高技术通讯 2026 年 第36卷 第6期:564 - 575

doi:10.3772/j.issn.1002 - 0470.2026.06.002

基于协作通信的无人机集群网络连通性恢复机制①

田 文②[*,**] 刘 敏③[*,**] 孙 胜[*] 陈亚丽[*] 王煜炜[*] 曹 宁[***]

([*]中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

([**]中国科学院大学 北京 101408)

([***]中国电信天翼视联科技有限公司 杭州 310023)

摘 要 无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)集群网络由于节点高动态性和链路的不稳定性,常常被割裂为多个无法互相通信的分区。因此,网络连通性恢复是无人机领域的一个重要问题。现有的解决方案需要无人机节点长距离移动以恢复通信连接,导致时间和能量开销大。本文研究了利用协作通信技术提高无人机网络连通性恢复效率的问题。为此,设计了一种基于协作通信的无人机网络连通性恢复算法(cooperative communication based connectivity recovery algorithm for UAV swarm networks, C3RUN)。该算法利用协作通信扩大无人机节点的通信范围,并将无人机节点移动至更合适的位置以进一步提升协作通信的性能,从而实现网络连通性的快速恢复。最后,本文进行仿真实验来评估C3RUN的性能,结果表明,与基于图卷积神经网络和虚拟势场的2种连通性恢复算法相比,C3RUN在恢复时间上分别加快了24.1%和60.5%,在节点平均移动距离上分别减少了19.2%和54.4%。

关键词 无人机; 无人机集群网络; 协作通信; 连通性恢复

近年来,无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)由于灵活性高、功能多样性、易部署性和运营成本较低等优势,在军事和民用领域都有着广泛的应用。常见应用包括搜索和摧毁行动[1]、边境监视[2-3]、为自组织网络提供信号中继[4-5]、风速估计[6]、农业应用[7]、灾害监测与交通监控[8-9]等。然而,单架无人机能力有限,在承担复杂任务时往往效率低下。因此,由多架无人机组成的无人机集群网络(UAV swarm network,USNET)引起了广泛的关注。集群中的无人机能够自组织地进行协作,从而在执行任务时带来显著的效率提升。

无人机网络高效执行任务的前提是保证无人机之间的通信,这意味着要维持整个网络的连通性。然而,无人机网络通常在室外开放甚至恶劣的环境中工作,容易受到外部干扰[10]。同时,无人机的高动态性、网络拓扑的不确定性、通信链路的低可靠性以及恶劣环境下无人机的高损坏率[11]等诸多因素会使得节点失效和链路断裂,从而导致网络被划分为多个无法相互通信的分区,导致任务无法继续执行。因此,需要探索具有自愈能力的无人机网络,当网络出现分裂时,尽快恢复无人机网络的通信连接,以保证任务的正常执行。

为了恢复网络的连通性,近年来有许多工作将节点移动到新的位置使无人机之间能够重建通信链路,进而恢复整个网络的连通性[12-15]。这些解决方案虽然可以保证无人机网络在分裂后恢复连通,但是各节点需要移动较长的距离才能到达合适的位置。这导致恢复过程耗时长,无人机的能耗高。为

① 国家自然科学基金(No.62202449)资助项目。

② 男,1994年生,博士生;研究方向:无人机网络,协作通信,无人系统协同;E-mail: tianwen@ict.ac.cn。

③ 通信作者,E-mail: liumin@ict.ac.cn。

(收稿日期:2025 - 02 - 10)

了解决上述问题,协作通信技术(cooperative communication,CC)被认为是一种有效的提升通信性能、增强网络连通性的可选方案[16-22]。

协作通信技术的核心思想是通过多个单天线节点之间的协作共享彼此的天线,实现虚拟的多天线系统,从而获得分集增益,大幅提高网络的通信性能。在协作通信中,对于需要发送信息的源节点,其传输范围内的一跳邻居节点可以作为辅助节点。源节点将需要发送的信息的副本也发送给辅助节点,源节点与辅助节点同时向目的节点发送相同的信息,目的节点可以将各个节点传输的信息进行叠加并对其进行解码。因此,协作通信使节点能够"扩展"源节点的通信范围,将数据发送到原本无法直接通信的远距离目的节点[17]。利用协作通信扩展通信范围的特性,原本无法直接通信的不相交的网络分区可以借助协作通信建立互连链路,从而恢复网络连通性。

目前,协作通信已用于解决网络连通性恢复问题[18-19]。文献[18]利用协作通信建立了低能耗的分区间连接以恢复网络连通。文献[19]恢复网络连通性的同时构建了冗余的协作通信连接以增强网络的鲁棒性。上述工作仅考虑静态场景下的协作通信,并且还假设无法通信的分区之间一定可以通过协作通信恢复连接。然而,在无人机网络中,有时会出现大量节点损坏,导致分区相距较远。在这种情况下,一组节点在其当前状态(例如剩余能量、发射功率等)和位置下建立协作通信后并不能获得足够的通信范围提升,无法将信息发送给其他分区中的节点,从而无法恢复网络连通。

本文提出了一种新颖的基于协作通信的无人机网络连通性恢复算法(cooperative communication based connectivity recovery algorithm for UAV swarm networks,C3RUN)。C3RUN 利用无人机节点的主动移动性来扩大协作通信的范围,使得无人机节点可以与远程分区中的节点建立远距离协作通信链路。具体来说,当无人机节点在初始状态下无法通过协作通信建立连接时,无人机节点可以主动寻找并移动到合适的位置,从而提升协作通信的性能,恢复与其他分区间的通信连接。基于上述分析,本文设计了节点移动轨迹和协作节点选择方案,以尽量减少网络恢复时间。

1　相关工作

网络连通性恢复是自组织网络中的一个关键问题[23]。本节将介绍利用节点移动性实现连通性恢复的典型工作。文献[24]提出了基于最小斯坦纳树的最优中继节点放置的分布式算法(distributed algorithm for optimized relay node placement using minimum Steiner tree,DORMS),在断开的网络分区之间部署中继节点以恢复连通性。通过将网络拓扑建模为斯坦纳树,DORMS 可以大幅减少所需中继节点的数量。文献[25]研究了如何提高自组织机器人网络的容错程度,提出了一种块移动算法来尽可能消除网络中割点的影响。在该算法中,叶子节点会向割点移动,以增加这些割点周围的连通度,从而提高整个网络的容错程度。文献[26]提出的向内运动修复算法(recovery by inward motion,RIM)使节点向一个位置聚集来实现连通性恢复。在 RIM 中,当一个节点发生故障时,它的邻居会向内移动到它的位置周边,以便它们可以相互连接。RIM 中的机制也可以在无人机网络中工作。然而,RIM 使得网络中的节点必须执行连续的级联运动,重定位过程递归地应用于相关节点,直到没有节点需要移动为止,这大大增加了节点的移动量。文献[27]提出的最小干扰拓扑修复算法(least-disruptive topology repair,LeDiR)通过减少 RIM 中的过度运动对 RIM 进行了扩展。当切割点失效并且网络分裂时,LeDiR 将选择最小的节点块进行移动,从而可以最小化移动节点的数量。

相关工作研究了各类应用中的无人机网络的连通性恢复机制。文献[28]开发了一种用于无人机集群的实时弹性恢复方法。文献[29]提出了一种基于数据交换的入侵检测方案,以提高无人机网络的安全弹性。此外,文献[30]开发了用于节点定位和网络配置的弹性恢复算法。文献[31]提出了一种基于势场的解决方案,旨在快速、灵活地恢复无人机网络。文献[32]提出了一种基于图卷积神经网

络(graph convolutional network,GCN)的算法,可以找到使无人机网络恢复的拓扑结构,通过对剩余节点重定位即可恢复网络连通。文献[33]也使用图卷积算法进行恢复,并依靠失效节点的特征来指导节点恢复过程,可以避免剩余节点的过度聚集。但需要获取失效节点的位置信息,这在实际任务过程中并不现实。此外,这些算法需要大量节点进行长距离移动,导致恢复时间较长,无人机在恢复过程中消耗了大量能量,不利于无人机任务的执行。文献[34]提出了对无人机集群自愈能力评估的指标框架与恢复方法并进行了实验分析,研究了弹性恢复算法的最优条件和边际效益,但针对的是可补充无人机节点进入集群的场景,不适用大部分严苛的任务环境。文献[35]利用投资组合理论构造了网络效用函数,维持无人机网络弹性的同时实现了总速率和用户速率波动之间的平衡,相比于快速恢复连通的需求,此工作更注重系统服务性能的场景。

近年来,协作通信已被用于网络的连通性维护和恢复。文献[18]提出了一种名为“协作桥”的新型拓扑控制算法。在协作桥中,首先分区节点间的协作通信链路来重新连接各个网络分区,接着为了进一步降低能耗,采用两层最小生成树方案去除冗余链路。文献[19]提出了一种利用协作通信建 k-容错网络的算法,以实现节能的容错网络。它们通过为每个节点选择 k 个帮助节点建立了 $k+1$ 连接的网络,并使用节能的协作通信链路来替代直连链路。上述工作表明协作通信对于建立长距离传输非常有帮助,从而可以实现网络分区的快速修复。然而,已有的工作只能用于节点位置不会改变的静态场景,而且假设分区间的协作通信链路一定能够建立。然而在无人机网络中,由于其工作环境的不稳定性,可能出现分区相距较远的情况,各个网络分区间可能无法通过直接建立协作通信链路以恢复连接。因此如何在无人机网络中高效地使用协作通信仍然是一个悬而未决的问题。

2 系统模型和问题描述

本节首先介绍系统模型,然后对协作通信下的无人机网络连通性恢复问题进行描述与公式化。

2.1 系统模型

本文考虑远离市区的场景,环境中没有基础通信设施,无人机无法与远程的地面控制台进行通信。在该场景下研究具有 N 架相同类型无人机的无人机网络,定义 $N=\{1,\cdots,i,\cdots,N\}$ 为包含所有无人机节点的集合。假设无人机网络工作在一个时隙系统下,用 $T=\{1,2,\cdots,T\}$ 表示。对于第 k 个时隙,其起始时刻为 t_{k-1},结束时刻为 t_k。为了便于理解,后文中的“节点”均指代“无人机节点”。初始的无人机网络是一个连通的网络,其中每个无人机节点都可以通过多跳通信链路向网络的任何其他无人机传输数据。无人机间存在 2 种链路:直连链路和协作链路。

直连链路。如图 1(a)所示,i 与 j 之间存在直连链路,接收方 j/i 可以成功解码来自发送方 i/j 的消息,即 i 与 j 之间链路的平均信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)不小于预定义阈值 τ。

$$\frac{P\mathbb{E}[|h_{i,j}|^2]}{(d_{i,j,t})^{\alpha}N_0}=\gamma_{i,j,t}\geqslant\tau \tag{1}$$

式中:每架无人机都可以以恒定的功率 P 向其他无人机传输信号;τ 表示正确解码消息所需的 SNR 阈值;无人机节点间通过视距链路(line of sight,LoS)进行通信,α 是自由空间路径损耗指数;$h_{i,j}$ 是节点 i 与节点 j 之间的信道系数,服从莱斯衰落模型;$\mathbb{E}[\cdot]$表述数学期望,$|\cdot|$为模运算,$\mathbb{E}[|h_{i,j}|^2]$ 表示信道的小尺度衰落平均功率增益,$d_{i,j,t}$ 是在 t 时刻节点 i 和 j 的距离,N_0 是噪声功率。

协作链路。如图 1(b)所示,无人机节点 i 无法与节点 j 直接通信,因为 j 超出了 i 的最大传输范围。在这种情况下,节点 i 可以与邻居节点 n_1、n_2 进行协作,并将数据发送给节点 n_1 和 n_2,然后 3 个节点同时将数据发送给 j。在利用了协作通信后,接收节点 j 将三者信号的 SNR 叠加,节点 i 的传输范围得到了扩大,使得 j 可以接收到 i 发送的消息,存在从 i 到 j 的协作链路。需要注意的是,成功建立从节点 i 到节点 j 的协作链路同样需要满足 SNR 阈值约束。这里将发送节点 i 及其辅助节点的集合称为协作节点集合,用 Ω_i 来表示。节点 j 从 Ω_i 接收到的总 SNR 应不小于阈值 τ,如式(2)所示。

$$\sum_{i'\in\Omega_i}\frac{P\,\mathbb{E}\left[\left|h_{i',j}\right|^2\right]}{(d_{i',j,t})^{\alpha}N_0}=\sum_{i'\in\Omega_i}\gamma_{i',j,t}\geqslant\tau \tag{2}$$

当节点 i 进行协作通信时,如果满足式(2),仅可构建向 j 发送信息的单向协作链路,j 可以接收到 i 发送的信息。如果 j 也向 i 发送信息,需要 j 节点及其辅助节点共同构建的协作链路同样满足式(2),才能建立 j 向 i 发送信息的单向协作链路,i 可以接收到 j 发送的信息。在这种情况下才可以实现 i 与 j 之间的双向协作链路,i 与 j 之间才真正恢复彼此通信。本文重点关注利用双向协作通信链路实现连通恢复。

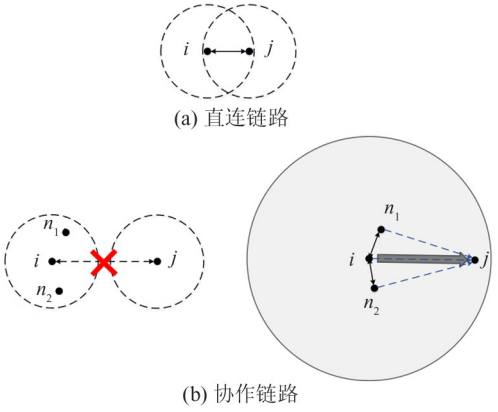


图 1　直连链路和协作链路

本文中,无人机网络在初始状态下是连通的。在某时刻由于部分无人机节点失效,导致网络被割裂为多个无法互相通信的分区(后文中使用簇表示每个分区中无人机的集合)。网络分裂后各个无法互相通信的簇的集合用 $M=\{1,2,\cdots,M\}$ 表示,$m\in M$ 表示每个簇。网络割裂后恢复过程就会启动,每架无人机需要飞向各自的目标位置以恢复网络连通性。恢复后的无人机网络形成了协作通信下的网络连通,网络中的每个无人机节点都可以通过多跳方式与任何其他节点进行通信。该多跳路径包含直连链路和协作链路,其中直连链路存在于簇内,而协作链路用于簇之间以建立连接。使用 $\varepsilon(i,j)$ 表示节点之间的连通情况,如果可以通过多跳路径互相通信,则 $\varepsilon(i,j)=1$,否则为 0。

接下来,为无人机网络建立 X-Y-Z 笛卡尔坐标系,令第 i 架无人机在 t 时刻的位置为 $\boldsymbol{p}_{i,t}=[x_{i,t},y_{i,t},z_{i,t}]^{\mathrm{T}}$,$i\in N$,上标 T 表示矩阵转置。网络割裂发生前无人机初始位置集合记为 $X_0=\{p_{1,t_0},p_{2,t_0},\cdots,p_{N,t_0}\}$,无人机在恢复过程结束后的最终位置用 $X_{\text{recovery}}=\{p_{1,t_n},p_{2,t_n},\cdots,p_{N,t_n}\}$ 表示。在此,使用 $\|p_{i,t_n}-p_{i,t_0}\|$ 来表示无人机节点 i 在网络恢复过程中所需移动的距离。此外,为了防止无人机在恢复过程中发生碰撞,设定无人机间的安全距离为 d_{safe}。

为了利用协作链路将分割的网络分区重新连接起来,在此引入多个二元变量。其中,$b_{i,m}$ 表示网络割裂发生后,每架无人机 i 与簇 m 的从属关系;$c_{m,j}$ 表示从簇 m 建立指向目的节点 j 的协作链路;$k_{i,j}$ 表示选定合适的节点 i 作为发射节点,与其辅助节点共同构建协作链路向 j 发送信息。具体说明如下。

二元变量 $b_{i,m}\in\{0,1\}$,$\forall i\in N$,$m\in M$,则有:

$$b_{i,m}=\begin{cases}1, & \text{如果无人机 } i \text{ 属于分簇 } m\\ 0, & \text{其他情况}\end{cases} \tag{3}$$

本文需要构建簇间的协作链路以恢复簇间的连通,而协作链路实质上是节点间的通信链路,因此通过 $c_{m,j}$ 确定从簇 m 建立指向目的节点的协作链路,同时在簇 m 中通过 $k_{i,j}$ 选定合适的节点 i 作为发射节点,与其辅助节点共同构建协作链路向 j 发送信息。

二元变量 $c_{m,j}\in\{0,1\}$,$\forall j\in N$,$m\in M$,$b_{j,m}=0$,则有:

$$c_{m,j}=\begin{cases}1, & \text{如果从簇 } m \text{ 建立了指向 } j \text{ 的协作链路}\\ 0, & \text{其他情况}\end{cases} \tag{4}$$

二元变量 $k_{i,j}\in\{0,1\}$,$\forall i,j\in N$,$i\neq j$,则有:

$$k_{i,j}=\begin{cases}1, & \text{如果无人机 } i \text{ 被选中建立指向 } j \text{ 的协作链路}\\ 0, & \text{其他情况}\end{cases} \tag{5}$$

另外,K 表示 $k_{i,j}$ 的集合,C 表示 $c_{m,j}$ 的集合。

然而,正如前文所说,分区间建立协作通信后并不一定能获得足够的通信范围提升,也就无法恢复分区间的通信连接。因此需要利用节点移动增强协作通信性能来确保网络连通性实现高效恢复。

2.2　问题描述

基于协作通信的无人机网络连通性恢复问题可以描述如下。

对于每个不相连的簇,选择该簇的一组无人机节点来建立与其他簇的协作链路。同时需要移动该

簇中一定数量的无人机节点,以确保协作链路能够建立,从而使整个网络从分裂状态恢复到连通状态。

本文研究的重点是如何尽快构建协作链路以恢复簇间通信。由于每架无人机的飞行时间不同,恢复过程的持续时间由飞行时间最长的无人机决定。$\phi[i]$ 表示无人机 i 在网络恢复过程中的飞行时间。因此,总的网络恢复时间可以表示为 $\max_{i\in N}\phi[i]$。假设飞行速度为常数 v_0, 飞行时间 $\phi[i]$ 与无人机 i 的飞行距离成正比。将所有无人机在网络恢复过程中的最大飞行距离表示为 $D_{\text{rec}} = \max_{i\in N} v_0\phi[i] = \max_{i\in N}\| p_{i,t_n} - p_{i,t_0}\|$。

因此,为了最小化恢复时间,需要通过集合 C 确定需要建立协作链路的簇与目的节点,通过 K 选择簇中合适的节点进行协作,并确定无人机移动后的最终位置 X_{recovery}, 使得整个恢复过程中所有无人机的最大飞行距离被最小化。这个问题可以表述为

$$\min_{X_{\text{recovery}},K,C} D_{\text{rec}} \tag{6}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_j c_{m,j} \geqslant 1,\ \forall m \in M \tag{6a}$$

$$\sum_j \mathbb{I}\left(\sum_{i=1}^{N} b_{i,m}c_{m,j}k_{i,j}\frac{P_i\,\mathbb{E}[|h_{i,j}|^2]}{(d_{i,j,t_n})^{\alpha}N_0} \geqslant \tau\right) \neq 0,\quad \forall m \in M \tag{6b}$$

$$\| p_{i,t} - p_{j,t}\| \geqslant d_{\text{safe}}, \forall i,j \in N, i \neq j \tag{6c}$$

$$\varepsilon(i,j) = 1,\ \forall i,j \in N, i \neq j \tag{6d}$$

其中,约束式(6a)、式(6b)表示对于任意簇 m, 都可以建立指向 j 的协作链路,也就表明每个簇都可以与至少一个其他簇通过协作通信相连,式(6b)中的 $\mathbb{I}(x)$ 为指示函数,当 x 成立时 $\mathbb{I}(x)$ 为 1,否则为 0;约束式(6c)保证恢复过程中每 2 架无人机之间的安全距离;约束式(6d)确保恢复过程后网络恢复连通。

由于静态场景下协作通信的最优连接恢复问题是 NP 完全问题[18],而本文的优化问题是针对节点移动场景下利用协作通信恢复连通性的问题,会比静态场景更加复杂,因此优化问题式(6)也是 NP 完全问题。本文在下面的小节中提出了一种启发式算法。

3　算法设计

本节首先对问题进行分析,并设计了求解算法 C3RUN,然后解释 C3RUN 的实现。

3.1　问题分析与算法设计

网络割裂后,每个簇内的无人机节点无法访问其他簇的信息,因此网络中也不存在可以进行集中决策的中心节点。考虑这些实际情况,本文提出了一种启发式算法,每个簇根据本地信息作出决策。

问题式(6)中协作节点选择与节点移动的目的是选择最合适的节点并沿最优的路径移动,使得协作通信的范围在最短的时间内得到最大的提升,从而尽可能减少无人机的飞行距离。因此从协作通信性能提升这一点入手,定义移动增益 G_{T_k} 为

$$G_{T_k} = \frac{\sum_{i\in\Omega}\text{SNR}_{i,t_k} - \sum_{i\in\Omega}\text{SNR}_{i,t_{k-1}}}{\sum_{i\in\Omega}\| p_{i,t_k} - p_{i,t_{k-1}}\|} \tag{7}$$

移动增益 G_{T_k} 的分子部分是在第 k 个时隙中选择某些节点进行协作并移动一定路径后,协作通信性能即总 SNR 的提升。分母部分是节点的移动距离。G_{T_k} 是性能提升和移动距离成本之比,反映了决策制定的好坏。

由于每个簇缺少全局信息,因此仅能根据本地信息在当前时隙内作出决策。在此,可以构建优化问题式(8),针对整个恢复过程中的每个时隙,选择合适的节点进行协作,并规划节点在时隙内的移动路径,使得当前时隙内的移动增益最大。

$$\max_{X_{\text{recovery}},K,C} G_{T_k} \tag{8}$$
$$\text{s.t.}\quad \text{式(6c)}$$

在求解问题式(8)时,每个簇以分布式方式得到用于节点选择和移动的决策。在若干时隙后,每个簇都建立了与其他簇的协作链路,并且每个节点都可以通过多跳路径与其他节点通信,则网络恢复连通,恢复过程结束。

在恢复过程中,每个簇仅依靠本地信息逐个时隙进行决策,因此每个时隙中的协作无人机节点集合可能会发生变化,而协作节点集合的变化也会导致无人机节点移动轨迹的变化。这些优化变量的耦合使得问题难以求解。因此,本文将优化问题划分为 2 个子问题来求解。

子问题 1:针对给定的移动轨迹,优化协作节点选择变量 K、C, 以最大化移动增益。

$$\max_{K,C} G_{T_k} \tag{9}$$
$$\text{s.t.}\quad \text{式(6c)}$$

子问题2:针对给定的协作节点集合,优化节点移动轨迹 X_{recovery},以最大化移动增益。

$$\max_{X_{\text{recovery}}} G_{T_k} \quad \text{s.t.} \quad \text{式(6c)} \tag{10}$$

这2个子问题以交替的方式迭代求解,直到网络恢复连通。

理想情况下,对于选出的协作节点集合,为了最快恢复连通,在其他簇中会有它们相应的最优接收节点,式(7)计算SNR的接收节点即为最优接收节点。但由于缺少全局信息,无法直接获取最优接收节点位置,后续算法实现部分会对此进行说明。

3.2　C3RUN的实现

本小节提出了一种基于协作通信的无人机网络连通性恢复算法C3RUN。在C3RUN中,当网络因节点故障而割裂时,来自不同簇的节点将尝试建立指向彼此的协作链路来恢复簇间的连接。在这个过程中,每个簇中的无人机会依据优化问题式(8)对节点选择和节点移动路径进行规划,以扩展协作链路的通信范围,从而尽快构建簇间的协作链路。最终所有节点都可以通过协作链路以及直连链路连接起来,则网络恢复连通。

在恢复过程中,C3RUN需要无人机节点周期性地交换它们的位置信息,以便及时进行决策。这也使无人机节点能够持续搜索其周围的簇,并不断合并。接下来将详细介绍C3RUN。

预备阶段。每个无人机节点交换并维护其一跳和两跳邻居节点的信息表,其中包含邻居节点的ID和位置。在无人机网络形成的初始阶段,计算整个网络的几何中心位置,并告知给全部无人机节点,这样每个无人机节点就会得知自己在网络中的相对位置,为后续恢复措施做准备。如图2(a)所示,所有节点在初始阶段可以互相连接形成一个连通的网络。

恢复阶段。该阶段包含以下3个步骤。

步骤1:故障检测。

无人机节点将定期向它们的邻居发送心跳消息,以告知对方仍在正常运行。若连续几轮未收到某节点的心跳消息,则表示该节点发生了故障。无人机节点损坏后不一定会破坏网络的连通性,只有关键节点损坏才会导致网络的分裂,因此需要对网络的损坏进行识别。

当某个无人机节点发现邻居节点失效,且与之相关联的两跳邻居节点也失去联系,说明网络有可能发生了分裂。此时该无人机节点可以随机向网络中的远距离多跳节点发送确认信息,如果没法送达则可以判断网络确实发生了分裂,形成了若干个无法相连的簇。显然,只有位于簇的边缘的节点能发现邻居节点的失效以及网络割裂的发生。同时这些处于边缘的节点也是进行网络恢复的主要参与节点。边缘节点会与自己的邻居交换信息,告知网络分裂的发生,最终在它们所处的簇内形成共识。

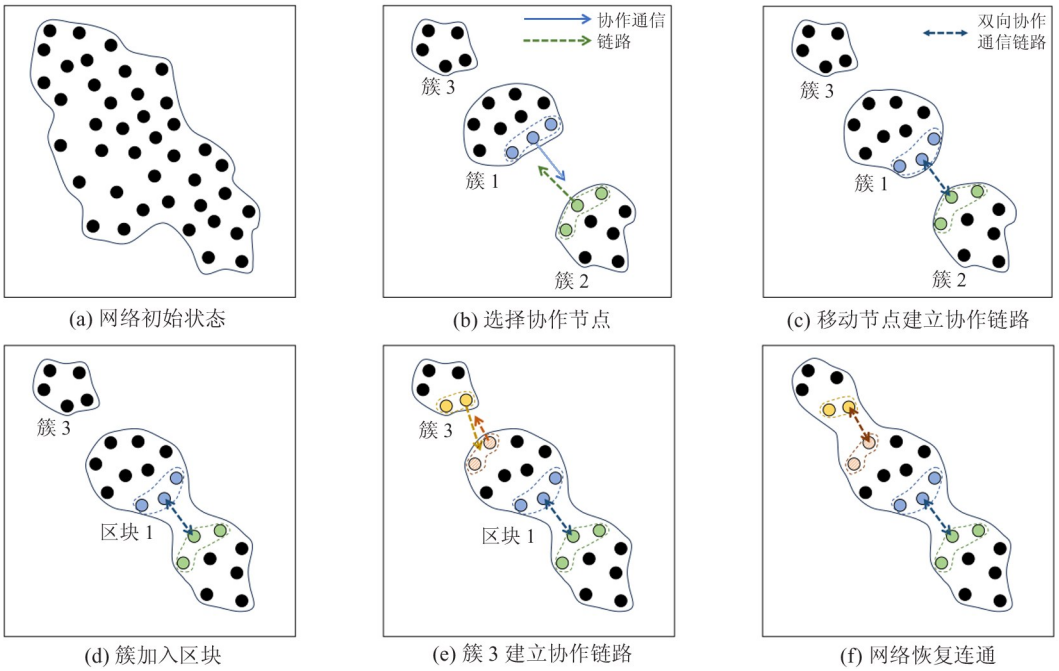
步骤2:节点选择与移动。

网络中部分节点失效后整个网络形成了若干个不相连的簇,如图2(b)所示。然后对子问题1和子问题2进行求解,以确定各个簇内构建协作链路的节点集合和移动路径。

针对子问题1,簇边缘的节点会根据自己的位置判断自己处于靠近无人机网络几何中心的边缘还是处于远离几何中心的边缘。靠近中心的边缘节点会主导节点选择与移动过程,这是因为它们更有可能离其他簇更近,由它们朝向网络中心构建协作链路更有可能连接到其他簇。基于上述分析,首先将整个网络初始状态的几何中心位置作为目标位置。在C3RUN中,目标位置即每个簇计算移动增益时的接收节点位置,也是协作集合移动方向的判断依据。对每个簇 m,将簇内的边缘节点集合定义为 N_e^m,其中每个边缘节点 i_e^m 的邻居节点集合为 $M_{i_e}^m$,所有的邻居节点集合组成集合 $M_{N_e}^m$。每个边缘节点及其邻居节点都有资格构建协作链路,成为协作节点集合的候选者。对于每个协作节点集合候选,其中包含一个边缘节点及其邻居节点,即 $1+M_{i_e}^m$ 个节点。将协作节点集合定义为 $\Omega_{i_e}^m$。

对于每个簇,其中的每个协作节点集合的候选者将计算向当前目标位置移动时获得的移动增益,以评估不同候选者的好坏。注意在第一次求解子问题1时,节点均朝向目标位置移动,后续迭代中的目标方向则由子问题2产生。对于每个可能的候选者,将它们移向目标位置,直到到达当前时隙最大移动距离限制,或协作节点集中的节点即将与其邻居

节点失去连接时停止。在该过程中,计算每个候选者在移动期间获得的移动增益。然后彼此沟通达成共识,选择收益最大的候选者作为协作节点集合并作为子问题 2 的输入。具体如算法 1 所示。



(a) 网络初始状态　(b) 选择协作节点　(c) 移动节点建立协作链路

(d) 簇加入区块　(e) 簇 3 建立协作链路　(f) 网络恢复连通

图 2　无人机网络恢复过程

算法 1　协作节点选择算法

输入　边缘节点集 N_e^m, 边缘节点的邻居节点集 $M_{N_e}^m$

输出　选中的边缘节点 i_e^m 及协作节点集合 $\Omega_{i_e}^m$

初始化　$G_{T\max}=0$

1) for $i \in N_e^m$

2)　将 i 及其邻居节点集合 $M_{i_e}^m$ 共同组成协作集合 $\Omega_{i_e}^m$;

3)　根据式(7)计算 $\Omega_{i_e}^m$ 朝着目标方向移动时的移动增益 G_{T_k}

4)　　if $G_{T_k} > G_{Tamx}$

5)　　更新 $G_{Tamx} \leftarrow G_{T_k}$;

6)　　更新 $i_e^m \leftarrow i$ 及相应的协作集合 $\Omega_{i_e}^m$;

7)　　end if

8) end for

9) 返回选中的边缘节点 i_e 及协作集合 $\Omega_{i_e}^m$。

算法 1 的计算复杂度主要来自每个簇内的边缘节点个数 N_e^m, 复杂度为 $O(MN_e^m)$。

针对子问题 2,对于协作节点集合中的每个节点 i, 它们与目标位置的连线的方向 O_i 都可以作为最终移动方向 O_s 的候选。对于每个候选移动方向,协作节点集中的所有节点都将朝这个方向移动以增加移动增益。协作节点集将分别计算这些候选方向下的移动增益,从中选择使移动增益最大的轨迹。接着协作节点集中的节点沿此轨迹移动,并将此移动轨迹作为下一轮迭代中子问题 1 的输入。在协作节点移动的过程中,簇中的其他节点会同步跟随移动,以避免自己与邻居节点的通信链路断裂。具体如算法 2 所示。

算法 2　移动方向选择算法

输入　选中的协作节点集 $\Omega_{i_e}^m$

输出　协作节点移动方向 O_s

初始化　$G_{T\max}=0$

1) for $i \in \Omega_{i_e}^m$

2)　计算 i 与目标位置的连线的方向 O_i;

3)　根据式(7)计算 $\Omega_{i_e}^m$ 朝着 O_i 移动时的移动增益 G_{T_k}

4)　　if $G_{T_k} > G_{Tamx}$

5)　　更新 $G_{Tamx} \leftarrow G_{T_k}$;

6)　　更新 $O_s = O_i$;

7)　　end if

8) end for

9) 返回协作节点移动方向。

算法 2 的计算复杂度主要来自每个簇协作集合

内的节点个数 $\Omega_{i_e}^m$, 复杂度为 $O(M\Omega_{i_e}^m)$。

完成子问题 1 和子问题 2 的求解后,就开始下一轮的迭代。通过子问题 1 与子问题 2 的交替迭代求解,最终确定协作节点集合并使节点向合适的方向移动。如图 2(b)中,簇 1 和簇 2 的边缘节点尝试构建指向彼此的协作链路。通过选择协作节点并移动,在图 2(c)最终构建了双向的协作链路,恢复了簇 1 和簇 2 间的连接。

需要注意的是,在移动恢复过程中,不会产生新的连接中断,即在协作节点集合移动的过程中,它所在簇内的其他节点在发现即将失去与邻居节点的联系时也会做相应的级联运动以保持连通。这一过程是与协作节点集合的移动同步进行的,因此时间上并不会超出协作节点集合的移动过程。

步骤 3: 簇合并。

每个簇中的协作节点集合选定后,它们会使用协作链路发送请求建立双向协作通信的信息。如果在恢复过程中 2 个簇都收到彼此请求建立协作通信的信息,则它们可以成功构建双向协作链路。这样这 2 个簇可以恢复彼此的通信连接。它们会交换重要的信息,如位置、协作节点集合的信息、移动路径等。这 2 个簇会合并成一个整体,在这里称其为区块。在后续的移动过程中,每个簇仍然会根据本地信息进行决策规划,但已经合并的簇不会脱离。如图 2(d)中簇 2 加入了簇 1 形成了区块 1。

需要注意的是,对于处于网络外围的簇 3,它们在移动过程中可能无法直接构建与其他簇的双向协作链路。但是如果它们发送的请求被其他更靠近网络中心的簇接收到,那这个簇也会有所回应。如前所述,每个簇中的边缘节点有的位于远离几何中心的边缘,如图 2(e)中区块 1 上部的斜线节点。这些边缘节点有可能会接收到位于网络外围的簇 3 发送的建立协作链路的请求。这时这些边缘节点会组织相应的邻居节点进行协作,建立协作链路并发送允许构建双向协作链路的信息。但由于这些节点并不是步骤 2 中被选择和移动的节点,所以不会主动移动去提升协作通信性能。如图 2(e)所示,簇 3 的边缘节点尝试建立协作链路,并通过节点移动提升协作通信范围。它们发出的建立协作链路的请求被簇 1外侧的边缘节点接收到,但簇 1 中的边缘节点不会再主动移动,而是等待簇 3 中节点进入自己的协作通信范围中。如果在后续的恢复过程中簇 3 与更靠近网络中心的簇 1 的外侧边缘节点建立了双向协作链路,则位于网络外围的簇 3 也会加入到区块 1 中,如图 2(f)所示。这样通过不断的簇合并,最终所有的簇都可以通过协作链路连接起来,网络也就恢复了连通。

4　性能评估

本节进行了仿真实验,将 C3RUN 与与文献[31]提出的基于群体智能的抗损伤算法(swarm intelligence based damage resilient,SIDR)和文献[32]提出的通信松弛的元图卷积算法(communication relaxed-meta graph convolution,CR-MGC),以及这 2 种算法的改进算法进行比较来评估其性能。

在本文的仿真实验中,多架无人机被放置在 1 000 m × 1 000 m × 500 m 的区域内。考虑无人机数量为 150 架和 200 架这 2 个情况。每架无人机的速度设置为 1 m · s^{-1},每架无人机的传输范围设定为 50 m。无人机网络最初是连通的,然后随机使不同比例的节点数失效。在每次仿真实验中,故障无人机都是随机选取的。对于每个网络密度(即无人机节点数),使用随机生成的拓扑进行 15 次仿真模拟。

为了评估上述算法的性能,本研究考虑以下指标。

(1) 恢复过程中花费的时间。恢复网络连通所需要的时间是衡量恢复算法性能最直接的指标之一。

(2) 恢复过程中无人机节点的平均移动距离。无人机的移动距离越小,代表网络拓扑变化越小。此外,它还可以减少每架无人机的能耗,延长网络寿命,这对于能量受限的无人机网络来说十分重要。

(3) 恢复过程中的簇数。簇数反映了恢复过程中无法连接的簇数量。当数量为 1 时,网络即恢复连通。

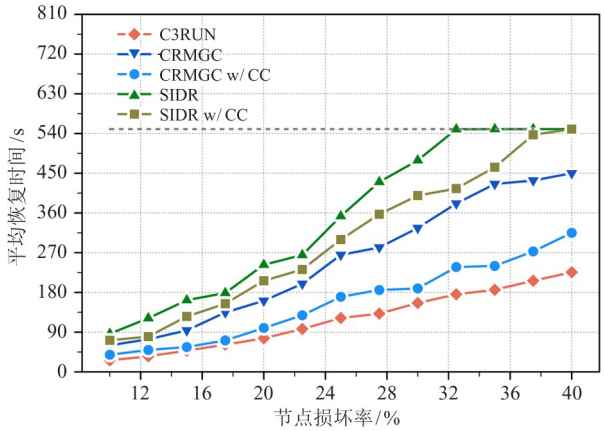
(4) 恢复过程中无人机节点的最大移动距离。

最大移动距离也反映了恢复时间，同时表征了节点移动的合理性。个别节点移动距离过大，会导致节点间剩余能量差异较大，不利于任务的执行。

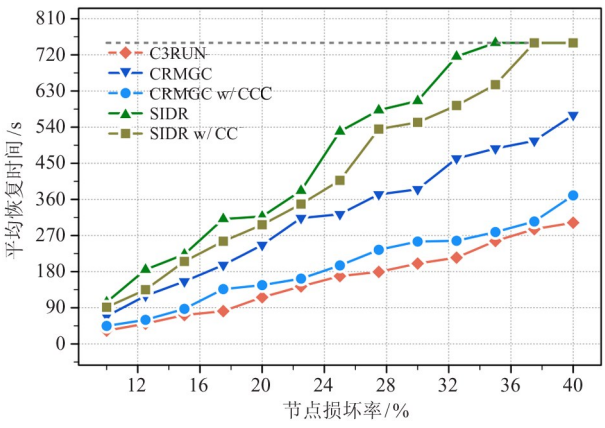
同时，本文选取了 4 种对比算法。SIDR 提出了一种基于势场的解决方案来恢复分裂的无人机网络。CR-MGC 提出了一种图卷积神经网络，以在线的方式恢复无人机网络。这 2 个算法并没有使用协作通信，因此本文为其添加了协作通信，并将改进后的算法作为了对比算法，记为 SIDR w/CC 和 CR-MGC w/CC。需要注意的是，对于这 2 种改进算法，节点移动仍然按照原本的 SIDR 和 CR-MGC 算法。在这一过程中，如果满足建立簇间协作通信链路的条件就会建立协作通信，而不会为了构建协作通信链路特意调整节点的移动路径。

图 3 比较了在不同节点损坏比例下网络连通性恢复所需的时间。实验结果表明，随着损坏节点数增加，所有算法恢复网络连接所需的时间均增加。与 150 架无人机部署的场景相比，200 架无人机部署的场景下各算法的曲线变化更为平缓，这是因为 150 架无人机场景下整体网络部署更为稀疏，随机损坏节点导致的网络割裂更难以处理，从而使得各种算法出现了不同程度的波动。同时，图 3(b) 中各个算法的性能都比图 3(a) 中要差，这是由于更稀疏的网络部署下节点需要移动更多的距离、花费更多时间才能连接到彼此。此外，在各种损坏比例下，C3RUN 的恢复时间都小于其他 4 种对比算法。这是由于 C3RUN 针对协作通信节点选择和移动路径进行了优化，以尽可能快地提升协作通信性能，从而更快恢复网络连通性。在图 3(a) 中，与同样具备协作通信的 SIDR w/CC 和 CR-MGC w/CC 算法相比，C3RUN 在恢复时间上平均减少了 60.5% 和 24.1%。

图 4 展示了网络恢复过程中节点平均移动距离在不同节点损坏比例下的对比。实验结果表明，随着损坏节点数增加，所有算法的平均节点移动距离

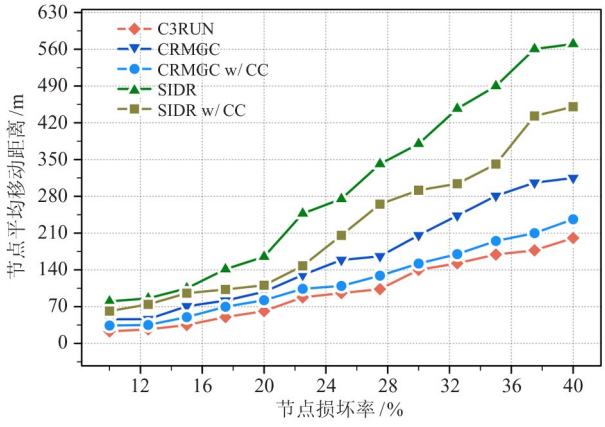


(a) 200 个无人机节点场景下网络恢复所用时间

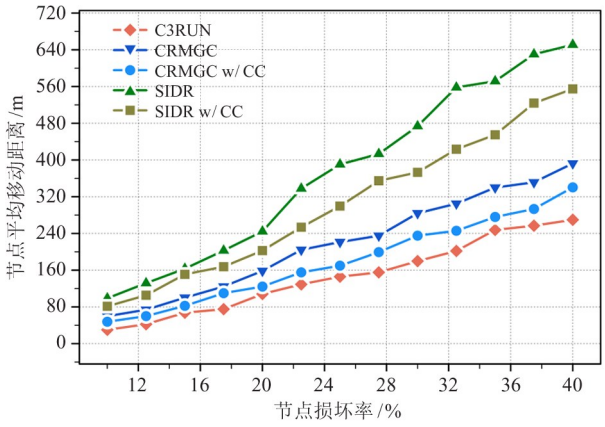


(b) 150 个无人机节点场景下网络恢复所用时间

图 3　恢复时间



(a) 200 个无人机节点场景下恢复过程中节点平均移动距离

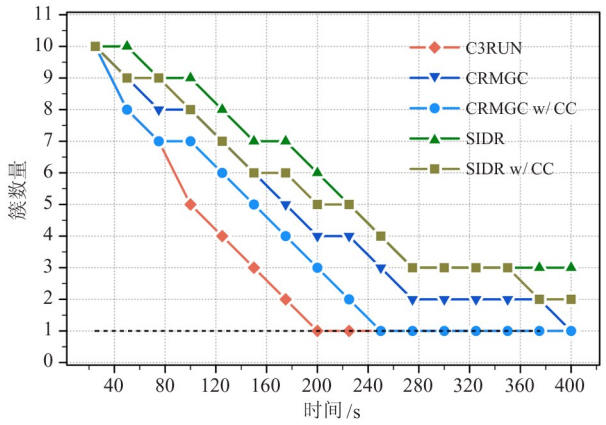


(b) 150 个无人机节点场景下恢复过程中节点平均移动距离

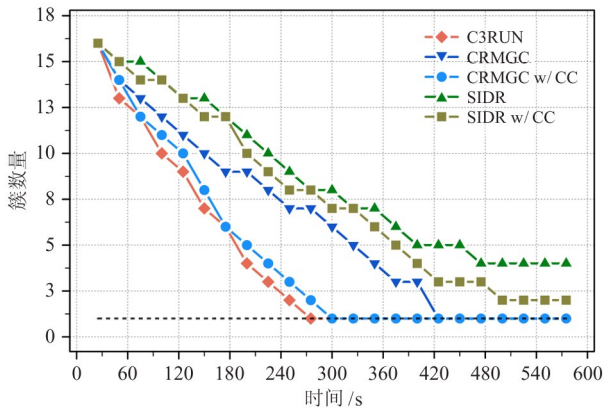
图 4　无人机节点平均移动距离

都有所增加。图4(b)中各个算法的性能都比图4(a)中要差,这同样是由于更稀疏的网络部署下节点需要移动更多的距离才能连接到彼此。此外,在各种损坏比例下,C3RUN 的节点平均移动距离均小于其他 4 种算法。具体而言,与 SIDR w/CC 和 CR-MGC w/CC 算法相比,C3RUN 的平均移动距离减少了 54.4% 和 19.2%。更少的节点平均移动距离代表着网络拓扑结构的变化更小,这对于一些需要尽可能保持网络拓扑结构的应用来说非常重要,因此从某种程度上 C3RUN 也更适用于无人机网络。

图 5 比较了在随机损坏 35.0% 的无人机节点数量情况下网络恢复过程中的簇数量,这也从侧面反映了整个恢复过程,即当簇数量为 1 时说明网络恢复成了全连通的状态。实验结果表明,随着时间的推移,所有算法的网络中簇数量都在减少,说明网络正在逐渐恢复。在 150 架无人机场景下,各算法恢复进程较慢,这是由于 150 架场景下整体网络更稀疏,节点需要移动更多的距离、花费更多时间才能



(a) 200 个无人机节点场景下恢复过程中的簇数量



(b) 150 个无人机节点场景下恢复过程中的簇数量

图 5　恢复过程中的簇数量

恢复连通性,同时可以发现有的 SIDR 和 SIDR w/CC 甚至无法在一定时间限制内将网络恢复连通。此外,实验表明所提算法 C3RUN 比其他 4 种算法更快地将网络中的簇数量减少为 1,即更块地恢复网络连通,性能最优。

图 6 展示了在不同节点损坏比例下网络恢复过程中的节点最大移动距离对比。在节点损失较少的情况下,网络破坏程度较小,各算法的节点最大移动距离都相对较小。但当节点损失较多时,4 种对比算法的最大移动距离均明显增加,而最大移动距离与恢复时间息息相关。与 4 种对比算法相比,本文提出的 C3RUN 的最大节点移动距离最小,具有最短恢复时间。

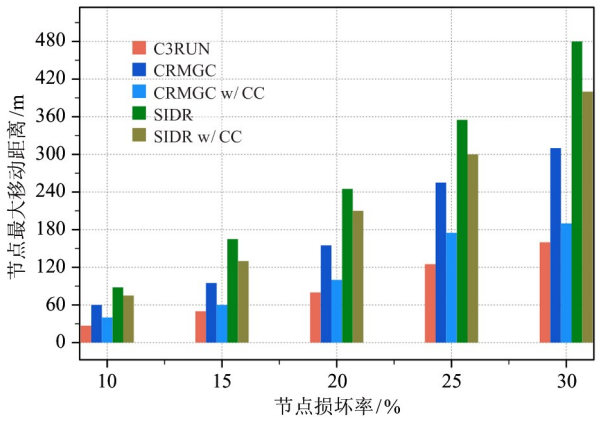


图 6　恢复过程中最大的无人机移动距离

5　结　论

本文提出了一种基于协作通信的无人机网络恢复算法 C3RUN。该算法利用节点的主动移动性来提升协作通信性能,扩展节点通信范围,使各个簇能够更高效地建立彼此间的协作通信链路,恢复网络连通性。仿真实验结果表明,C3RUN 能够以更少的时间成本和更短的节点移动距离来恢复网络连通,证明了其在提高无人机网络连通性恢复效率方面的优势。

参考文献

[1] George J, Pb S, Sousa J B. Search strategies for multiple UAV search and destroy missions[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2011,61:355 - 367.

[2] Zhang L, Zhao H, Hou S, et al. A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks[J]. IEEE Access, 2019,7:117460 - 117504.

[3] Ullah Z, Al-Turjman F, Mostarda L. Cognition in UAV-aided 5G and beyond communications: a survey [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020,6(3):872 - 891.

[4] De Freitas E P, Heimfarth T, Netto I F, et al. UAV relay network to support WSN connectivity[C]// International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. Moscow, Russia: IEEE, 2010:309 - 314.

[5] Jiang F, Swindlehurst A L. Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink[C]// 2010 IEEE Globecom Workshops. Miami, USA: IEEE, 2010:1766 - 1770.

[6] Cho A, Kim J, Lee S, et al. Wind estimation and airspeed calibration using a UAV with a single-antenna GPS receiver and pitot tube[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011,47(1):109 - 117.

[7] Javaid S, Saeed N, Qadir Z, et al. Communication and control in collaborative UAVs: recent advances and future trends[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023,24(6):5719 - 5739.

[8] Shakhatreh H, Sawalmeh A H, Al-Fuqaha A, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): a survey on civil applications and key research challenges[J]. IEEE Access, 2019,7:48572 - 48634.

[9] Zhao J, Liu J, Jiang J, et al. Efficient deployment with geometric analysis for mmWave UAV communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020,9(7): 1115 - 1119.

[10] Fei H, Ou D X, Huang X L. UAV swarm networks: models, protocols, and systems[M]. New York: CRC Press, 2020.

[11] Gupta L, Jain R, Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015,18(2):1123 - 1152.

[12] Ajorlou A, Momeni A, Aghdam A G. A class of bounded distributed control strategies for connectivity preservation in multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010,55(12):2828 - 2833.

[13] Dutta R, Sun L, Pack D. A decentralized formation and network connectivity tracking controller for multiple unmanned systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017,26(6):2206 - 2213.

[14] Lee S, Younis M, Lee M. Connectivity restoration in a partitioned wireless sensor network with assured fault tolerance[J]. Ad Hoc Networks, 2015,24:1 - 19.

[15] Joshi Y K, Younis M. Autonomous recovery from multi-node failure in wireless sensor network[C]// 2012 IEEE Global Communications Conference. Anaheim, USA: IEEE, 2012:652 - 657.

[16] Neves T F, Bordim J L. Topology control in cooperative ad hoc wireless networks[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2014,302:29 - 51.

[17] Hong Y W P, Huang W J, Kuo C C J. Cooperative communications and networking: technologies and system design[M]. Berlin: Springer Science and Business Media, 2010.

[18] Yu J, Roh H, Lee W, et al. Topology control in cooperative wireless ad-hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012,30(9):1771 - 1779.

[19] Guo J, Liu X, Jiang C, et al. Distributed fault-tolerant topology control in cooperative wireless ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014,26(10):2699 - 2710.

[20] Kanthavel R, Indra P S, Sudha D, et al. Multi-hoped cooperative communication-based wireless underground sensor network design[J]. International Journal of Communication Systems, 2022,35(10):e5174.

[21] Sagir B, Aydin E, Ilhan H. Deep-learning-assisted IoT-based RIS for cooperative communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023,10(12):10471 - 10483.

[22] Li X, Jiang J, Wang H, et al. Physical layer security for wireless-powered ambient backscatter cooperative communication networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023,9(4):927 - 939.

[23] Younis M, Senturk I F, Akkaya K, et al. Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2014,58:254 - 283.

[24] Lee S, Younis M. Recovery from multiple simultaneous failures in wireless sensor networks using minimum Steiner tree[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010,70(5):525 - 536.

[25] Basu P, Redi J. Movement control algorithms for realization of fault-tolerant ad hoc robot networks[J]. IEEE Network, 2004,18(4):36 - 44.

[26] Younis M, Lee S, Abbasi A A. A localized algorithm for

restoring internode connectivity in networks of moveable sensors[J]. IEEE Transactions on Computers,2010,59(12):1669 – 1682.

[27] Abbasi A A, Younis M F, Baroudi U A. Recovering from a node failure in wireless sensor-actor networks with minimal topology changes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012,62(1):256 – 271.

[28] Ordoukhanian E,Madni A M. Model-based approach to engineering resilience in multi-UAV systems[J]. Systems, 2019,7(1):11.

[29] Sun J, Wang W, Da Q, et al. An intrusion detection based on Bayesian game theory for UAV network[C]// The 11th EAI International Conference on Mobile Multimedia Communications. Qingdao, China: ICST, 2018: 56 – 67.

[30] Li D, Wang Y, Gu Z, et al. Adler: a resilient, high-performance and energy-efficient UAV-enabled sensor system[R]. Hong Kong: University of Hong Kong, 2018.

[31] Chen M, Wang H, Chang C Y, et al. SIDR: a swarm intelligence-based damage-resilient mechanism for UAV swarm networks[J]. IEEE Access, 2020,8:77089 – 77105.

[32] Mou Z, Gao F, Liu J, et al. Resilient UAV swarm communications with graph convolutional neural network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021,40(1):393 – 411.

[33] Lin H, Ding L, Chen S, et al. Multi-hop diffused graph convolution for resilient UAV swarm networks[C]//2024 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Toronto, Canada: IEEE,2024: 1 – 6.

[34] Kong L, Wang L, Cao Z, et al. Resilience evaluation of UAV swarm considering resource supplementation[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2024, 241: 109673.

[35] Ge L, Liang X, Zhang H, et al. Joint resource allocation and trajectory design for resilient multi-UAV communication networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024,13(4):994 – 998.

Cooperative communication based connectivity recovery for UAV swarm networks

Tian Wen[*,**], Liu Min[*,**], Sun Sheng[*], Chen Yali[*], Wang Yuwei[*], Cao Ning[***]

([*] Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

([**] University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408)

([***] E-Surfing Vision Co., Ltd., Hangzhou 310023)

Abstract

Unmanned aerial vehicle (UAV) swarm networks are often divided into multiple separated clusters due to the high dynamics of nodes and the instability of links. As a result, network connectivity recovery is an important issue in this area. Existing solutions often require UAV nodes to move long distances to restore communication connections, resulting in significant time and energy costs. In this paper, we study the issue of utilizing cooperative communication technology to improve the connectivity recovery efficiency in UAV networks. Then, we design a cooperative communication based connectivity recovery algorithm for UAV swarm networks, named C3RUN. The algorithm utilizes cooperative communication to expand the communication range of UAV nodes and moves them to more suitable positions to further improve the performance of cooperative communication, thereby achieving rapid recovery of network connectivity. Finally, we conduct extensive simulations to evaluate the performance of C3RUN. Simulation results reveal that compared with two connectivity recovery algorithms based on graph convolutional neural networks and virtual potential fields, the C3RUN speeds up the recovery time by 24.1% and 60.5% respectively, and reduces the average moving distance of nodes by 19.2% and 54.4% respectively.

Key words: unmanned aerial vehicle, unmanned aerial vehicle swarm networks, cooperative communication, connectivity recovery