

# 无人机集群通信网络拓扑重构及关键技术研究<sup>\*</sup>

王 璨 高辰子

(中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210007)

**摘 要** 无人机集群作战是未来战争的趋势。在对敌攻击的过程中,由于无人机集群通信网络中节点的移动性以及敌方的火力攻击,节点间的链路经常性断开导致通信网络连通性受损。论文针对无人机集群通信网络的连通性修复问题,研究了拓扑重构的经典方法和每种方法的优缺点,并进一步讨论了无人机集群通信网络拓扑重构的关键技术及未来发展趋势。

**关键词** 无人机集群;拓扑重构;网络连通性;关键技术

**中图分类号** TN924

**DOI:** 10. 3969/j. issn. 1672-9730. 2021. 05. 012

## Research on Communication Networks Topology Reconstruction and Key Technologies of UAV Swarm

WANG Can GAO Chenzi

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007)

**Abstract** Unmanned aerial vehicle (UAV) swarm is the trend of future combat. When attacking the enemy, due to the mobility of the nodes in UAV swarm network and the fire attack of enemy, the links between nodes are frequently disconnected, which leads to the damage of network connectivity. Aiming at the connectivity restoration problem of the UAV swarm network, the advantages and disadvantages of the classic methods of topology reconstruction are studied, and the key technologies of topology reconstruction are further discussed.

**Key Words** UAV swarm, topology reconstruction, network connectivity, key technologies

**Class Number** TN924

### 1 引言

无人机集群最早起源于生物集群的概念<sup>[1]</sup>。人们在研究蚁群等生物群体时发现,尽管每个蚂蚁在寻找食物的时候仅仅只在自己的路径上留下信息素,但整个蚁群却能通过感知路径上的信息素含量来确定出最短路径。人们把这种群体中的个体仅遵循简单的规则,但整个群体却能有智慧的现象称为“群智涌现”。

无人机集群是由大量小型无人机,以单平台无人机的作战能力为基础,以无人机之间的协同交互能力为支撑,以群体智能涌现能力为核心,基于开放式体系架构综合集成构建的,具有抗毁性、低成本、功能分布化等优势 and 智能特征的作战体系。无

人机集群作战将在未来战争中得到广泛应用,成为未来战争的核心,对未来战争产生重要影响。无人机集群作战是指一组具备部分自主能力的无人机在有/无人操作装置辅助下,实现无人机间的实时数据通信、多机编队、协同作战,并在操作员的指引下完成渗透侦查、诱骗干扰、集群攻击等一系列作战任务<sup>[2]</sup>。无人机集群作战系统可填补战术与战略之间的空白,以多元化投送方式快速投送到目标区域执行多样化军事任务,实现对热点地区战略威慑、战役对抗、战术行动<sup>[3]</sup>。

然而,在无人机集群作战过程中,必然会遭受敌方的火力打击而导致部分无人机节点受损。一旦受损节点为连接两个通信网络分区的关键节点,将影响整个无人机集群通信网络的连通性。战场

<sup>\*</sup> 收稿日期:2020年12月5日,修回日期:2021年1月10日

作者简介:王璨,女,助理工程师,研究方向:无人机。高辰子,女,硕士,工程师,研究方向:无人机。

环境复杂,局势瞬息万变,如何实时动态地对无人机集群通信网络连通性受损区域进行连通性修复,是无人机集群作战亟需解决的关键问题。

## 2 无人机集群通信网络拓扑重构

### 2.1 无人机集群的国内外发展现状

2000年,美国国防部高级计划研究局(DARPA)发布了无人机集群作战技术研究计划<sup>[4]</sup>。近几年,美国针对无人机集群展开了大量研究,并取得了一些初步成果。例如,DARPA于2015年公布的“小精灵项目”<sup>[5]</sup>。该项目计划旨在通过在敌方防御范围外投放大量小型化、可回收的无人机,利用无线自组网技术实现多个无人机间的协同,通过攻击敌方的基础通信设施和安全设施,甚至利用电脑病毒等攻击敌方数据库系统来压制敌方。



图1 美军“小精灵”项目构想图

我国的无人机集群研究虽然起步比较晚,但近年来在国内众多学者和研究人员的努力下,也取得了显著的成果。其中在无人机集群的控制技术领域,以中国电子科技集团公司赵彦杰研究员领衔的智能无人集群项目团队更是取得了令世界瞩目的成就。2017年6月10日,该团队成功完成了世界上首次119架固定翼无人机集群飞行实验,打破了此前由美军保持的103架固定翼无人机集群飞行的记录。

### 2.2 网络拓扑重构概念

拓扑重构的概念最早起源于配电网络,目的是为了提高整个配电网的容错能力<sup>[6]</sup>。类似的,当网络中的节点出现失效对网络中的通信链路产生影响时,也需要通过各种重构技术恢复网络的性能,满足网络正常的通信需求。移动ad hoc网络作为一种分布式自组织的无线网络,其节点具有移动性,拓扑变化频繁,网络中的链路容易出现断开的现象。无人机集群通信网络就是一种典型的移动ad hoc网络,每个无人机都是分布式的在完成自己的任务。

在复杂恶劣的战场环境中,尤其在对敌实施攻

击的过程中,无人机集群通信网络中的节点经常性的遭受敌方蓄意攻击而损毁失效。然而,网络中节点大面积失效或者关键节点失效,不仅会影响作战区域的网络覆盖,还会将网络分割成多个不连通的分区,影响网络中节点之间数据交换,甚至导致网络瘫痪,严重影响了整个无人机集群间的协同作战能力。因此,故障容忍和战时环境下的分区连通性恢复是无人机集群技术需要关注的重点问题<sup>[7]</sup>。

所谓拓扑重构,是指通过控制网络中的移动节点或链路的方法改变网络的拓扑结构,从而使网络具有较高的性能,更好地为用户提供服务。拓扑重构是恢复网络连通性的有效手段,即当网络出现故障导致网络出现分区,连通性遭到破坏,使性能下降显著时,运行拓扑重构算法,通过补充新的网络节点或移动网络中的冗余节点恢复网络的连通性。根据拓扑重构的实现策略,可以分为预防型重构和恢复型重构。预防型重构的基本思想是预先知道网络性质及拓扑结构,采取一定的措施,为防止未来可能出现的网络故障做准备。恢复型重构的基本思想是网络因故障而被分割时,采取相应的措施对网络连通进行恢复,相比于预防型重构,其时效性较低。

现有的拓扑重构技术的研究多集中在无线传感器网络领域,专门针对无人机集群通信网络的拓扑重构技术的相关研究较少。传感器网络中节点通常都是不具备移动性的静止节点,大部分情况下由电池供电。节点的失效通常是由能量耗尽而失效或硬件故障而导致的。无人机集群通信网络中的节点移动频繁,单次作战能量充足,其失效的原因多是由于遭受敌方攻击,且无人机网络对连通性恢复的实时性要求更高,需要在极短的时间内完成整个网络的拓扑重构,恢复网络的连通性,保障无人机集群的抗毁性和协同作战能力。对比发现,无人机集群通信网络拓扑重构和无线传感器网络拓扑重构的应用场景和需求存在差异,传统的无线传感器网络拓扑重构方法难以直接应用于无人机集群通信网络中。因此,研究战场环境下的无人机集群通信网络拓扑重构的方法对于提高无人机集群的抗毁性和协同作战能力,具有重要意义。

## 3 拓扑重构典型算法介绍

无线自组织网络中,由于节点的移动而导致网络的拓扑经常发生变化,网络中节点间的链路通常也非常脆弱。当节点间的链路因节点失效而受损时,需要通过拓扑重构的方法对网络进行修复,恢

复网络的连通性。目前,网络的拓扑重构方法可以分为以下几类。

### 3.1 基于功率控制的拓扑重构方法

无线链路两个节点能通信的前提是发送节点发射的电磁波信号到达接收节点的功率与干扰和噪声的比值,也就是信干噪比(Signal-Interference-Noise-Rate, SINR)要大于接收节点接收机的门限。通过控制节点的发送功率,可以调节节点一跳范围内的邻居数量,进而控制整个网络的拓扑复杂度。功率控制是实现网络拓扑重构的重要手段。

文献[8]系统地介绍了节点的通信半径与最小发送功率对网络连通性的影响,并提出了一种在保证网络全覆盖的前提下设置节点的最小发送功率的方法。仿真结果证明,该方法不仅可以保证网络全连通,还可以达到98%以上的网络覆盖率。基于功率控制,刘林峰等提出了一种面向节点失效问题的网络拓扑自愈方法TCS-CA<sup>[9]</sup>。该算法可以分为单跳邻居的连通性恢复、子集合并和全局连通性恢复三个阶段。其核心思想可以概括为利用功率控制技术,调整受损节点周围节点的发送功率,增大通信范围,使得受损链路重新链接以恢复网络的连通性达到拓扑重构的目的。

尽管功率控制技术可以在一定程度上实现拓扑重构的目的,但单纯的增大发送功率使得受损链路重新链接会导致节点的一跳范围内的邻居数量增加,加剧节点间对于无线信道资源的竞争。尤其在节点密度较大的无人机集群通信网络中,当网络业务负载较大时,节点间的冲突将会急剧增大,严重影响了网络性能。因此,如何平衡网络连通性和通信效率是基于功率控制的拓扑重构方法需要研究的重点。

### 3.2 基于节点移动的拓扑重构方法

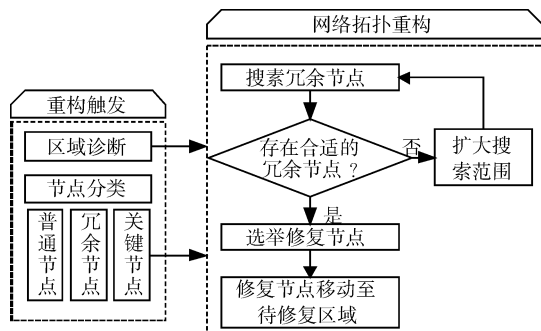


图2 基于节点移动的网络拓扑重构总体框架

一般而言,网络拓扑中节点的地位并不是完全等同的,存在着关键节点。这一类节点通常是两个区域连通的关键,承载着多条业务流的转发任务。

同时,一旦该类节点发生损毁,将会把网络分割成数个不连通的区域。基于节点移动的拓扑重构方法的核心思想就是检测网络中的关键节点,当关键节点受损时采取一定的措施进行修复<sup>[10]</sup>。该方法的主要步骤如下。

1)网络节点角色判定:节点根据自身状态改变对网络拓扑结构的影响来判定自己的角色,包括普通节点,冗余节点和关键节点。通常我们把能够用来修复关键节点而不影响网络连通的节点称为冗余节点,连接不同分区的节点称为关键节点,其它节点称为普通节点。

2)网络故障诊断:根据敌方的攻击模型和故障诊断算法,诊断当前发生故障的节点类型及其邻域节点,定位故障源。只有当网络中的关键节点受损时,才会发起拓扑重构过程修复网络连通性。

3)网络拓扑修复:修复节点通常由冗余节点担任,在关键节点的邻域范围根据适应性函数选择出最佳的修复节点。修复节点预设好的运动模型移动至关键节点的位置,如果修复节点的移动造成了新的网络拓扑分割,则进行级联移动,直至网络恢复连通。

4)网络拓扑优化:网络拓扑重构的目的一方面是恢复网络的连通性,另一方面是保证网络的覆盖率。修复节点在完成连通性修复后,还要结合其邻域内的节点修复区域的覆盖性为目标,对网络连通性和区域覆盖率进行联合优化。

### 3.3 基于分簇的拓扑重构方法

此类方法通常考虑分层的无线网络,网络中的所有节点都在无障碍的开放区域中移动。具有较大传输范围的节点被分配为簇头(cluster heads, CH),并负责收集和转发消息。其他节点是集群成员(cluster members, CM),它们在CH周围随机部署。CM计算它们与附近的CH之间的欧几里得距离,并加入最近的簇。

文献[11]基于分簇的思想提出了一种拓扑重构的方法。该方法认为网络中不同的CH之间通过CM连接。假设处于连接传输群集和接收群集的两个CM节点为A和B,A在 $t$ 时刻根据卡尔曼滤波器预测自己和B在 $t+1$ 时刻的位置。如果判定A、B在 $t+1$ 时刻的距离大于通信距离,则由A在 $t$ 时刻发起拓扑重构过程,保持与B在 $t+1$ 时刻的连通性,从而保证不同簇之间的连通性。然而,该类方法的显著缺陷是需要知道节点移动模型等先验知识,这对于无人机集群通信网络而言显然是不现实的。



## 4 通信网络拓扑重构关键技术分析

根据前文的分析介绍可知,基于节点移动的网络拓扑重构方法是最适合无人机集群通信网络的。但目前此类拓扑重构方法多是针对无线传感器网络提出的,难以直接应用于节点数量多、密度大,拓扑变化频繁的无人机集群网络。同时,此类方法本身仍然存在诸多核心技术需要进一步的突破,主要包括如下内容。

### 4.1 网络关键节点判定技术

当网络中的节点失效时,根据其角色的不同确定是否执行拓扑重构策略。若失效节点为关键节点,则执行拓扑重构策略恢复网络连通性;否则,网络不进行任何处理继续运行。由此可见,高效准确的关键节点判定方法对于拓扑重构的效率具有重要意义。大规模无人机集群通信网络具有海量的节点,深度搜索和广度搜索等全局遍历方法耗时长,效率低;基于一跳邻居的分布式搜索方法确定出来的关键节点是全局关键节点的概率准确性低。平衡信息获取准确性与网络负载开销是关键节点算法需要关注的重点问题。如何针对无人机集群的特点,设计高效准确的关键节点判定方法,是网络拓扑重构需要研究的关键技术之一。

### 4.2 网络故障诊断技术

网络的拓扑重构可以分为重构触发和重构实现两个阶段。在触发阶段,可以通过拓扑故障诊断完成。在实现阶段,可以通过拓扑重构完成。故障诊断是检测网络异常,确定受损节点的重要手段。故障诊断的效率越高,重构触发的开销也就越小,在高效合理重构实现方案的保证下,才能实现高实时的网络拓扑重构,最小化的减小因网络连通性受损而导致的网络性能下降。目前,国内外的研究主要是集中在有线网络,有很多成熟的方法,如基于神经网络的诊断,基于贝叶斯理论的故障诊断方法等等。对无线网络的故障诊断通常具有较大的延时,如节点多次重传数据失败或在一个周期内没有收到来自邻居节点的“心跳”报告信息<sup>[12]</sup>则有可能表示当前链路失效,需要进行故障诊断。而对无人机集群作战而言,战场态势瞬息万变,实时性要求较高,对延迟的容忍较低。同时,大规模无人机集群通信网络由于覆盖区域广,节点数量众多,受损失效节点类型复杂。因此,大规模无人机集群通信网络的故障诊断也异常困难,是拓扑重构需要研究的关键技术之一。

### 4.3 网络连通性恢复技术

网络连通性恢复方法主要分为两类:一类是对可移动无线网络,通过网络中冗余节点的移动代替失效节点,完成网络连通性自恢复,另一类是通过放置额外的中继节点来恢复网络的连通性。无人机集群作战系统是一种实时性要求较高的系统,放置中继节点恢复网络连通性的方法难以得到保障。因此,无人机集群通信网络更适合于通过网络中冗余节点的移动代替失效节点,完成网络连通性自恢复。但目前此类方法的研究多集中于单个节点失效的情况,而无人机集群作战过程中,经常性的遭遇敌人的蓄意打击而出现节点大面积同时失效的情况,现有的方法难以应对。综上,网络连通性修复技术也是无人机集群通信网络拓扑重构需要研究的关键技术。

## 5 结语

本文从网络拓扑重构技术入手,系统介绍了网络拓扑重构的概念。同时,本文结合拓扑重构的经典算法进行分析,认为基于节点移动的拓扑重构方法更加适合无人机集群通信网络拓扑重构。另一方面,现有的拓扑重构方法多是针对无线传感器网络提出的,难以直接应用于无人机集群中,本文分析了无人机集群通信网络拓扑重构需要在哪些关键技术加以突破,希望为未来无人机集群通信网络拓扑重构提供技术参考和研究方向。

### 参考文献

- [1] Reynolds C W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4):25-34.
- [2] 牛轶峰,肖湘江,柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技, 2013, 34(5):37-43.
- [3] 王杰,田宏安. 无人机融入非隔离空域感知与规避技术[J]. 指挥信息系统与技术,2017,8(1):27-32.
- [4] Bordeaux J. Self-organized air tasking: Examining a non-hierarchical model for joint air operations [R]. SRA International, VA, 2004.
- [5] DARPA. Gremlins[R]. Tactical Technology Office, DARPA-BAA-15-59, 2015.
- [6] 王亮. 综合考虑节点重要度和线路介数的网络重构研究[D]. 北京:华北电力大学, 2010.
- [7] 钟赞,张杰勇,邓长来. 有人/无人机协同作战问题[J]. 指挥信息系统与技术,2017,8(4):19-25.
- [8] 刘洁琳,张德育,付垚,等. WSN中节点通信半径与最

(下转第82页)

12500h~22500h之间则接近威布尔分布,故障多是由系统内设备的使用耗损引起;而在22500h之后,由故障率曲线变化可知,系统故障率不再收敛,并且系统的可靠度基本为0,说明系统连续不间断工作的极限寿命是22500h。而由表3可得,该工程船直流低压系统能够无故障运行的平均时间为8016h,与该船实际运行情况基本一致,说明仿真结果有效。

表3 系统平均故障间隔时间

序号	MTBF(h)	序号	MTBF(h)
1	8019.0	11	8018.2
2	8025.9	12	8010.7
3	8018.7	13	8011.8
4	8022.5	14	8010.7
5	8008.2	15	8024.6
6	8011.7	16	8014.9
7	8021.1	17	8010.1
8	8014.2	18	8026.6
9	8012.9	19	8011.8
10	8022.6	20	8017.3

## 5 结语

本文基于某工程船直流低压系统典型故障的故障树,利用蒙特卡罗仿真原理对该系统进行可靠性仿真分析。通过仿真分析,随着工作时间的延长,该工程船直流低压系统的故障因素逐步由电子电气类故障转变为机械耗损型故障;同时根据仿真结果可得,该系统的MTBF为8016h,按照现阶段该船的使用情况,完全能够满足全年的正常使用。由于计算机的应用,蒙特卡罗仿真方法省去了复杂的数学推导和验算过程,易于理解,比手工算法更加快捷简单。用蒙特卡罗仿真方法研究故障树问题方便而且准确性较高,可以根据故障树的具体结构

选择简单的方式来进行计算,得出系统的各种可靠性指标,为系统可靠性的研究提供参考。

## 参考文献

- [1] 李光辉. 舰船安全性设计技术[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(2):63-66.
- [2] 李军. 舰船典型系统安全性分析评估方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012:15-17.
- [3] 谢里阳, 何雪宏, 李佳. 机电系统可靠性与安全性设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006:84-111.
- [4] 冯静, 孙权. 装备可靠性与综合保障[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2008:39-40.
- [5] 金星, 洪延姬. 系统可靠性评定方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:9.
- [6] 朱永梅, 黄静, 张宇. 基于故障树分析的船用齿轮箱的可靠性仿真[J]. 江苏科技大学学报, 2012, 26(4): 350-355.
- [7] 魏选平. 蒙特卡罗法仿真实例及结果分析[J]. 上海航天, 2002, 19(2):33-36.
- [8] 贾玉双, 史宪铭. 基于故障树模型的系统可靠性分析与仿真[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2001, 23(4): 101-105.
- [9] 马小玲. 基于蒙特卡罗的故障树模型的仿真研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(3):129-133.
- [10] 关北海, 付勇峰, 田相玉. 故障树分析法在齿轮传动装置中的应用[J]. 中国水运(理论版), 2006, 3(1): 107-110.
- [11] 石彬. 基于故障树的EPS系统可靠性及失效模式仿真研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007:11-13.
- [12] 关北海, 付勇峰, 田相玉. 故障树分析法再齿轮传动装置中的应用[J]. 中国水运(理论版), 2006, 3(1): 107-110.
- [13] 王会良, 熊宇权, 孟江. 矿井提升机故障树的蒙特卡罗法仿真[J]. 机床与液压, 2014, 42(21):192-195.

(上接第52页)

- 小发送功率对网络连通性的影响分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(06):41-45.
- [9] 刘林峰, 吴家皋, 邹志强, 等. 面向节点失效问题的无线传感器网络拓扑自愈算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(4):695-699.
- [10] 刘军, 于耕, 张慧鹏. 基于节点控制的空间信息网拓扑重构算法[J]. 电子学报, 2011, 39(8):1837-1844.

- [11] Song X, Zhou L, Zhao H, et al. Localized Fault Tolerant and Connectivity Restoration Algorithms in Mobile Wireless Ad Hoc Network [J]. IEEE Access, 2018, 6: 36469-36478.
- [12] A. Abbasi, M. Younis, K. Akkaya. Movement-Assisted **Connectivity Restoration** in Wireless Sensor and Actor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2009, 20(9):1366-1379.