{dis} \left( \sum_{w \in N_y} k_w - k_y \right) P_{rep}(w, y)$ .

根据文献[20],我们假设节点的度值变化是连续的,则无人机节点  $y$  的度值变化率可以表示为

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} = m \frac{V}{L^3} \frac{T_{C_{-(y,x)}}}{\sum_{z \in N_x} T_{C_{-(z,x)}}} - \rho k_y + \rho \cdot p_{dis} \left( \sum_{w \in N_y} k_w - k_y \right) \frac{T_{C_{-(y,w)}}}{\sum_{s \in C_w} T_{C_{-(s,w)}}} \quad (9)$$

由于每单位时间集合  $\hat{v}$  中新增一个节点,所以  $t$  时刻  $\hat{v}$  中的节点总数为  $(m_0+t)$ .如第 1.1 节中所述,两个节点之间的平均重叠范围为  $\Omega$ ,以此推断,新加入的节点  $x$  与候选节点  $y$  的平均共同邻居数为  $(m_0+t)\Omega/L^3$ .节点  $y$  的度值  $k_y$  代表  $E_y$  中的节点总数为  $k_y$ ,那么节点  $x$  与节点  $y$  的平均二跳共同邻居数可以表示为

$$\bar{T}_{C_{-(y,x)}} \approx \sum_{z \in E_x, z \neq y} \bar{C}_{N_{-(z,y)}} = k_y (m_0 + t) \Omega / L^3 \quad (10)$$

初始时刻,网络中存在  $m_0$  个节点,每个新加入的节点需要与网络中现有节点建立  $m$  条连边. $t$  时刻,网络中存在的连边总数与度值总数分别为  $mt$  和  $2mt$ ,此时,网络中节点度值的平均值可以表示为  $2mt/(m_0+t)$ .随着  $t$  的不断增大,初始节点数  $m_0$  对平均度值的影响作用越来越小,因此我们将平均度值近似为  $\bar{k} = 2m$ ,则集合  $\hat{v}$  中任意节点与新加入节点  $x$  之间存在的平均二跳共同邻居数量为  $\bar{k}(m_0+t)\Omega/L^3$ .对于网络中的任意节点,其候选节点集合中的节点总数为  $W=(m_0+t)V/L^3$ ,故有:

$$\sum_{z \in N_x} T_{C_{-(z,x)}} \approx W \bar{k} (m_0 + t) \Omega / L^3 = \bar{k} (m_0 + t)^2 \frac{V \Omega}{L^6} \quad (11)$$

$\sum_{w \in N_y} k_w$  表示节点  $y$  通信范围内所有节点的度值总和,其数值可以由节点  $y$  通信范围内的节点个数与节点平均度值的乘积表示,即

$$\sum_{w \in N_y} k_w = W \bar{k} = \frac{2m(m_0 + t)V}{L^3} \quad (12)$$

通过上述推导我们可知:节点  $w$  通信范围内存在的节点个数为  $W$ ,并且节点  $w$  的平均度值为  $2m$ ,则节点  $w$

通信范围内的节点与其存在连边的概率  $2m/W$ ,那么节点  $w$  通信范围内的节点与节点  $w$  尚未产生连接的可能性为  $p_{dis}=1-2m/W$ .  $C_w$  表示在节点  $w$  通信范围内尚未与节点  $w$  产生连边的节点集合,  $C_w$  中节点总数可以表示为  $p_{dis}W$ .根据上述推导可得:

$$\sum_{s \in C_w} T_{C_{(s,w)}} \approx p_{dis} W \bar{k}(m_0+t) \Omega / L^3 = 2m(m_0+t)^2 \frac{V\Omega}{L^6} - 4m^2(m_0+t) \Omega / L^3 \quad (13)$$

将公式(10)~公式(13)带入公式(9)中整理,得:

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} = \frac{k_y}{2(m_0+t)} - \frac{\rho L^3 k_y^2}{2m(m_0+t)V} = \frac{mV k_y - \rho L^3 k_y^2}{2m(m_0+t)V} \quad (14)$$

公式(14)等价于

$$\frac{1}{mV k_y - \rho L^3 k_y^2} \partial k_y = \frac{1}{2m(m_0+t)V} \partial t \quad (15)$$

为了简化计算,我们令  $a=mV, b=\rho L^3, c=2mV$ .对公式(15)两边做积分处理,得到:

$$-\frac{1}{a} \ln \left| \frac{a - b k_y}{k_y} \right| = \frac{1}{c} \ln(m_0+t) + C \quad (16)$$

假设节点  $k_y$  在  $t_y$  时刻加入网络,则节点  $k_y$  在  $t_y$  时刻的度值为  $m$ ,即

$$k_y(t_y) = m \quad (17)$$

将此初始状态带入公式(16)中,得到常量项  $C$  为

$$C = \ln \left( \frac{\left| \frac{a - b m}{m} \right|^{\frac{1}{a}}}{(m_0+t_y)^{\frac{1}{c}}} \right) \quad (18)$$

最终,我们得到的度值表达式为

$$k_y = \frac{a}{b - \left( \frac{m_0+t_y}{m_0+t} \right)^{\frac{a}{c}} \left( b - \frac{a}{m} \right)} \quad (19)$$

我们假设连接度  $k_y$  小于某定值  $k$ ,则可以推导出:

$$t_y < \left( \frac{(bk-a)m}{(bm-a)k} \right)^{\frac{c}{a}} (m_0+t) - m_0 \quad (20)$$

由于每次从候选集中随机选取一个节点加入集合  $\hat{v}$  中,则  $t_y$  值的概率密度函数为

$$P_y(t_y) = \frac{1}{m_0+t} \quad (21)$$

联立公式(19)、公式(20)能够得到:

$$P(k_y < k) = \left( \frac{(bk-a)m}{(bm-a)k} \right)^{\frac{c}{a}} - \frac{m_0}{(m_0+t)} \quad (22)$$

所以,  $P(k)$  为

$$P(k) = \frac{\partial P(k_y < k)}{\partial k} = c \left( b - \frac{a}{m} \right)^{-\frac{c}{a}} \left( b - \frac{a}{k} \right)^{\frac{c}{a}-1} k^{-2} \quad (23)$$

公式(23)是我们得到的网络中节点的度值分布,在度值分布的推导过程中,我们考虑网络初始化、网络修复两个阶段.通过结果我们能够发现,节点的度分布满足幂率分布规律.这说明所形成的网络具有无标度网络特征.与此同时,节点失效并未对节点度值的幂率分布规律造成破坏,证明无论是在正常工作状态还是存在节点失

效状态下,网络始终能够保证良好的鲁棒性.

#### 4 网络可靠性的实验评估

本文主要致力于构建可靠有效的通信网络,为无人机的协同控制提供支持.生存性与抗毁性是衡量网络是否可靠的两项重要指标,因此本文选取这两项指标评估所构建网络的性能.在仿真实验中,我们采用 BA 算法、DFRRG 算法以及考虑一跳共同邻居指标的链路预测算法(link prediction based on common neighbor,简称 LPCN)作为对比算法来验证 LPTCN 算法的有效性.基本的仿真参数设置为:分布区域边长  $L=1000\text{m}$ ,无人机通信半径  $R=500\text{m}$ ,无人机个数  $N=100$ ,无人机速度随机分布在  $[5\text{m/s}, 10\text{m/s}]$  内.

##### 4.1 网络生存性

网络生存性描述了在随机破坏作用下,网络抵抗破坏所带来负面影响的能力<sup>[21]</sup>.无人机集群在执行巡逻、情报采集等任务的过程中,经常受到天气状况、设备性能等因素的影响,机械故障时有发生.当网络中部分无人机失效时,保证网络中有效节点的协作,是我们研究的重点,这必须依赖于无人机间可靠的通信网络.为了评估无人机集群网络的生存性,我们进行多次重复实验,在随机删除部分节点的情况下,统计网络的最大连通集群比例以及平均最短路径比.

图 5(a)、图 5(b)分别表示网络最大连通集群比例、平均最短路径长度比例随失效节点数目的变化情况.通过观察我们能够发现,当失效节点比例小于 0.3 时,DFRRG 算法网络的最大连通集群比例超过 60%,此时网络中大部分节点对处于连通状态,但是平均最短路径长度却始终大于 1,说明网络的可靠性相较于起始状态明显变差;当失效节点比例达到 0.3 以上时,DFRRG 算法网络的最大连通集群比例降到 30%以下,此时平均最短路径比要小于 1,这是因为在这种情形下,网络中大部分节点之间无法建立连接,此时无人机协同所必须的控制信息不能进行有效传递,因而通信网络不能为协同控制提供支持.BA 算法的网络性能略优于 DFRRG 算法,这是因为 BA 算法所构建的无标度网络在随机故障的场景下具有较强的鲁棒性.LPCN 算法网络性能明显弱于 LPTCN 算法,其原因是 LPCN 算法在构建网络过程中考虑一跳共同邻居指标,当面对多个节点对的一跳共同邻居数目相同的情况时,LPCN 算法无法准确找到最佳的连边建立节点.而 LPTCN 算法中考虑了包含更多信息量的二跳共同邻居指标,这更有利于 LPTCN 算法建立最优链路.LPTCN 算法是 4 种算法中性能最优的,当节点失效比例的小于 0.8 时,该算法能够始终维持网络的全连通,并且平均最短路径比小于 1,此时网络处于相对可靠的状态.其原因是:LPTCN 算法所有构建的网络不仅具备无标度网络性质,同时将节点失效的情况考虑在内,每当网络结构受到破坏时,网络修复算法就会被执行,补偿网络中损失的网络连接.

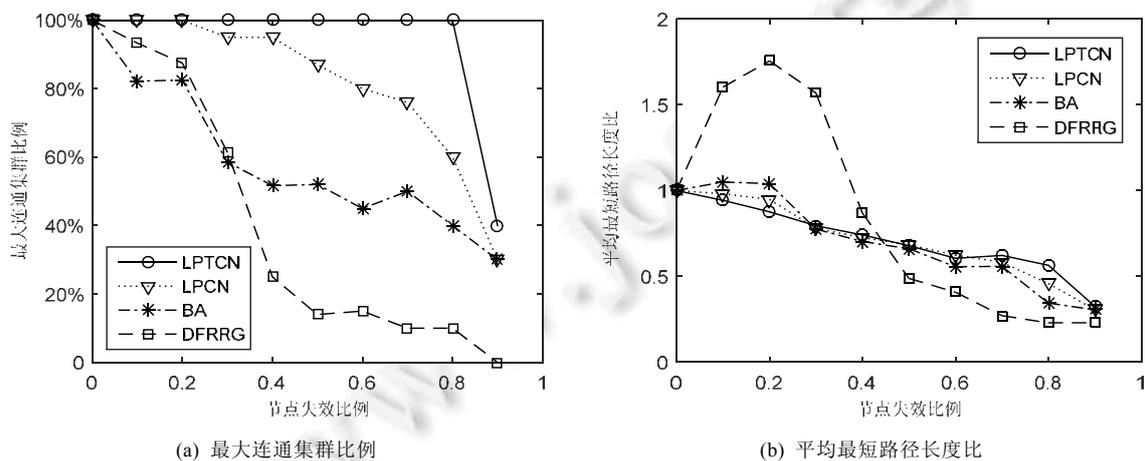


Fig.5 Network properties in random attack scenario

图 5 随机攻击场景下的网络性质

## 4.2 网络抗毁性

网络抗毁性指的是在恶意攻击作用下,网络的对抗能力<sup>[22]</sup>.在军事战斗中,无人机集群不得不面临敌方的攻击和干扰,通常这种干扰与攻击是具有针对性的,无人机群体中处于重要地位的节点(指挥中心、执行中心等)往往首当其冲.我们期望网络中处于重要位置上的无人机被击落或者发生故障时,整个通信网络依然能够保持良好的性能,进而保障无人机群体协作工作的有效进行.

节点的度值越大,意味着与之产生信息交换的节点就越多,该节点对网络的影响作用也越明显,因此我们定义通信网络中大度值节点为重要节点.为了模拟恶意攻击,本文按照节点度值由高到低的顺序删除节点,进行多次重复实验,统计网络的最大连通集群比例以及平均最短路径比.

图 6(a)、图 6(b)分别反映了网络中失效节点比例对网络最大连通集群比例、平均最短路径长度比例的影响.通过观察我们可以看出,随着网络中节点失效比例的逐渐增多,DFRRG 算法与 BA 算法的网络性能下降极为明显.BA 算法在失效节点比例达到 0.2 以上时,网络的连通率近乎为 0%,平均最短路径长度比也逐步趋近于 0,这是因为无标度网络在恶意攻击下普遍具有脆弱性.DFRRG 算法在失效节点比例小于 0.2 时,网络的连通性尚好,但此时平均最短路径长度比大于 1.在失效节点比例大于 0.2 时,网络的最大连通集群比例与平均最短路径长度比开始迅速下降,并且当失效节点比例达到 0.6 时,网络的最大连通集群比例与平均最短路径长度比降低为 0,此时网络中所有节点均为独立节点.尽管 LPCN 算法的性能要优于 DFRRG 算法和 BA 算法,但与 LPTCN 算法之间仍然存在一定的差距.与此同时,通过对比随机破坏与恶意攻击下本文所提算法的网络性能,我们能够发现,LPTCN 算法在恶意攻击情况下能够保持与随机破坏场景下同样良好的网络连通性,并且平均最短路径长度始终维持在 1 以下,证明在恶意破坏环境下 LPTCN 算法依然能够发挥作用,有效保证网络的可靠性.

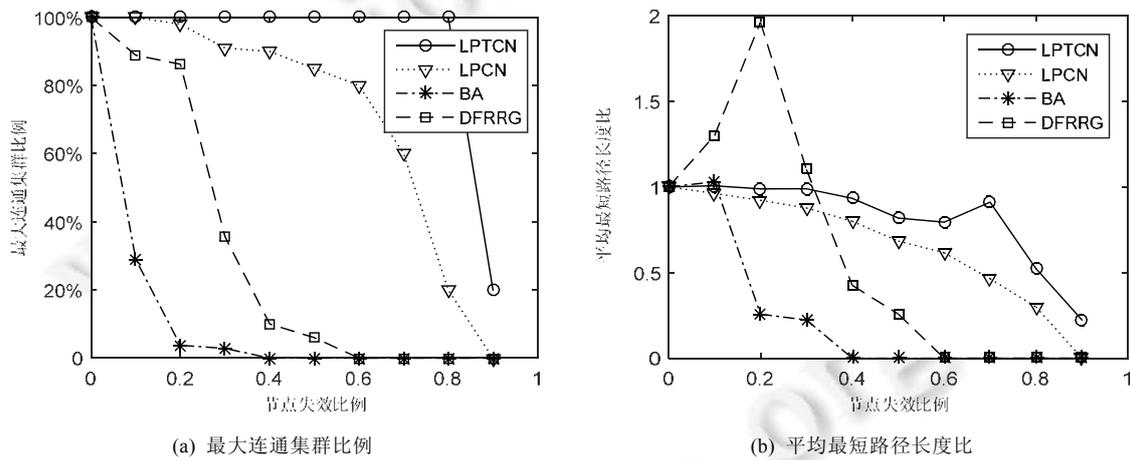


Fig.6 Network properties in deliberate attack scenario

图 6 蓄意攻击场景下的网络性质

## 5 总结

无人机的协同合作过程需要依赖彼此之间频繁的数据交换来获取集群控制的相关信息,这对集群的通信质量提出了很高的要求.而通信实时精确的前提是通信网络的稳定与可靠,因此,本文致力于构建可靠的无人机集群通信网络.本文的主要工作包括:

- (1) 提出二跳共同邻居指标.相较于传统的复杂网络指标,二跳共同邻居在反映网络非均匀性的同时,能够刻画节点之间的相似性.
- (2) 基于链路预测思想以及二跳共同邻居指标,提出 LPTCN 网络演化算法.该算法将以往算法所忽视的节点失效情况考虑在内,并将算法划分为网络初始化与网络维护两个部分,以解决节点失效所造成的

网络不可靠问题。

- (3) 使用数学分析方法与仿真实验对算法有效性进行验证。结果表明,使用本文所提出的 LPTCN 网络演化算法所构建的通信网络具有良好的生存性与抗毁性。

无人机集群的通信架构与通信协议正在逐步完善,形成可靠的通信网络结构只是保证无人机集群通信有效性的第一步。无人机的移动性、彼此之间的信号干扰以及无线信道中的信号衰减,都对无人机集群的通信提出了挑战。在接下来的工作中,我们将针对上述问题展开研究。

#### References:

- [1] Andre T, Hummel KA, Schoellig AP, *et al.* Application-driven design of aerial communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 2014,52(5):129–137. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815903>
- [2] Gupta L, Jain R, Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016,18(2):1123–1152. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297>
- [3] 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. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2560343>
- [4] Reynolds CW. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1987,21(4): 25–34. <https://doi.org/10.1145/37401.37406>
- [5] Bekmezi I, Sahingoz OK, Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 2013,11(3):1254–1270. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
- [6] Lu J, Chen G, Yu X. Modelling, analysis and control of multi-agent systems: A brief overview. In: *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Circuits and Systems*. IEEE, 2011. 2103–2106. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2011.5938013>
- [7] Cao Y, Yu W, Ren W, *et al.* An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Trans. on Industrial informatics*, 2013,9(1):427–438. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2219061>
- [8] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2006,51(3): 401–420. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.864190>
- [9] Li K, Ni W, Wang X, *et al.* Energy-efficient cooperative relaying for unmanned aerial vehicles. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2016,15(6):1377–1386. <https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2467381>
- [10] Fadlullah ZM, Takaishi D, Nishiyama H, *et al.* A dynamic trajectory control algorithm for improving the communication throughput and delay in UAV-aided networks. *IEEE Network*, 2016,30(1):100–105. <https://doi.org/10.1109/MNET.2016.7389838>
- [11] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, *et al.* Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2016,15(6):3949–3963. <https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2531652>
- [12] Yazicioğlu AY, Egerstedt M, Shamma JS. Formation of robust multi-agent networks through self-organizing random regular graphs. *IEEE Trans. on Network Science and Engineering*, 2015,2(4):139–151. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2015.2503983>
- [13] Yuan X, Feng ZY, Xu WJ, *et al.* Secure connectivity analysis in unmanned aerial vehicle networks. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2018,19(3):409–422. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1700032>
- [14] Lü L, Zhou T. Link prediction in complex networks: A survey. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011,390(6): 1150–1170. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.11.027>
- [15] Newman MEJ, Strogatz SH, Watts DJ. Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications. *Physical Review E*, 2001,64(2):026118. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.026118>
- [16] Wu J, Chi KT, Lau FCM, *et al.* Analysis of communication network performance from a complex network perspective. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013,60(12):3303–3316. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2264697>
- [17] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, *et al.* Resilience of the internet to random breakdowns. *Physical Review Letters*, 2000,85(21): 4626–4628. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4626>
- [18] Wang B, Tang H, Guo C, *et al.* Entropy optimization of scale-free networks' robustness to random failures. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006,363(2):591–596. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.08.025>
- [19] Lü L, Jin CH, Zhou T. Similarity index based on local paths for link prediction of complex networks. *Physical Review E*, 2009, 80(4):046122. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.046122>

- [20] Albert R, Barabási AL. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002,74(1):47–97. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47>
- [21] Yi Z, Dohi T. Toward highly dependable power-aware mobile ad hoc network—Survivability evaluation framework. *IEEE Access*, 2015,3:2665–2676. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2507201>
- [22] Peng X, Yao H, Du J, *et al.* Invulnerability of scale-free network against critical node failures based on a renewed cascading failure model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015,421:69–77. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.11.024>



于冲(1991—),女,博士生,主要研究领域为车联网,无线传感器网络,链路预测.



朱剑(1981—),男,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络,嵌入式系统,大数据应用.



司帅宗(1987—),男,博士,主要研究领域为无线通信网络,车联网,链路预测.



邵士亮(1989—),男,助理研究员,主要研究领域为特种机器人,体域网.



赵海(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为车联网,无线传感器网络,复杂网络,图像处理.



刘佳良(1988—),男,工程师,主要研究领域为无线通信网络,网络,信息安全.