

分类号	TN929.1
学校代码	10700
学 号	2160320102

西安理工大学

硕士学位论文

(学术学位)

无线紫外光通信协作无人机蜂群分簇方法研究

许 杉

学 科 门 类: 工 学

一 级 学 科: 信息与通信工程

二 级 学 科: 通信与信息系统

指 导 教 师: 赵太飞 教授

申 请 日 期: 2019 年 6 月

独创性声明

本人所呈交的学位论文是在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本人的研究工作和成果的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任

论文作者签名：_____ 2019年6月11日

学位论文使用授权

本人作为学位论文作者了解并愿意遵守学校有关保留、使用学位论文的规定，即：在导师的指导下创作完成的学位论文的知识产权归西安理工大学所有，本人今后在使用或发表该论文涉及的研究内容时，会注明西安理工大学。西安理工大学拥有学位论文的如下使用权，包括：学校可以保存学位论文；可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文；可以查阅或借阅。本人授权西安理工大学对学位论文全部内容编入公开的数据库进行检索。本学位论文全部或部分内容的公布（包括刊登）授权西安理工大学研究生院办理。

涉密的学位论文按照《西安理工大学研究生学位论文涉密认定和管理办法》要求进行密级认定，学校按照密级对学位论文进行分类管理。

保密的学位论文在解密后，适用本授权。

论文作者签名：_____ 导师签名：_____ 2019年6月11日

论文题目：无线紫外光通信协作无人机蜂群分簇方法研究

学科名称：通信与信息系统

研究生：许杉

签名：许杉

指导教师：赵太飞 教授

签名：赵太飞

摘 要

无人机蜂群是由一群自主组网协同作业的小型无人机构成，具有成本低、感知能力好、协作能力强和功能分布化等优良特性，能够极大提高任务执行效率。而在强电磁干扰和复杂大气环境等恶劣条件下，无线紫外光散射通信协作无人机蜂群可实现机间全天候非直视隐秘通信，为无人机蜂群中的信息交互提供有效保障。由于无人机携带能源有限，为尽可能延长留空时间，应提高无人机网络的能量效率和数据传输效率。因此本文针对无人机节点能量同构和异构的情况，研究了机间紫外光通信网络中的负载均衡问题，通过改进分簇算法达到延长无人机网络生命周期的目的。本文主要工作如下：

(1) 针对无人机节点能量同构时无人机蜂群网络的能效问题，研究了机间紫外光通信网络中高效分簇优化算法。基于机间无线紫外光散射链路特性，改进了无人机蜂群网络中分簇算法的簇首选举机制和簇的建立过程，使得簇首选举概率是基于节点剩余能量与网络节点平均能量的比值，并根据距离最优化原则完成簇结构的生成。仿真结果表明改进算法能够明显延长无人机蜂群网络的生命周期，提高网络的数据传输性能。

(2) 在实际应用中，无人机因搭载任务载荷不同而具备不同初始能量，因此需对节点能量异构条件下无人机蜂群网络的分簇控制问题进行研究。本文设计了一种阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略，根据节点不同初始能量对簇首选举概率进行能量加权，并设定阈值有效控制无人机网络中的信息传输量。仿真结果表明该策略能够均衡网络能耗，提高数据传输效率，延长无人机蜂群的网络稳定期。

综上所述，本文主要研究了无线紫外光通信协作下的无人机蜂群分簇控制问题，仿真结果表明改进算法有效平衡了无人机网络的能量消耗，提高了数据传输的高效可靠性，延长了无人机网络寿命。

关键词：无线紫外光通信；无人机蜂群；分簇控制；能耗均衡

*本研究得到国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金(编号：U1433110)，西安市碑林区科技计划资助项目(编号：GX1617)，陕西省教育厅科研计划项目(编号：17-JF024)的资助。

**Title: RESEARCH ON WIRELESS ULTRAVIOLET COMMUNICATION
COLLABORATIVE UAV SWARM CLUSTERING METHOD****Major: Communication and Information System****Name: Shan XU****Signature: Shan XU****Supervisor: Prof. Taifei ZHAO****Signature: Taifei Zhao****Abstract**

The Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm is composed of a group of small UAVs with autonomous networking and collaborative operation. UAV swarm has such excellent characteristics as low cost, good perception capability, strong collaboration and function distribution, which can significantly improve the task execution efficiency. Under severe harsh conditions such as strong electromagnetic interference and complex atmospheric environment, wireless ultraviolet (UV) scattering communication collaborative UAV swarm can realize all-weather, non-line-of-sight and secret communication between UAVs, which provides effective guarantee for information exchange in UAV swarm. Due to the limited energy carried by the UAV, the energy efficiency and data transmission efficiency of UAV network should be improved in order to extend the flight time of UAV as much as possible. Therefore, in view of the energy isomorphism and heterogeneity of UAV nodes, the load balancing problem of UV communication network between UAVs is studied. The clustering algorithm is improved to extend the life cycle of the UAV network. The main works are as follows:

(1) Aiming at the energy efficiency of UAV swarm network when the UAV node energy is isomorphic, the Energy Efficient Clustering Optimization Algorithm (EECOA) of UV communication network between UAVs is studied. Considering the features of wireless UV scattering link between UAVs, cluster head election mechanism and cluster establishment process of clustering algorithm in UAV swarm network are improved. The cluster head election probability is based on the ratio of residual energy of nodes to average energy of nodes, and cluster structure is generated according to the principle of distance optimization. Simulation results show that the improved algorithm can significantly extend the life cycle of UAV swarm network and improve the performance of data transmission in the network.

(2) In practical applications, UAVs have different initial energy due to different mission loads. Therefore, it is necessary to study the clustering control of UAV swarm network under the

condition of node energy heterogeneity. In this thesis, the Threshold Sensitive Energy Balance Strategy (TSEBS) of heterogeneous UAV swarm is designed. The cluster head election probability is weighted according to different initial energy of nodes, and the threshold is set to effectively control the amount of information transmission in the UAV network. Simulation results show that this strategy can balance network energy consumption and load, improve data transmission efficiency, and extend the network stability of UAV swarm.

In summary, this thesis mainly studies the clustering control problem of UAV swarm under the collaboration of wireless UV communication. Simulation results show that the improved algorithm effectively balances the energy consumption of UAV network, improves the efficiency and reliability of data transmission, and extends the lifetime of UAV network.

Key words: Wireless Ultraviolet Communication; UAV Swarm; Clustering Control; Energy Consumption Balance

目 录

1 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 无线紫外光通信网络	2
1.2.2 无人机蜂群分簇机制	4
1.3 本文的主要研究内容	6
1.4 本文的组织结构	6
2 无线紫外光通信与无人机蜂群分簇方法概述	9
2.1 无线紫外光通信基本原理	9
2.2 大气效应对紫外光通信的影响	10
2.2.1 大气吸收作用	10
2.2.2 大气散射作用	10
2.3 无线紫外光通信方式	11
2.3.1 无线紫外光直视通信链路模型	11
2.3.2 无线紫外光非直视通信链路模型	12
2.4 无人机蜂群分簇理论	14
2.4.1 编队控制策略	14
2.4.2 分簇的基本思想	14
2.4.3 分簇算法的分类	15
2.4.4 LEACH 分簇算法	17
2.5 本章小结	18
3 机间紫外光通信网络中高效分簇优化算法	19
3.1 机间紫外光通信链路衰减	19
3.2 无人机蜂群网络模型	20
3.2.1 无人机蜂群通信能耗模型	20
3.2.2 无人机蜂群分簇模型	21
3.3 机间紫外光通信网络中高效分簇优化算法	22
3.3.1 基于能量约束的簇首选举	22
3.3.2 距离最优化成簇	23
3.3.3 数据传输	23
3.4 网络分簇性能评价	24
3.5 结果与讨论	24
3.5.1 算法对比分析	24

3.5.2 算法性能分析.....	26
3.6 本章小结.....	29
4 阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略.....	31
4.1 能量异构的无人机蜂群分簇模型.....	31
4.2 阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略.....	32
4.2.1 能量加权选举簇首.....	32
4.2.2 簇的建立.....	33
4.2.3 阈值约束下的数据传输.....	33
4.3 结果与讨论.....	34
4.3.1 算法对比分析.....	34
4.3.2 算法性能分析.....	37
4.4 本章小结.....	38
5 总结与展望.....	41
5.1 本文总结.....	41
5.2 展望.....	41
致谢.....	43
参考文献.....	45
攻读学位期间主要研究成果.....	51

1 绪论

近年来,以中、美为首的许多国家均开始大力投入无人机蜂群技术的研发,并取得巨大进展^[1,2]。其中无人机蜂群协同^[3]的基础是各机之间保持可靠通信,实时信息共享,但是无人机在飞行过程中会面对强电磁干扰^[4]和复杂大气环境等恶劣条件,这给无人机蜂群通信网络的可靠性带来了很大的挑战,因此采用一种抗干扰能力强的无人机蜂群内部隐秘通信方式是非常迫切的。无线紫外光通信因能满足上述通信需求而被发现和研究,该通信方式具有的独特优点使其成为战术通信时的理想手段^[5]。然而目前对于紫外光通信在无人机蜂群中的应用研究较少,因此需对其进行更加深入的研究和探讨。

1.1 课题研究背景与意义

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是无人驾驶飞机的简称,它是一种可控制、能重复使用、携带多种任务设备执行各种指定任务的有动力空中飞行器^[6]。无人机具有经济实用、机动灵活、可操作性强和生存概率高等独特优势,在民用和军用领域的应用日益广泛,受到了世界各国的青睐。在民用领域,中小型无人机,特别是消费级的小型多旋翼无人机在世界范围内掀起了发展的热潮,在摄影娱乐、农林作业和地理测绘等方面开始广泛应用^[7]。在军用领域,无人机适应未来战争的残酷性、威胁的多样化发展趋势,从干扰、监视与侦察应用开始,逐步渗透到目标打击、通信导航等各个作战领域^[8]。

未来的战场环境日益复杂,夺取信息优势已经成为军事作战指挥中的重要组成部分。在执行侦察、监视或攻击等任务时,单个无人机受到侦察角度、监视范围和攻击精度等多方面限制,影响了作战进程,加大了任务难度。多无人机协同技术极大地扩展了无人机的应用范围,已经成为无人机系统应用的重要发展趋势^[9]。无人机蜂群作为一种全新的作战模式和技术,通过模拟群聚生物的协作行为与信息交互作用,可以自主智能地以整体协同方式完成作战任务^[10],功能相对简单的无人机个体就能够体现出整体优势,完成较为复杂的任务。将群体智能的思想应用到无人机中,多架无人机协作执行任务将带来很多优势:

(1) 通过成员之间的交互确保高质量地完成任务。多无人机相互配合可以提高作战灵活性并降低风险和成本,增加任务完成的可能性。

(2) 通过系统内的动态分配与调度增加任务执行成功率^[11]。无人机多机协同执行任务时,当单架无人机出现故障或者被击毁,导致无法继续执行原有任务,通过动态分配可将该任务交由其他无人机执行,具有极佳的战场生存能力和任务完成能力。

(3) 通过成员间的资源共享扩展执行任务的能力。单架无人机的能力有限,搭载不同任务载荷的多无人机可以通过合作完成复杂的作战任务。

(4) 通过成员的任务分配以及并行协作,减少任务完成时间。多无人机系统由于其并行性,可以充分发挥各无人机的优势,提高任务执行效率。例如,多架无人机可从不同角度完成对目标的全方位攻击,提高机群的整体突防能力和作战效能。

无人机通信网络具有自组织特点,其电子系统极易受到包括电磁脉冲、无线电频率干扰、高强度辐射场等各种自然或人为环境来源的影响,这给无人机通信网络的可靠性带来了很大的挑战^[12],因此需要通过改善通信结构或者改变通信方式来提高无人机间通信链路的抗干扰性和保密性。无线“日盲”紫外光通信主要是采用 200nm~280nm 的紫外光作为传输介质,利用大气分子和气溶胶粒子对紫外光的散射作用进行信息传输的一种新型通信方式,是对现有无线通信方式的重要补充^[13]。本文将无线紫外光通信技术应用于无人机蜂群的机间通信,实现实时信息共享。

无人机蜂群飞行中采用无线紫外光通信技术,其优势主要有如下几点:

(1) 背景噪声小。“日盲”紫外光与射频电磁波不在同一波段,并且被大气中的臭氧分子强烈吸收而难以到达地球表面,使低空空域的无线紫外光散射通信几乎没有背景噪声。

(2) 抗干扰能力强^[14]。紫外光信号本身不受无线电干扰信号的影响,同时也很难实施远距离紫外干扰,适合无人机编队内部隐秘通信。

(3) 全天候非直视(Non-Line-of-Sight, NLOS)通信^[15]。“日盲”区波段的紫外光在低空区域辐射很少,因此紫外光通信系统可以全天候工作。无线紫外光信号以散射方式进行宽视场非直视通信,弥补了其他无线光通信系统在直视方式下工作的不足。

(4) 低功耗易于集成。无线紫外光通信系统常采用重量轻、体积小、功耗低的 LED 为光源,设备便于微型化,易于机载集成。

在实际飞行中,受限于无人机自身的设计尺寸和重量,无人机所携带的能源通常是有限的,从而限制了无人机蜂群的留空时间,影响了多无人机协同系统的信息共享、任务整合和资源优化^[16]。在高度信息化战场环境下,为了提高无人机蜂群侦察监视任务的完成质量,应尽可能延长无人机网络的生命周期,使无人机能够采集到更多的战场信息,为作战进程提供可靠的情报支持。同时为提高现代战争中的应用优势,集群中的无人机常因携带不同任务载荷而配备不同的能量资源,此时就会出现节点能量的异构^[17]。因此本文使用无线紫外光通信技术实现无人机蜂群内部的可靠隐秘通信,采用分簇方法简化无人机蜂群网络结构,通过改进分簇过程均衡网络能耗,提高无人机网络的能量效率,保障数据高效可靠传输。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 无线紫外光通信网络

紫外光通信作为一种新型无线光通信技术,因其独特优势和良好的应用前景而备受关注。本文拟将紫外光通信应用于无人机蜂群内部的信息交互,因此主要关注无线紫外光通信网络特性的研究。

1985 年,美国海军海洋系统研究中心的 M.Geller 等人研制出了相对成熟的“日盲”紫外光通信系统,可实现通信速率为 1.2kbit/s 的短距离通信,直视和非直视通信方式下最大通信距离分别可达 3km 和 1km^[18]。

为满足战术通信要求,2000年美国GTE公司研制出一套新型隐蔽式紫外光通信系统,该系统的直视通信距离为5km~10km,非直视传输距离为1km~3km,并且传输速率提高到了4.8kbit/s,误码率低至 10^{-6} ,可在多种近距离抗干扰环境中实现通信^[19]。

2006年,D.Kedar等人提出了NLOS紫外光无线传感器网络的数学模型,评估分析了节点间链路性能^[20],同时研究了多址干扰问题以及克服方法^[21,22],并在2009年讨论了无线紫外光通信应用于水下无线传感器网络的可行性^[23]。

2011年,希腊雅典大学的A.Vavoulas等人研究了当节点服从均匀分布时,不同调制方式和噪声模型下非直视无线紫外光网络的连通特性,并仿真分析了节点密度、发射功率、数据速率等参数对网络连通性的影响^[24]。A.Vavoulas等人还于2011年对不同调制方式下无线紫外光串行多跳网络的孤立节点概率问题进行了探讨^[25]。

2010年以来,美国加州大学与美国陆军研究实验室联合对紫外光组网进行了一系列研究。2010年Y.Li等人设计了一种基于紫外光特性的MAC(Media Access Control)协议,仿真表明该协议能够实现空分复用,有效减少冲突,提高网络吞吐量^[26]。L.Wang等人于2010年提出了无线紫外光网络中的邻居发现协议,协议中轮流选择领导节点作为当前唯一允许执行邻居发现的节点,该节点对发现过程进行管理来消除随机访问引起的冲突,仿真结果证明该协议能有效减少邻居发现过程所需时间^[27]。2011年Y.Li等人提出了一种基于紫外光自组网的邻居发现协议,考虑到紫外光信道独特的传播特性,从节点方向同步和方向不同步两方面对协议进行了分析讨论,并通过大量仿真评估了协议性能^[28]。

2017年,M.H.Ardakani等人研究了一种具有解码转发的多跳紫外光通信系统,并分析了该系统在服从对数正态分布的湍流信道下的中断概率。结果表明,只考虑增加中继数量不一定会提高系统性能,在中继节点数量较多时,需选取合适的发射仰角和接收仰角,以保证传输性能优于直接传输方式^[29]。2018年R.Ali等人讨论了解码转发协议下NLOS紫外光并行通信模型,进一步研究了基于信道状态信息的最佳中继选择技术^[30]。M.H.Ardakani等人还于2017年研究了一种中继协作下基于正交频分复用的紫外光通信系统,并通过优化功率分配提高了系统性能^[31]。

我国在紫外光通信方面也有丰富的研究成果。作为国内最早开始从事紫外光通信领域研究的单位,1999年北京理工大学利用紫外低压充气汞灯实现了500m内的非直视紫外光通信。2003年,蓝天等人利用大气模型LOWTRAN模拟分析了大气的紫外传输特性^[32]。2007年,唐义等人推导得到了强度调制/直接探测方式下紫外光通信系统的接收光功率表达式,利用大气模型MODTRAN分析了不同因素对大气透射比衰减的影响^[33]。

2011年,中国科学院的刘润彬等人针对紫外光非直视通信系统的信道估计问题,采用最小均方算法研究了系统的信道脉冲响应,明显改善了系统的误码率性能^[34]。

北京邮电大学的刘金龙等人在2011年比较了多种调制方式下紫外光通信系统的发射功率和频带利用率^[35]。2011年,H.Xiao等人率先提出了任意非共面紫外光单次散射传输模型,并分析了不同参数设置下该模型的路径损耗性能^[36]。2013年,吴朝辉等人设计了

一种适用于紫外光通信的 MAC 层功率控制机制,降低节点能耗并且减少节点间干扰^[37]。

西安理工大学于 2009 年开始对紫外光通信技术进行研究,柯熙政、赵太飞团队对无线紫外光通信网络中的路由算法^[38]、节点覆盖范围^[39]、节点定位算法^[40]、快速信道分配算法^[41]等方向进行了探究。并于 2015 年采用无线紫外光喷泉码引导方法增强通信可靠性,实现了直升机的快速可靠定位和安全降落^[42],在 2018 年对无人机编队中机载紫外光网络的连通特性进行了分析^[43],有利于无线紫外光技术的应用研究。

2016 年,空军工程大学张曦文等人采用紫外光非直视通信方式,建立了分簇式无人机通信网络模型,并采用多信道通信有效改善了机间紫外光定向通信时的“耳聋”问题,同时提高了网络吞吐量,改善了网络整体性能^[44]。

除此之外,清华大学、国防科技大学、东南大学等众多高校和研究所也在紫外光通信领域的研究中取得了一定成果。

1.2.2 无人机蜂群分簇机制

生物系统中生物种群的数学建模、协调控制策略的选取、群体目标的动态分析等各方面的研究进展对无人机蜂群的发展有极大的促进作用。无人机蜂群作为未来无人机发展的主要趋势,涉及到集群控制与群体智能、集群感知与信息融合、任务规划与航迹规划等多领域研究。通过模拟细菌迁移、蚁群觅食、蜂群寻蜜、鸟群迁徙等生物群体协作行为,无人机蜂群可采用合适的自主控制算法,使整个无人机系统呈现出协调有序的智能行为。生物群与无人机蜂群的对照关系如表 1-1 所示。

表 1-1 生物群与无人机蜂群的对照关系

Tab.1-1 The comparison relationship between biota and UAV swarm

	生物群	无人机蜂群
行为主体	生物个体	无人机
行为空间	活动空间(食物区域、巢穴等)	任务区域(搜索或侦察区域等)
具体行为	觅食、归巢、洄游、捕猎等	聚集、编队飞行、搜索等

1987 年, C.W.Reynolds 根据生物群体的动态行为建立了群体蜂拥模型,并提出了个体运动需遵循的三条行为规则:分离性、聚合性和速度匹配,使得群体内所有个体能够同时完成避撞、集结和速度保持^[45]。该群体蜂拥模型一直被后来的研究者们所沿用。

布鲁塞尔自由大学的 F.Mondada 等人基于对蚂蚁、蜜蜂行为的研究,首次提出了经典的蚁群优化算法,为复杂组合优化问题的求解开拓了新的思路。2005 年, F.Mondada 等人成功搭建了群体机器人实验平台,开展了对群体机器人自组织的研究^[46]。

2010 年, 匈牙利罗兰大学 T.Vicsek 及其团队通过对鸽群飞行数据的分析,发现鸽群飞行机制中具有独特的层级行为,存在着“引领-跟随”的关系^[47]。基于此,该团队在 2014 年首次实现了无需中心节点控制的无人机集群分布式自主飞行,完成了无人机编队自主避障、队形保持和队形重构等任务^[48]。

2013 年, 宾夕法尼亚大学的 N.Roy 等人开发的多无人机系统只需一名操控员指挥,并能自主实现多机协同、轨迹规划、规避障碍等功能,群体系统具有较强的控制稳定性和

环境适应性^[49]。

2018 年, T.Zhang 基于鸟类集群和觅食行为的启发, 在“领航者-追随者”模式下, 使无人机集群基于人工势场法完成机间避碰与保持, 结果表明无人机集群能够在不同飞行轨迹中保持飞行方向和速度一致, 增强了无人机编队结构的稳定性^[50]。

在无人机蜂群组网中, 分簇机制能够简化拓扑结构, 实现空间资源复用, 提高网络续航能力, 是改善网络性能的有效手段之一。针对无人机蜂群高密度、高协同的特性, 国内外专家学者相继对无人机蜂群分簇协作机制展开了研究。

2009 年, R.K.Sharma 等人提出了一种无需中央决策就能实现无人机避碰的分散自主决策方法, 利用群体聚类规律研究了群体和个体两种类型的避碰问题, 但实现避碰后的无人机集群会很大程度偏离初始路径^[51]。

针对多无人机在不确定环境下的任务分配问题, 2010 年 S.Tang 等人综合集中式和分布式系统的优点, 提出了一种基于分簇结构的协同任务分配方案, 簇间的分布式任务协作和簇内的集中式任务分配可有效减少目标冲突, 并且采用基于拍卖的簇间任务协作以平衡任务负载^[52]。

2016 年, Y.Yu 等人针对传统分簇算法不适用于高动态大规模自组织无人机网络的问题, 提出了一种基于综合移动预测的分簇算法。算法利用信号特征预测机间的综合相对移动性, 进而利用机间产生的综合稳定性, 有效地进行簇的形成和维护。结果表明该算法能够使分簇结构更加稳定, 并降低了簇结构重构带来的控制开销^[53]。

2017 年, J.H.Park 等人为确保无人机编队有足够的飞行时间与地面控制站保持稳定连接, 讨论了面向任务的飞行自组织网中的簇首选择方案, 结果表明选择合适的簇首对多无人机系统的能效至关重要^[54]。

2018 年, H.Wu 等人提出了一种以用户为中心的协同无人机聚类方案, 通过选取最优系统参数来最大限度提高协同无人机集群辅助地面蜂窝网络的覆盖性能, 研究结果可为未来机载网络协调配合地面蜂窝网络通信提供理论依据^[55]。

单无人机向多机协作系统演进已成为必然的发展趋势, 多无人机协作可以很好地实现优势互补, 提升编队整体执行效能。

2005 年, T.Shima 等人将无人机多任务分配问题归结为组合优化问题, 考虑任务优先级、时间约束和飞行轨迹等多方面需求, 采用遗传算法有效降低了传统组合优化方法的计算复杂度^[56]。

多无人机协同作战可以充分发挥作战效能, 提高战场生存概率。2012 年, D.Cai 等人从队形保持、防撞避障和基于行为的编队飞行控制三个方面描述了无人机编队动态飞行控制方法, 该方法降低了无人机对数据更新速率的要求, 提高了无人机的避障能力, 可为无人机协同低空突防提供参考^[57]。

2015 年, B.Di 等人提出了一种多无人机协同监视场景下的控制系统框架, 该框架由网络拓扑控制层和运动规划层两部分组成。前者调节网络拓扑结构, 保持网络的连通性,

后者用于规划无人机的运动，使得无人机在避碰约束下实现覆盖区域最大化与网络性能最优化的权衡^[58]。

2017 年，Z.Liu 等人以最短攻击用时和最小集群规模为目标，提出了未知环境下异构多无人机联合编队算法，研究了通信协议中每跳延时和最大跳数对任务平均完成时间以及集群建立的影响^[59]。

2018 年，L.Huang 等人针对资源约束下多类型无人机任务分配问题，提出了一种基于交叉熵的多无人机协同任务分配方法，并仿真验证了该方法的可行性和有效性，此方法因考虑到不同类型无人机的资源有限性，对多无人机在实际应用中的任务分配问题有一定指导意义^[60]。

无人机蜂群作为未来无人机发展的重要分支之一，其拓扑稳定性、任务完成度和网络生存性等多方面问题被越来越多的人关注研究。无人机网络的生存性作为无人机各方面研究分支的基础，应是无人机蜂群在飞行环境下首要考虑的约束条件。而分簇方法作为有效的节能手段，能够提高无人机节点能效，延长无人机蜂群网络寿命。

1.3 本文的主要研究内容

本文利用无线紫外光通信技术完成无人机蜂群中机间的可靠隐秘通信，在考虑紫外光通信链路衰减的基础上，分别讨论了节点能量同构和异构的情况下，无人机蜂群分簇算法中无人机网络的能量效率和数据传输效率。具体研究内容如下：

(1) 机间紫外光通信网络中高能分簇优化算法

针对蜂群无人机节点能量同构的情况，建立了同构无人机蜂群网络分簇模型，并在无线紫外光通信能耗模型的基础上讨论了机间通信时的能量消耗。通过改进分簇算法中簇首选举机制及簇的建立过程，延长网络生命周期，提高网络的数据传输效率，同时讨论了数据包长度和无人机节点密度对网络性能的影响。

(2) 阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略

无人机在实际应用中因任务载荷不同会搭载不同初始能量，因此需对节点能量异构条件下无人机蜂群网络的分簇控制问题进行研究。本文介绍了异构无人机蜂群网络分簇结构，根据节点不同的初始能量值对簇首选举概率进行能量加权，并通过设定阈值来有效控制无人机网络中的信息传输量，从网络异构性、死亡节点数、网络剩余能量和数据传输量等多个方面对该策略下异构无人机蜂群的网络性能进行了分析讨论。

1.4 本文的组织结构

本文包含 5 章，章节的具体安排如下：

第一章：介绍了无人机蜂群分簇控制研究的必要性，阐述了将无人机蜂群与无线紫外光通信技术相结合的优越性，分析了本课题相关技术的国内外研究进展，并概括介绍了论文的主要研究内容和文章结构安排。

第二章：介绍了关于无线紫外光通信基本原理、传输特性、链路模型的相关理论基础，

并论述了编队控制策略分类、网络分簇的基本思想及分类和经典分簇算法，为后续工作的开展做铺垫。

第三章：研究了机间紫外光通信网络中高能效分簇优化算法。从簇首选举和簇的建立两方面对网络分簇过程进行优化，提高了无人机蜂群分簇通信时的能量效率和传输效率，并讨论了传输数据包长度和节点密度对无人机网络生命周期的影响。

第四章：针对节点能量异构条件下的无人机蜂群网络，设计了阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略，均衡网络能耗并提高传输效率。该策略优化了簇首选举过程，设定阈值有效控制了无人机网络中的信息传输量，并从网络异构性、死亡节点数、数据传输量等方面分析了网络性能。

第五章：对无线紫外光通信协作无人机蜂群分簇课题的主要内容进行了简要总结，并指出了下一步的工作展望。

<此页空白>

2 无线紫外光通信与无人机蜂群分簇方法概述

本章介绍了本课题所涉及到的相关基础理论知识，主要包括无线紫外光通信基本原理及传输特性、无线紫外光通信方式分类、网络分簇的基本思想及分类和经典分簇算法的介绍。

2.1 无线紫外光通信基本原理

太阳辐射的波长范围可分为紫外光区、红外光区和可见光区三个主要区域。紫外光(Ultraviolet, UV)波长介于 10nm~455nm 之间，具体分为 UV-A(315nm~400nm)，UV-B(280nm~315nm)，UV-C(100nm~280nm)^[61]，紫外光光谱分布图如图 2-1 所示。

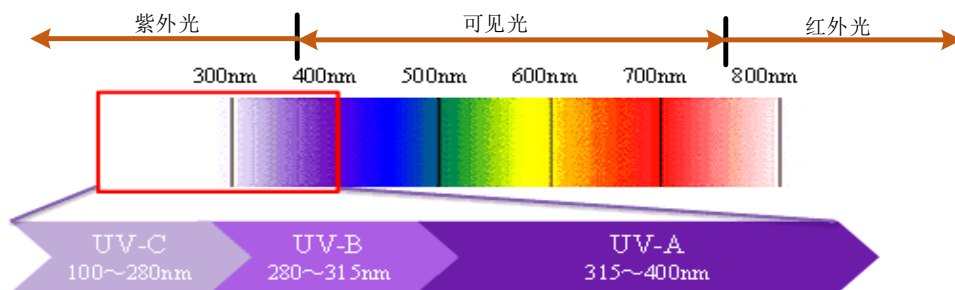


图 2-1 紫外光光谱分布图

Fig.2-1 Spectrum distribution of UV

工作在“日盲”波段(200nm~280nm)的无线紫外光通信系统可以近似认为无背景干扰噪声^[13]。紫外光通信示意图如图 2-2 所示^[62]。紫外光通信作为基于大气散射和吸收的无线光通信技术，利用大气的散射作用进行信息可靠传输，与无线射频通信方式相比，具有全天候、非直视、不受射频干扰和隐秘通信等优势，能为无人机蜂群在复杂地形和特殊环境中的信息交互提供有效保障。

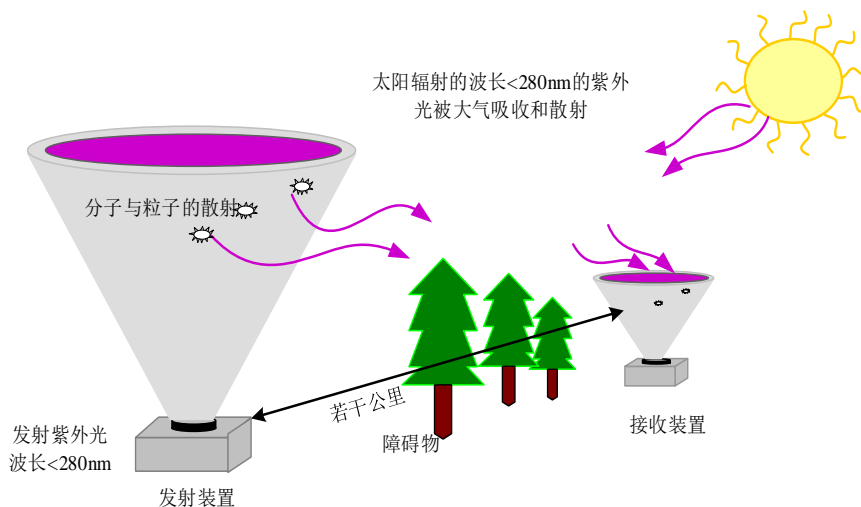


图 2-2 紫外光通信示意图^[62]

Fig.2-2 Schematic diagram of UV communication^[62]

2.2 大气效应对紫外光通信的影响

紫外光在大气中进行无线传输时，复杂多变的气候条件会对其通信质量和传输范围造成很大的影响。大气吸收和散射作用导致紫外光在传输方向上的能量衰减，是影响大气信道中紫外光信号传输特性的主要因素。

2.2.1 大气吸收作用

紫外光穿过大气时受到多种大气成分的吸收，从而导致光束能量的衰减。大气吸收分为大气分子吸收和悬浮颗粒吸收，主要吸收体包括水汽、臭氧、雾霾和烟尘等，并且大气粒子对不同入射光波的吸收具有一定的选择性。其中臭氧分子对紫外光的吸收能力最强，并在紫外光波长为 200nm~280nm 的谱段有强吸收带，因此臭氧浓度是影响无线紫外光通信质量的直接因素。Tanaka 等人提出了紫外光波段在 266nm 处臭氧吸收系数 $k_a(\text{km}^{-1})$ 的表达式如下^[63]：

$$k_a|_{266\text{nm}} = 0.025 \cdot C(\text{O}_3) \quad (2-1)$$

其中， $C(\text{O}_3)$ 为大气中的臭氧浓度，单位为 ppb(parts per billion)，通常地面的臭氧浓度变化范围为 25ppb~75ppb。

大气吸收作用虽然会导致紫外光在大气传输过程中产生信号衰减，影响了无线紫外光通信距离和通信质量。但正是因为大气对紫外光信号的吸收作用，使得传输范围之外的信号很难被拦截或捕获，充分体现了紫外光隐秘传输的优点，因此无线紫外光通信在未来军事通信领域中有着极高的应用价值。

2.2.2 大气散射作用

紫外光利用大气粒子的散射作用进行信息传递，大气分子和气溶胶粒子作为大气中的主要散射体，两者的散射作用使大气传输中的紫外光信号多次改变方向，从而绕过障碍物被接收端探测器接收。两种主要散射体具有不同的散射特性，大气粒子尺寸与紫外光波长越接近时对紫外光散射作用越强。其中大气分子的尺度远小于紫外光波长，会产生典型的瑞利散射；而气溶胶粒子的尺度远大于紫外光波长，则会产生米氏散射。瑞利散射在晴朗天气中起主导作用，但是在雾霾、降雨和降雪等恶劣天气条件下，则主要考虑米氏散射。

(1) 瑞利散射

瑞利散射又称为分子散射，是由光子和气体分子的弹性碰撞形成的，不存在能量消耗。该散射过程中大气分子的尺度远小于紫外光波长，因此可用小粒子近似即瑞利近似处理，其散射系数可表示为^[64]：

$$K_{\text{SR}} = \frac{8\pi[n(\lambda)^2 - 1]}{3N_A^2\lambda^4} \times \frac{6 + 3d(x)}{6 - 7d(x)} \quad (2-2)$$

其中， $n(\lambda)$ 为大气折射率， λ 为波长，且 $n(\lambda) = \frac{0.05791817}{238.0185 - \lambda^{-2}} + \frac{0.00167909}{57.362 - \lambda^{-2}} + 1$ ， N_A 为散

射体粒子浓度，且 $N_A = 2.686763 \times 10^{19} \text{ mol/cm}^3$ ， $d(x)=0.035$ 。

散射相函数是描述紫外光散射特性的基本参量之一，瑞利散射相函数可用来描述散射能量的角分布，可表示为^[65]：

$$P_R(\theta_s) = \frac{3[1+3\gamma+(1-\gamma)\cos^2(\theta_s)]}{16\pi(1+2\gamma)} \quad (2-3)$$

其中， γ 为与波长有关的模型参数， $\theta_s \in [0, \pi]$ ，为散射角。瑞利散射相函数关于 $\theta_s = 90^\circ$ 对称并取得最小值，表明前向散射和后向散射光强较强。

(2) 米氏散射

大气气溶胶粒子对紫外光的散射作用可利用米氏散射理论来进行分析，结合大气能见度对散射作用的影响，米氏散射的散射系数可表示为^[66]：

$$K_{SM} = \frac{3.91}{R_v} \times \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q \quad (2-4)$$

其中， R_v 为大气能见度，单位是 km； $\lambda_0 = 550\text{nm}$ ； q 为修正因子，其大小与大气能见度 R_v 有关。

在大气传输模拟中米氏散射相函数可采用综合考虑前后向两种散射的修正 Henyey-Greenstein 函数表示^[67]：

$$p_{HG}(\theta_s, g) = \frac{1-g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1+g^2-2g\cos\theta_s)^{3/2}} + f \frac{0.5(3\cos^2\theta_s-1)}{(1+g^2)^{3/2}} \right] \quad (2-5)$$

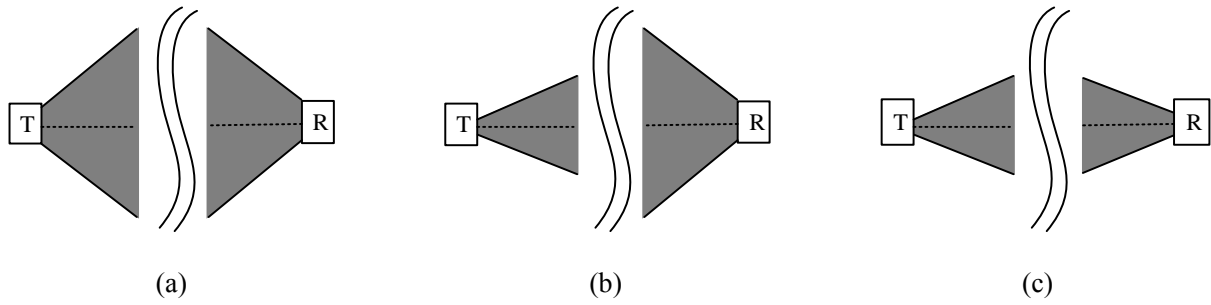
其中， θ_s 为散射角， g 为不对称因子， f 为散射因子。当 $\theta_s < 60^\circ$ 时，不对称因子与相函数呈正比趋势，当 θ_s 继续增大时，相函数却随着不对称因子的增大呈下降趋势。

2.3 无线紫外光通信方式

无线紫外光通信根据传输方式不同，可分为直视(Line-of-Sight, LOS)通信和非直视通信两种工作方式。紫外光通信在实际应用中主要利用其独特的散射特性实现 NLOS 通信，具有低窃听率、低位辩率、全方位性以及无需捕获、对准和跟踪等特点，能够满足复杂的战场环境中无人机的可靠隐秘通信需求。

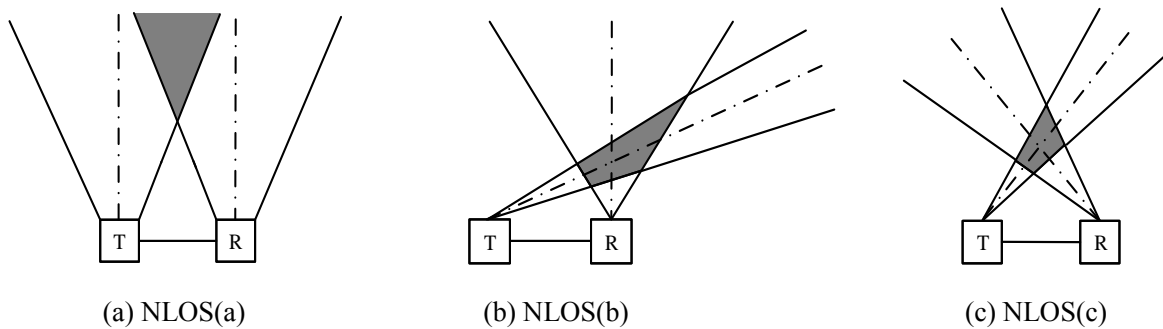
2.3.1 无线紫外光直视通信链路模型

紫外光直视通信链路中发射端与接收端之间不存在障碍物。由于“日盲”紫外光在通信传输时有较大的衰减，发射光束发散角和接收视场角也是影响紫外光通信质量的主要因素。根据发散角和视场角的不同大小，可将无线紫外光直视通信分为三种链路模型，如图 2-3 所示^[62]。图 2-3(a)为宽发散角发送-宽视场角接收；图 2-3(b)为窄发散角发送-宽视场角接收；图 2-3(c)为窄发散角发送-窄视场角接收。通常情况下，直视通信链路中的衰减和失真均小于非直视通信链路，因此，直视通信的信道容量要大于非直视通信。

图 2-3 直视紫外光通信^[62]Fig.2-3 LOS UV communication^[62]

2.3.2 无线紫外光非直视通信链路模型

无线紫外光非直视通信是指在大气传输过程中，紫外光的散射特性使得光信号可以绕开收发两端之间的障碍物到达接收端的通信模式。根据收发机光轴和水平轴之间夹角的不同可将紫外光 NLOS 通信分为 NLOS(a)，NLOS(b)和 NLOS(c)三种方式，如图 2-4 所示^[62]。其中图 2-4(a)为 NLOS(a)类通信方式，图 2-4(b)为 NLOS(b)类通信方式，图 2-4(c)为 NLOS(c)类通信方式。

图 2-4 非直视紫外光通信^[62]Fig.2-4 NLOS UV communication^[62]

通过调整收发仰角可以转换三种工作方式，并且可转换为直视通信。表 2-1 为三种不同非直视通信方式下的性能对比^[68]。

表 2-1 NLOS 紫外光通信不同配置方式比较^[68]Tab.2-1 NLOS UV communication in different configurations^[68]

NLOS 三种通信方式	发射端仰角(°)	接收端仰角(°)	全方位性	通信直线距离(km)	有效散射体积	通信带宽
NLOS(a)	90	90	最好	1	无限	最窄
NLOS(b)	<90	90	较好	1.5~2	有限	较宽
NLOS(c)	<90	<90	差	2~2.5	有限	宽

非直视无线紫外光散射通信中光子主要以单次散射到达接收端，因此本文以单次散射链路模型作为研究对象。图 2-5 为非直视紫外光通信单次散射模型^[69]， T_x 为发射端，发散半角为 θ_1 ，发射仰角为 β_1 ，发射端偏轴角为 φ_1 ； R_x 为接收端，接收视场角半角为 θ_2 ，接收仰角为 β_2 ，接收端偏轴角为 φ_2 ； V 为有效散射体体积； θ_s 为散射角； r 为通信距离， r_1 和 r_2 分别为发射端到有效散射体的距离和有效散射体到接收端的距离。紫外光信号由发

射端 T_x 发出，经各向同性介质散射和吸收后到达距离为 r_1 处的散射体 V ，再由散射体 V 散射后被距离为 r_2 处的接收端 R_x 接收。

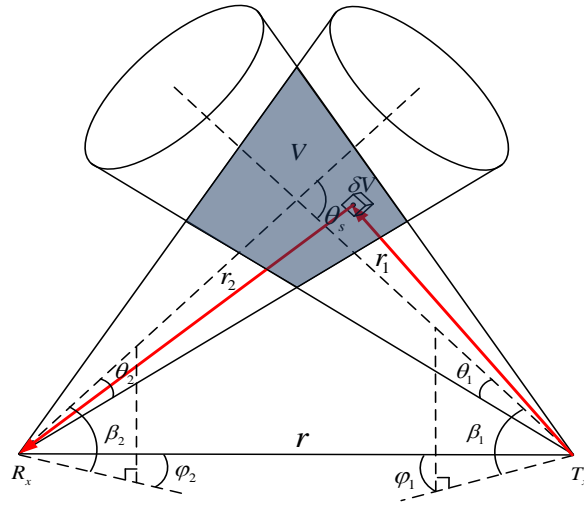


图 2-5 非直视紫外光通信单次散射模型^[69]

Fig.2-5 NLOS UV communication single scattering model^[69]

单次散射模型近似忽略了多次散射作用的影响，而在研究较远距离的紫外光通信时，需考虑多次散射传输模型。如图 2-6 所示为非直视紫外光通信多次散射模型^[70]，其中 S_n 表示光子发生 n 次散射的散射点。初始能量为 E_t 的紫外光脉冲信号经发射端发出，经过 n 次散射后接收端接收到的总能量为^[71]：

$$E_{r,n} = \sum_{i=1}^n E_r(i) = E_t \sum_{i=1}^n P_i \quad (2-6)$$

其中， P_i 表示光子在 S_i 散射点处能指向接收面的概率。

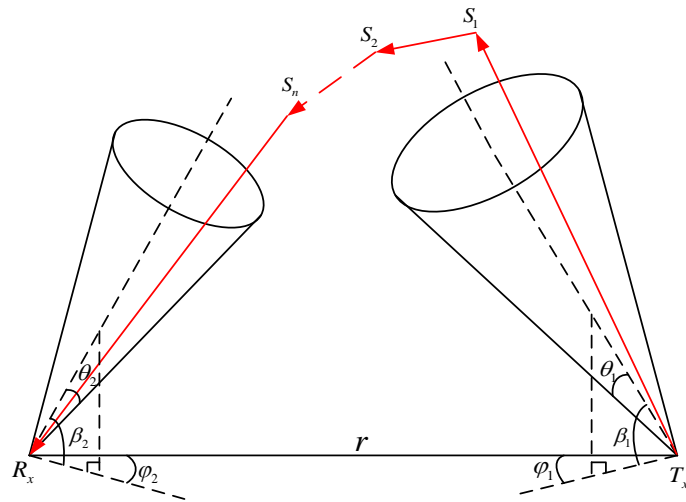


图 2-6 非直视紫外光通信多次散射模型^[70]

Fig.2-6 NLOS UV communication multiple scattering model^[70]

2.4 无人机蜂群分簇理论

2.4.1 编队控制策略

为了使用无人机蜂群进行协同侦察、搜索和打击等任务，蜂群需具备良好的整体行为控制能力，保证其在飞行过程中能够保持蜂群构型的稳定和蜂群成员间距离的安全，因此需对无人机蜂群中的编队控制策略进行讨论研究。无人机编队控制不仅包括编队飞行的队形产生、保持和变化，也要满足编队任务规划和环境约束。基于信息交互的编队控制策略通常分为集中式、分布式和分层式三种方式^[52]。

(1) 集中式控制。如图 2-7 所示，编队中某一架无人机被指定为长机即控制中心，其余无人机作为僚机。所有僚机感知战场态势并将获取信息都传递给长机，长机负责决策和指挥控制其他所有僚机的行为。集中式控制方式具有良好的控制效果，但稳定性较差，且对于无人机节点密度高的编队，其控制算法过于复杂。

(2) 分布式控制。如图 2-8 所示，编队中各无人机处于平等地位，每架无人机与其通信领域内的无人机可以进行位置、速度和姿态等信息的实时交互，充分发挥了无人机的自主性。与集中式控制方式相比，分布式控制中的无人机编队更加稳定，具有很强的鲁棒性和容错性，但控制效果相对较差。

(3) 分层式控制。该控制方式综合了集中式和分布式两种控制方式的优点，能够实现无人机个体自主与集中指挥的优势互补。所有无人机在逻辑上形成分层递阶结构。将无人机蜂群看作一个团队，然后将此团队划分为若干个子团队，在子团队中继续划分子团队，将作战任务递阶分解，逐级细化，直至满足任务要求为止。分层递阶结构能够降低无人机蜂群中高密度节点带来的复杂性。

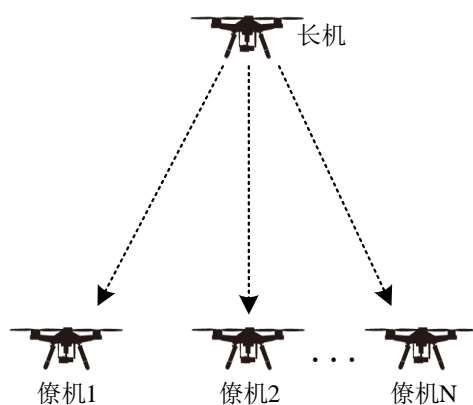


图 2-7 集中式控制

Fig.2-7 Centralized control

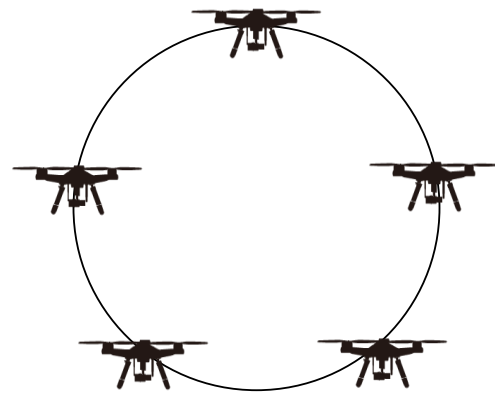


图 2-8 分布式控制

Fig.2-8 Distributed control

2.4.2 分簇的基本思想

分簇控制是分层式控制方式中典型且有效的表现形式之一。良好的分簇方法不仅可以精简网络结构，还能改善网络性能，包括增强网络拓扑的鲁棒性和可扩展性，均衡网络节点能耗，提高数据传输效率等方面^[72]。分簇结构示意图如图 2-9 所示。

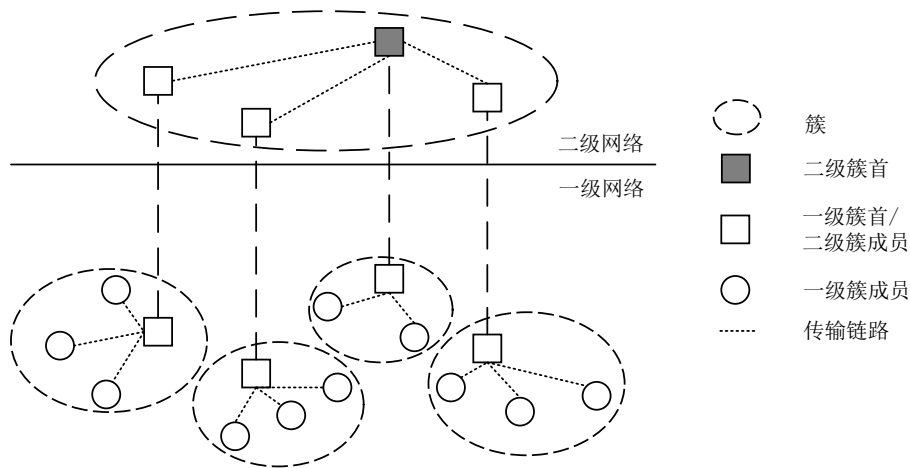


图 2-9 网络分簇结构

Fig.2-9 Network clustering structure

分簇方法结合集中式和分布式两种控制方式的优点，根据一定的算法机制将网络中所有节点划分为多个区域，每个区域代表为一个簇，每个簇内选取某个节点作为簇首，其余节点作为簇成员。簇首是簇内地位高于簇成员的“领导节点”，用于管理或控制整个簇内成员节点，对簇内数据进行收集和融合，最后由簇首节点将融合后的数据传输给汇聚节点^[73]。高一级的簇首可继续采用分层分簇结构，形成更高级别的簇首与成员节点。成员节点则负责将采集数据传输给簇首，不工作的节点可以处于休眠状态以减少能量消耗。

由于要接收、融合以及远距离传输簇内成员的数据，簇首的能耗相对较大，因此分簇算法大多按“轮”进行，即经过一段时间的稳定数据传输后，网络进入新一轮工作周期，重新选取簇首并建立簇结构。分簇实现了网络的区域化管理，对网络的节点能效、生命周期、连通性能等方面的研究有重大意义。根据应用需求对网络进行簇单元划分，选用性能最优的节点作为簇首，并设计出一种高效节能的分簇算法至关重要。

2.4.3 分簇算法的分类

不同的应用场景对分簇的功能需求是不同的，因此国内外专家学者对分簇问题进行了深入的研究讨论，并提出了许多行之有效的分簇算法，以简化拓扑结构，节省路由开支，改善网络各方面性能。主要可从簇的特征、簇首特征及分簇过程三方面对分簇算法进行分类讨论^[74]。

(1) 簇的特征

图 2-10 为分簇算法基于簇的特征的分类。A.簇的形状：基于块的分簇算法将网络划分为簇单元，基于网格时网络管理以相同大小的网格结构为基础，基于链状的则将网络节点组织成符合一定规则的链状拓扑结构；b.簇的数目：簇数目为常量的分簇算法在分簇过程中簇首节点已事先确定，并且簇的数目是固定不变的。当簇首基于随机概率或其他准则选举时，簇的数目则为变量；c.簇均匀性：根据每个簇的规模是否均匀划分可对簇的大小均匀性进行分类；d.簇内及簇间路由：簇内路由和簇间路由均分为单跳和多跳两种方式，主要区别在于是否存在其他节点进行数据转发；e.分簇层数：当选用单层分簇时，网络被

分为簇首与簇成员两层结构，而在多层分簇中，低层簇首可进一步分层分簇，形成更高一级的簇首与簇成员。

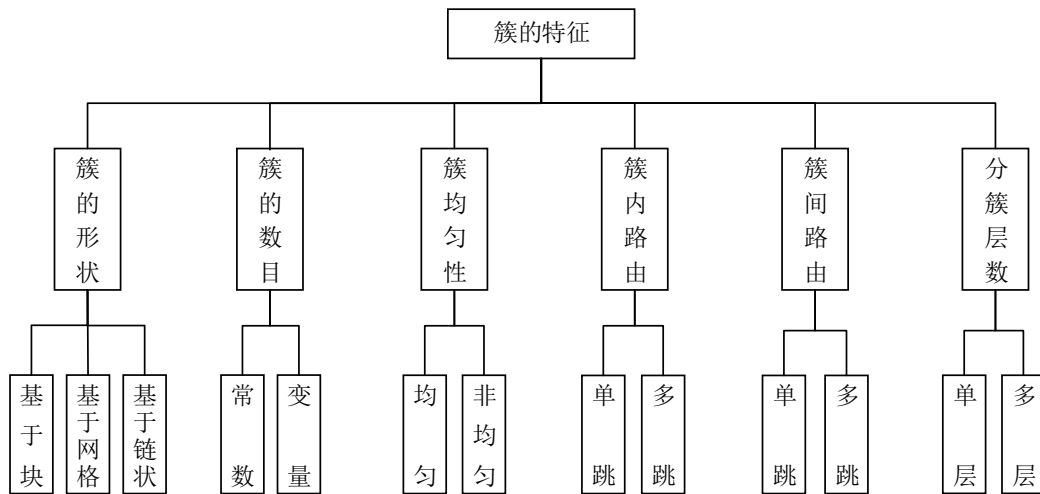


图 2-10 分簇算法基于簇的特征的分类

Fig.2-10 Clustering algorithms classification based on cluster features

(2) 簇首特征

图 2-11 为分簇算法基于簇首特征的分类。A.簇首是否移动：簇首节点移动的情形下，节点间关系是动态变化的，每个簇需对簇结构进行持续维护。簇首节点静止时，簇结构也是稳定不变的，这样的网络更易管理；b.节点能力：同构网络中所有节点属性相同，而在异构网络中节点在初始能量、通信资源和计算能力等各方面具有不同的能力。C.簇首角色：簇首节点根据自身职责可被分为三类，①簇首中转其簇内成员产生的数据，②簇首负责簇内信息收集和数据融合，③簇首担任汇聚节点。

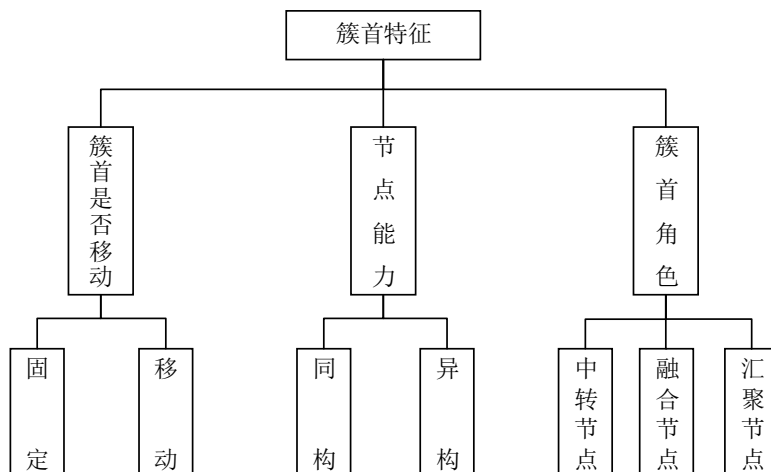


图 2-11 分簇算法基于簇首特征的分类

Fig.2-11 Clustering algorithms classification based on cluster head features

(3) 分簇过程

图 2-12 为分簇算法基于分簇过程的分类。A.簇首竞选参数：确定性分簇机制中，主要根据节点自身属性进行簇首竞选，自适应分簇机制中则选用权重较高的节点为簇首，随

机机制则结合两者优点，根据应用需求在不同机制间相互转换；b.分簇是否主动：在主动型分簇网络中，节点间的路由被预先计算并持续维护。在响应型分簇网络中，只有当数据需要传输时，才会创建一个临时路由；c.执行性质：根据簇建立过程中算法的执行性质，分簇算法可分为基于概率和基于迭代两种形式。分簇算法基于概率时，节点以分布式的方式独立确定自身角色，而基于迭代时，节点需等算法执行一定迭代次数后才能确定自身角色；d.收敛时间：收敛时间为变量的分簇算法其收敛时间与网络中节点数目有关，若收敛时间为常量，则算法在固定数目的迭代次数之后结束；e.分簇策略：静态分簇是指在网络运行初期便建立簇并且不再改变，而动态分簇中簇首需周期性选举，因此耗能较大；f.分簇目标：根据实际应用中的不同功能需求可确定不同的分簇目标，例如网络的容错性、连通性、生命周期等，通常分簇算法会存在多个目标。基于不同设计理念提出的分簇算法可以相互补充，从而满足不同应用环境下的性能需求。

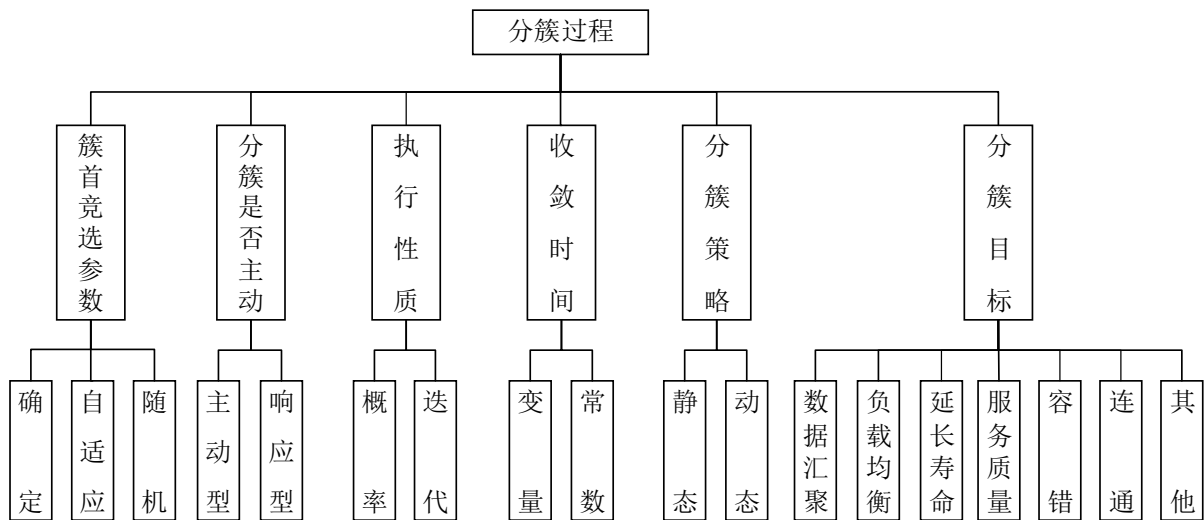


图 2-12 分簇算法基于分簇过程的分类

Fig.2-12 Clustering algorithms classification based on clustering process

2.4.4 LEACH 分簇算法

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)作为最具代表性的分簇算法，于2002年由Heinzelman等人提出，是一种低功耗自适应分簇路由算法^[75]，后续提出的大部分层次式路由协议都是基于该算法而来。LEACH算法按照“轮”的形式进行分簇，首先以随机的方式选举簇首，其次邻居节点在收到簇首广播消息后选择加入相应簇，最后由簇首为其簇成员节点分配通信时隙，进行数据的稳定传输。LEACH以一定概率轮流选举簇首，上一轮为簇首的节点不能在下轮再次当选。

LEACH引入了分层概念和数据融合方法，分层设计能够提高网络的可扩展性并节省路由开支，而数据融合能够减少通信量从而降低传输能耗。同时LEACH采用“轮”的方式选举簇首将能量消耗尽可能均分到各个网络节点，使得网络生存时间得以延长。但LEACH也存在一定的局限性，如簇首位置分布不均时导致传输距离增大，加快了节点能

耗速度；LEACH 中成员节点持续传输采集数据给簇首，数据冗余性较高等。LEACH 分簇算法流程图如图 2-13 所示。

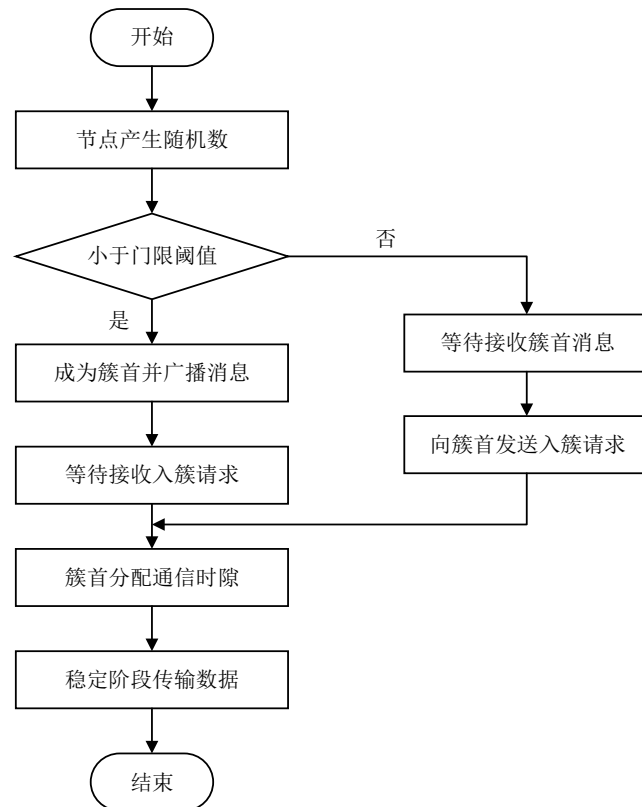


图 2-13 LEACH 分簇算法流程图

Fig.2-13 The flow diagram of LEACH clustering algorithm

2.5 本章小结

通过结合无线紫外光通信技术和无人机蜂群分簇控制能更有效地保障集群通信安全，提高网络性能。本章简单介绍了紫外光通信的基本原理和传输特性，并对紫外光通信方式进行了概述，最后重点对无人机蜂群分簇的基础理论做了详细介绍，为后文研究提供了理论支撑。

3 机间紫外光通信网络中高效分簇优化算法

本章主要针对节点能量同构时无人机蜂群网络中的分簇问题，研究了机间紫外光通信网络中高能效分簇优化算法(Energy Efficiency Clustering Optimization Algorithm, EEEOA)。通过建立无线紫外光通信能耗模型讨论无人机通信能量消耗，从簇首选举和簇的建立两方面对网络分簇过程进行优化，并仿真分析了传输数据包长度和无人机节点密度对网络生命周期的影响。

3.1 机间紫外光通信链路衰减

为了满足无人机蜂群在飞行时的通信需求,本文中无人机间通信选用紫外光 NLOS 类通信方式,该方式下收发仰角均小于 90° ,通信距离最长,传输链路损耗最小,通信带宽最宽^[66],更能满足复杂战场环境中无人机可靠隐秘的通信需求。紫外光在大气中传输时,会受到大气气体分子和气溶胶粒子的吸收和散射作用,导致光束能量衰减。衰减的能量部分被吸收而转变为其他形式的能量,部分被散射而偏离原来的传播方向,吸收和散射的总效果使传输的光辐射强度衰减。以椭球坐标系为基础对单次散射模型进行进一步分析,将紫外光发射装置与接收装置分别安放在椭球坐标系的两个焦点,得到基于椭球坐标系的紫外光单次散射链路模型如图 3-1 所示^[76]。

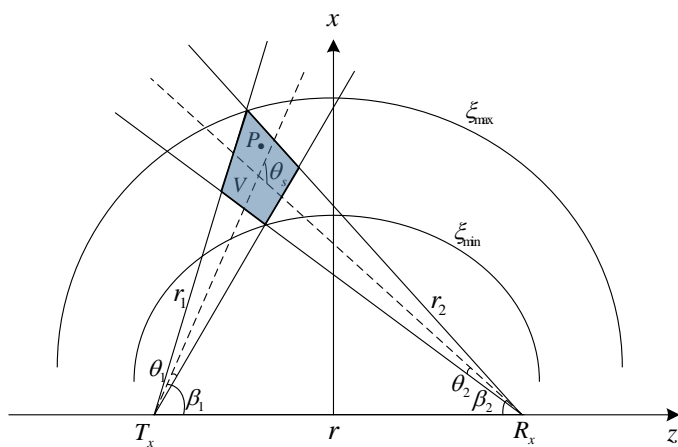
图 3-1 椭球坐标系下紫外光单次散射链路模型^[76]

Fig.3-1 UV single scattering link model in ellipsoid coordinate system^[76]

在 $t=0$ 时刻, 能量为 E_i 的脉冲经 T_x 以发散半角 θ_1 发出, 沿着发射角为 β_1 的方向, 经大气粒子散射和吸收后到达距发射机距离为 r_1 的散射体 V 内一点 P 。将微分体积元 δV 包围点 P 看作一个二级光源, 其单位圆锥角发射的能量是散射角 θ_s 的函数^[76]:

$$\delta R_p = \frac{H_p k_s P(\cos \theta_s)}{4\pi} \delta V \quad (3-1)$$

其中, H_p 为点 P 处能量, k_s 为大气散射系数, $P(\cos\theta_s)$ 为单次散射相位函数。在理论计算中, 通常只考虑瑞利散射, 而忽略悬浮颗粒的米氏散射作用。

接收端总的体积微分能量密度为^[69]:

$$\delta E_r = \frac{E_t k_s P(\cos \theta_s) A_r \delta V \cos(\zeta) \exp(-k_e(r_1 + r_2))}{4\pi \Omega_t r_1^2 r_2^2} \quad (3-2)$$

其中, A_r 为接收孔径面积, ζ 为接收机、微分体积元连线矢量与接收轴的夹角, $\cos(\zeta)$ 用来求接收机探测到的有效面积, k_e 为大气吸收系数, Ω_t 为发射端光束立体角。通过对 δE_r 的积分可得接收总能量 E_r , 此时路径损耗建模为:

$$L = \frac{E_t}{E_r} = \frac{4\pi \Omega_t r_1^2 r_2^2}{k_s P(\cos \theta_s) A_r V \cos(\zeta) \exp(-k_e(r_1 + r_2))} \quad (3-3)$$

由式(3-3)可以看出, 紫外光非直视通信中链路衰减 L 需通过对有效散射体 V 积分求得, V 的求解方法直接影响模型仿真计算的复杂度。由于紫外光 NLOS 通信方式下发射圆锥和接收圆锥的相交体积相对较小, 可采用文献[77]的信道模型, 将相交部分近似为一个圆锥台, 通过大圆锥体积 V_{\max} 和小圆锥体积 V_{\min} 做差求得。具体步骤为: 令 $\zeta = 0$, $r_1 = r \sin \beta_2 / \sin \theta_s$, $r_2 = r \sin \beta_1 / \sin \theta_s$, V_{\max} 和 V_{\min} 的高和半径分别为 $h_1 = r_1 + r_2 \theta_2$, $D_1 = h_1 \theta_1$, $h_2 = r_1 - r_2 \theta_2$, $D_2 = h_2 \theta_1$, 可得 $V = V_{\max} - V_{\min} = (D_1^2 h_1 - D_2^2 h_2) \pi / 3$, 因此路径损耗表达式简化为:

$$L \approx \frac{12r \sin \beta_1 \sin^2 \beta_2 (1 - \cos \theta_1) \exp\left[\frac{k_e r (\sin \beta_1 + \sin \beta_2)}{\sin \theta_s}\right]}{k_s P(\cos \theta_s) A_r \theta_1^2 \theta_2 \sin \theta_s (12 \sin^2 \beta_2 + 4 \theta_2^2 \sin^2 \beta_1)} \quad (3-4)$$

3.2 无人机蜂群网络模型

3.2.1 无人机蜂群通信能耗模型

如图 3-2 所示, 无人机蜂群在飞行中采用无线紫外光通信能量消耗模型。无人机将侦察采集到的信号进行高速调制, 并采用增益调整电路补偿紫外光信号在大气信道中传输时的能量衰减, 最后通过紫外 LED 将信号发射出去。在接收端运用高灵敏度光电检测和信号处理技术, 将调制信号恢复为数据、语音或图像信号。

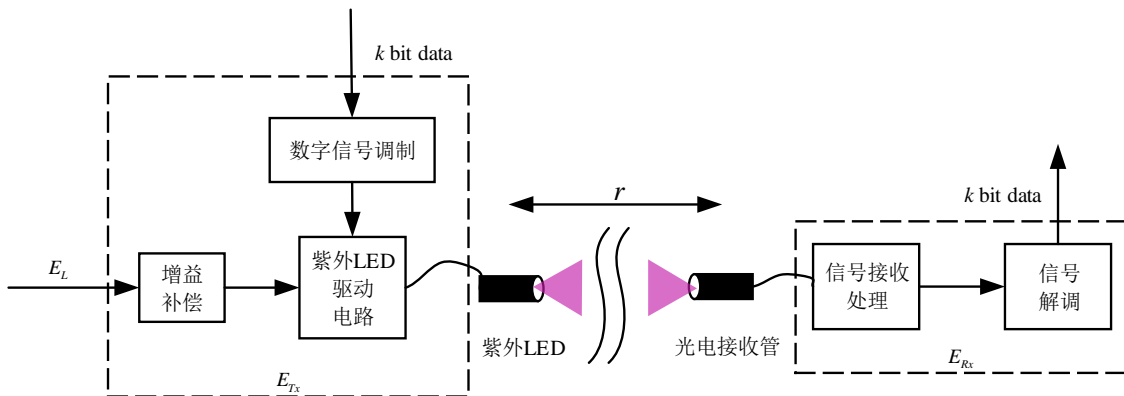


图 3-2 无线紫外光通信能耗模型

Fig.3-2 Energy consumption model of wireless UV communication

无人机在进行无线紫外光通信传输时, 能量消耗主要包括以下 3 部分: 发送数据能耗 E_{Tx} 、接收数据能耗 E_{Rx} 和数据融合能耗 E_A 。根据公式(3-4)可知紫外光 NLOS 通信方式

下的链路衰减 L ，当给定发射脉冲能量 E_t 时，可得发射端为补偿紫外光在大气信道中传输时的能量衰减所消耗的能量为：

$$E_L = \frac{E_t(1-1/L)}{\eta_t} = E_T(1-1/L) \quad (3-5)$$

其中， η_t 为发射端的电光能量转换效率， E_T 为发射端发送单位比特数据消耗的能量。为了使接收到的信号能达到可接受的信噪比，当无人机发送 k bit 数据到距离为 r 的接收端时，节点消耗的能量由发送数据能耗和能量衰减损耗两部分组成：

$$E_{Tx}(k) = k(E_T + E_L) \quad (3-6)$$

无人机节点在接收端接收 k bit 数据消耗的能量为：

$$E_{Rx}(k) = kE_R \quad (3-7)$$

其中， E_R 表示接收单位比特数据消耗的能量。除此之外，由于无人机相邻节点侦察采集的数据冗余程度较大，簇首无人机可以利用这种相关性将其簇成员的数据和自身数据融合成长度固定的数据包后再发送给长机，从而减少传输数据量。簇首节点数据融合过程中的能耗 E_A 为：

$$E_A(M, k) = (M+1)kE_{DA} \quad (3-8)$$

其中， E_{DA} 表示融合单位比特数据的能耗， M 为簇内成员个数。

3.2.2 无人机蜂群分簇模型

无人机蜂群采用“长机-僚机”飞行模式^[78]，每架无人机均挂载一个无线紫外光通信收发装置，并假设无人机之间通信时数据接收方向是已知的。所有僚机节点都是能量同构的，具有相同的资源配置并且地位同等，即都能充当簇首节点或成员节点，每个节点都有一个唯一标识(ID)。如图 3-3 所示为同构无人机蜂群分簇模型。

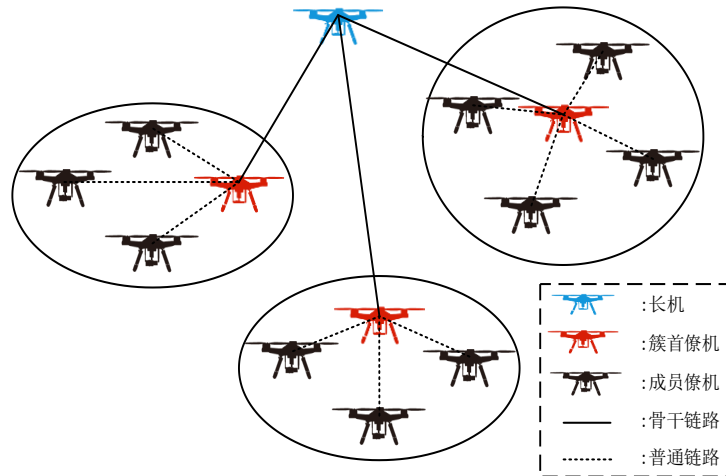


图 3-3 同构无人机蜂群分簇模型

Fig.3-3 Clustering model of homogeneous UAV swarm

当无人机蜂群处于编队保持状态，在分簇的拓扑管理机制下，根据一定的算法机制在

每个簇内选取某个僚机节点作为簇首，用于管理该簇成员节点的状态，收集成员节点侦察采集的信息并进行数据融合压缩，最后由簇首僚机负责与长机通信。成员僚机则主要负责战场侦察及传输数据至簇首僚机。无人机蜂群以“轮”的方式实现分簇，通过周期性的簇首选举和簇结构重组避免簇首僚机能耗过大，从而平衡网络负载。

3.3 机间紫外光通信网络中高效分簇优化算法

为了提高无人机蜂群利用无线紫外光分簇通信时的能量效率和传输效率，本文研究了机间紫外光通信网络中高效分簇优化算法(EEOCA)。EEOCA 按“轮”运行，每一轮包括建立阶段(set-up phase)和稳定阶段(steady-state phase)两部分。无人机节点在建立阶段进行簇首选举并形成分簇结构，稳定传输阶段中各成员节点分别将侦察采集的数据传送至簇首。为了减小成簇开销所占比例，稳定阶段的持续时间通常要大于建立阶段，图 3-4 为 EEOCA 时序图。

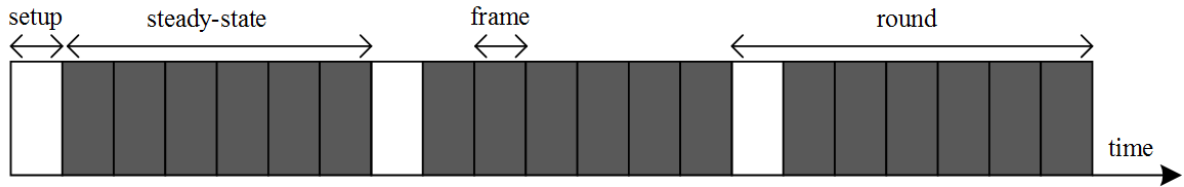


图 3-4 EEOCA 时序图
Fig.3-4 Schedule slot of EEOCA

3.3.1 基于能量约束的簇首选举

LEACH 分簇算法中的簇首选举具有随机性，所有僚机节点平均分担中继业务，每个节点根据一定的概率独立地决定是否成为簇首。选举时，僚机节点 n 随机在 0~1 之间选取一个数作为标志位，若该标志位小于阈值 $T(n)$ ，节点就当选为本轮的簇首节点并发布自己是簇首的公告信息。 $T(n)$ 的表达式为^[79]：

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p_{opt}}{1 - p_{opt}(R \bmod \frac{1}{p_{opt}})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-9)$$

其中， p_{opt} 在初始化时设定，表示簇首节点在所有僚机节点中所占百分比的期望值； R 为当前选举的轮数； G 是在最近 $1/p_{opt}$ 轮中未当选簇首的节点集合。

由于 LEACH 算法是随机选举簇首，簇首在网络中的分布情况无法保证，而簇首分布在一定程度上决定着本轮网络的能耗状况。因此，EEOCA 算法中的簇首选举是基于僚机节点剩余能量与网络中僚机节点平均能量的比值，剩余能量高的节点可优先选举为簇首，平衡节点的能量开销，减小网络能量分布差异。设在第 R 轮中网络僚机节点的平均剩余能量为：

$$\overline{E(R)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i(R) \quad (3-10)$$

其中， N 为网络总节点数， $E_i(R)$ 表示第 R 轮时僚机节点 i 的剩余能量。根据式(3-10)计算

网络节点平均剩余能量时需知道网络中所有僚机节点的剩余能量，会额外增加无人机网络的能量消耗，并且也不易实现，因此 EECOA 采用平均剩余能量的估计值代替网络中实际平均剩余能量。假设僚机节点在每轮中均匀消耗能量，网络生存期为 R_{\max} ，网络的初始总能量为 E_{total} ，可得第 R 轮中僚机节点的平均剩余能量为：

$$\overline{E(R)} = \frac{1}{N} E_{\text{total}} \left(1 - \frac{R}{R_{\max}} \right) \quad (3-11)$$

每一轮中，将各僚机节点的剩余能量与估算得到的僚机节点的平均剩余能量进行比较。如果节点的剩余能量大于网络节点的平均剩余能量，则成为簇首节点的概率增大，反之其选举概率将减少，改进后每个僚机节点的簇首选举概率 p_i 为：

$$p_i = p_{\text{opt}} \frac{E_i(R)}{\overline{E(R)}} \quad (3-12)$$

此时网络的簇首选举门限为：

$$T_i(n) = \begin{cases} \frac{p_i}{1 - p_i (R \bmod \frac{1}{p_i})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-13)$$

僚机节点从 0 到 1 之间抽取随机数作为标志位与 $T_i(n)$ 进行比较，若该标志位小于 $T_i(n)$ ，则该节点在本轮当选簇首。

3.3.2 距离最优化成簇

一轮选举结束后，部分僚机当选为簇首，每个簇首节点将其当选消息广播到周围成员节点。在该过程中，成员节点一直等待接收来自簇首的通知消息，每个成员节点可能会收到来自多个簇首发出的通知消息。为避免簇首位置过偏使得部分簇内节点的通信半径过大，成员节点除了根据接收信号的强弱来选取通信代价 d_c 最小的簇首作为备选簇首，还会考虑自身与长机之间的距离 d_L 。若 $d_c < d_L$ ，则成员节点决定加入该簇，同时发出一个加入请求消息到对应簇首；若 $d_c > d_L$ ，则该成员选择不加入任何簇，而是直接发送侦察数据至长机。

3.3.3 数据传输

网络在稳定运行阶段，簇首节点采用时分复用方式为簇内成员节点分配向其传输数据的时间点^[77]。成员节点负责持续感知战场环境，并在指定的时隙内将采集数据发送给簇首。在不属于自己的发送时隙内，成员节点为减少能量消耗通常会关闭收发机。由于簇首节点需接收来自簇内不同成员节点的数据，其接收机需一直处于开启状态。当一轮数据传输完毕，簇首节点进行数据融合，降低数据冗余性，并将压缩信息发送给长机。簇首僚机需完成数据接收、数据融合、与长机远距离通信等任务，能量开销较大，因此网络进入下一轮时需按照上述方法重新选举簇首和建立簇结构，使各节点相对均衡地消耗能量。

3.4 网络分簇性能评价

分簇控制的目的是延长网络生存时间，分簇控制算法对机间紫外光通信网络能量效率的优化程度可从以下几个方面评价：

(1) **网络生命周期**：指网络从开始正常运行至第一个节点因能量耗尽而死亡所经历的时间。该性能与网络总能量及能耗情况息息相关，是网络管理关键性指标之一。通过均衡网络负载和提高数据传输效率，都可达到延长网络生命周期的目的。下文中统一用稳定期指代网络生命周期。

(2) **网络不稳定期**：指网络出现首个死亡节点至所有节点全部死亡所经历的时间。当网络中不断有节点因能量耗尽失效时，网络拓扑连接会随之发生改变，网络链路处于不稳定阶段，从而影响数据传输效率。

(3) **网络高效期**：指网络从开始正常运行至节点死亡数量超过一半所经历的时间。高效期内网络还能够保持较好的侦察性能，当超过一半的节点死亡时，网络侦察性能就会大幅下降。

(4) **网络有效期**：当网络中节点死亡数量超过节点总数的 90%时，基本上可以确定网络故障，因此将网络从开始正常运行至节点死亡率超过 90%所经历的时间设定为网络有效期^[80]。

3.5 结果与讨论

在仿真区域内均匀分布 100 个无人机节点，长机节点位于区域中心，所有无人机节点设定统一的飞行方向和速度。具体仿真参数如表 3-1 所示。

表 3-1 网络模型参数

Tab.3-1 Network model parameters

参数	数值
节点数量	100
节点初始能量	300J
发送每比特数据能耗 E_T	8 μ J
接收每比特数据能耗 E_R	8 μ J
融合每比特数据能耗 E_{DA}	0.8 μ J
波长 λ	266nm
吸收系数 k_a	$0.74 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$
散射系数 k_s	$0.515 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$
接收孔径面积 A_r	1.92cm ²
瑞利散射相函数参数 γ	0.017
发散半角 θ_1	15°
发射仰角 β_1	60°
接收视场半角 θ_2	15°
接收仰角 β_2	60°

3.5.1 算法对比分析

仿真结果中 EECOAS(EEOA-Cluster Head Selection)表示仅对簇首选举过程改进后

所得算法,EECOA-E(EECOA-Cluster Establishment)表示仅对簇建立过程改进后所得算法。仿真区域设定为 100m×100m,数据包大小选取 1000byte,对不同算法下网络死亡节点数、剩余能量及数据传输量的对比情况如图 3-5 所示。

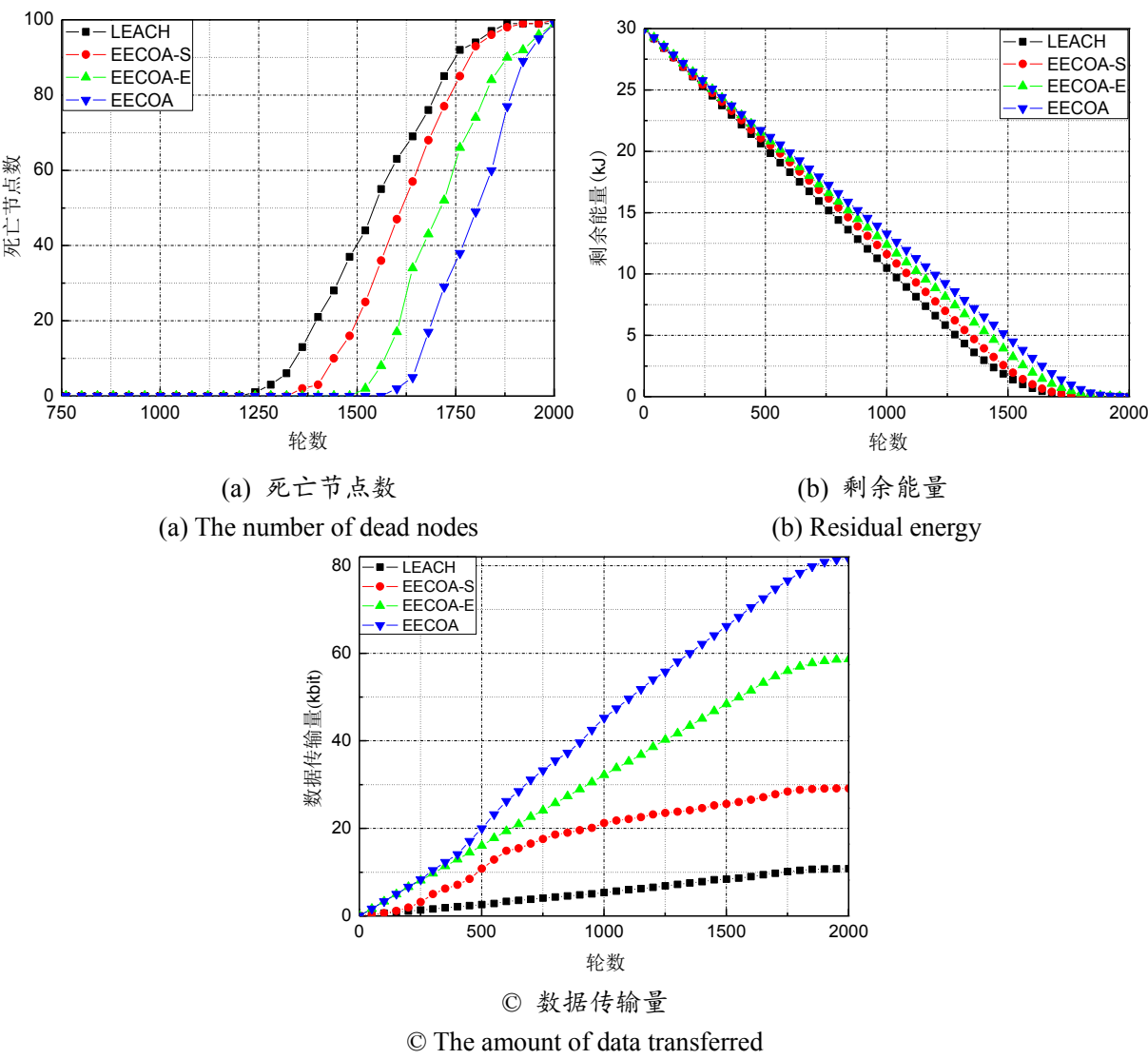


图 3-5 算法性能对比

Fig.3-5 Comparison of algorithm performance

从图 3-5(a)和图 3-5(b)可以看出,通过对簇首选举机制和簇建立过程的改进,均可以达到减缓节点能耗速度和延长网络生存时间的目的,其中簇建立过程的改进可以更有效地优化网络能量效率。分析可知,对簇建立过程进行改进后,部分成员节点根据距离最优化原则判定后选择不加入任何簇,而是直接将数据传输至长机。一方面减少了成员节点的数据传输距离,降低了无人机间无线紫外光通信时的能量衰减,使得节点在发送数据时消耗较少的能量;另一方面降低了簇内成员节点的数目,减少了簇首节点在接收数据和数据融合时消耗的能量。

图 3-5©表明不同算法下长机接收到的数据量。由图可知,簇首选举和簇建立过程的改进均使得数据传输量有了一定的提升,并且簇建立过程改进后的改善效果更加明显。分

析可知，簇首选举的改进使簇首选举过程基于节点能量的动态变化，优先选择剩余能量高的僚机节点当选为簇首，从而优化能效，有效延长网络生命周期，增大长机接收到的数据量。簇建立过程的改进降低了簇成员节点传输数据时的能耗，同时也降低了簇首节点接收数据和数据融合的能量消耗。另一方面使得部分成员节点直接发送数据至长机，一定程度上提高了数据的传输成功率。

不同算法下的网络生存性能如表 3-2 所示，对比得到 EECOA 较于 LEACH 稳定期提高了 31%，高效期提高了 17%，有效期提高了 9%。同时 EECOA 的不稳定期为 309 轮，而 LEACH 的不稳定期为 529 轮，可以看出 EECOA 在延长网络稳定期的同时减小链路的不稳定性对数据传输性能的影响。EECOA 达到了均衡网络能耗，提高网络稳定性，延长网络生命周期的目的。

表 3-2 不同算法下的网络生存性能
Tab.3-2 Network survivability under different algorithms

算法名称 轮数 网络状态				
	LEACH	EECOA-S	EECOA-E	EECOA
稳定期	1229	1329	1484	1607
高效期	1546	1612	1721	1815
有效期	1758	1789	1888	1916

3.5.2 算法性能分析

(1) EECOA 分簇过程

在 100m×100m 的区域内均匀分布 100 个无人机节点，数据包长度选取 1000byte，图 3-6 表示 EECOA 算法中不同轮数的分簇效果。

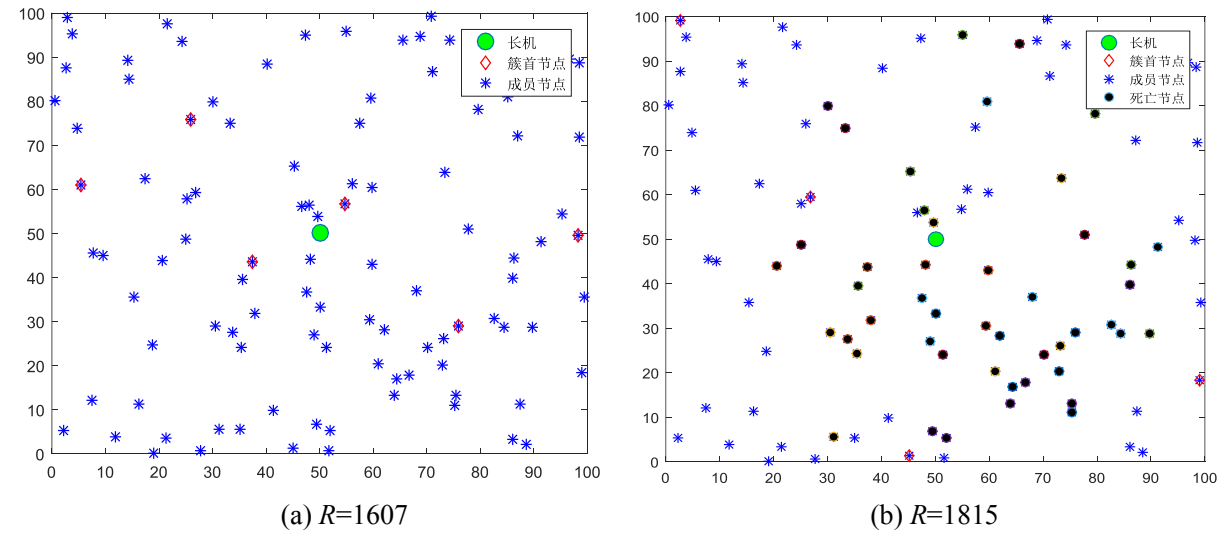


图 3-6 EECOA 分簇效果及簇首分布

Fig.3-6 EECOA clustering effect and cluster head distribution

无人机蜂群网络在 $R=1607$ 后开始出现死亡节点，因此选取 $R=1607$ 时的网络状态代表无人机节点均存活时的分簇情况，同时选取 $R=1815$ 即无人机蜂群处于网络高效期内的

分簇情况。图 3-6(a)和图 3-6(b)说明 EECOA 算法以周期性的方式选举簇首，实现网络负载均衡，延长网络生存时间。并且一旦有节点因能量耗尽失效后，网络节点开始以很快的速度进行消亡，尽可能缩短网络的不稳定期，减少网络链路的不稳定性对网络造成的影响。

(2) 数据包长度对网络性能的影响

本文主要从数据包长度和节点密度两方面对 EECOA 算法中网络剩余能量、死亡节点数及数据传输量进行了对比分析。图 3-7 讨论了仿真区域设定为 100m×100m 时数据包长度对网络性能的影响。

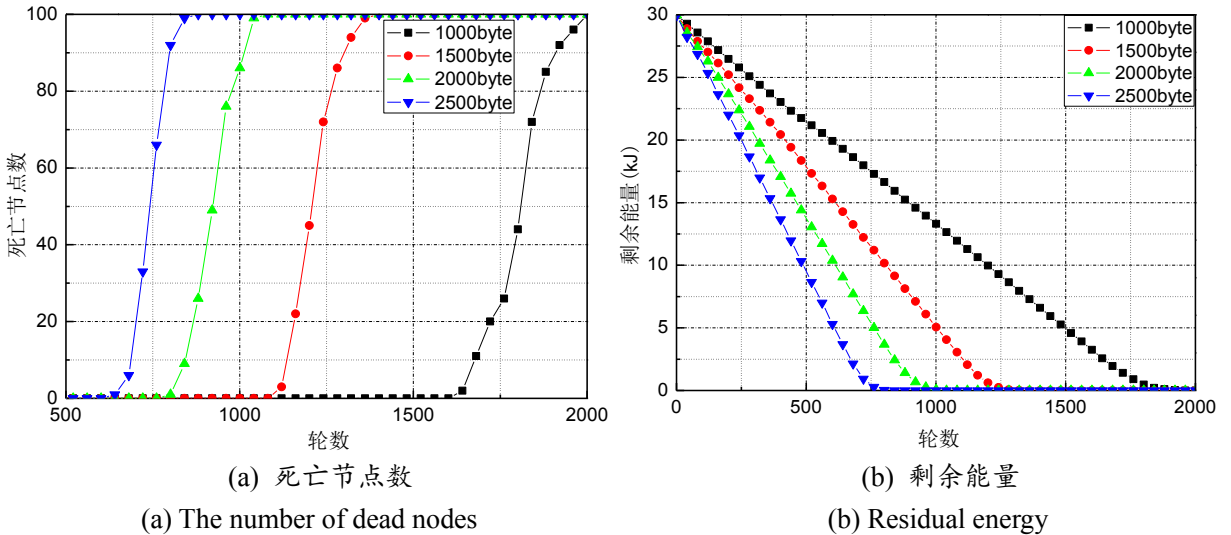


图 3-7 不同数据包长度下网络性能对比

Fig.3-7 Comparison of network performance under different packet lengths

图 3-7(a)显示了不同数据包长度下节点的死亡速度，由图可知数据包长度的增大使得网络的生命周期缩短，并且数据包长度越大，该趋势越明显。图 3-7(b)表示不同数据包长度下网络节点的总剩余能量，由图可知数据包长度的增大导致网络节点能量快速衰减，并且数据包长度越大能量衰减速度越快。根据分析可知，数据包长度的增大会使得节点在数据传输及簇首节点在数据接收和数据融合时消耗更多的能量，从而导致网络节点能量加速耗尽后死亡。

表 3-3 反映了不同数据包长度下网络的生存性能。可以看出，数据包长度的增大大幅度降低了网络的各方面性能。根据表中数据对比可知，数据包长度为 2500byte 时，网络的稳定期、高效期和有效期较于数据包长度为 1000byte 时分别下降 61%、60%和 59%，因此选取合适的数据包长度进行信息传输有利于减少通信开销，减缓网络能量消耗。

表 3-3 不同数据包长度下的网络生存性能

Tab.3-3 Network survivability under different packet lengths

数据包长度					
轮数	网络状态	1000byte	1500byte	2000byte	2500byte
稳定期		1607	1108	790	630
高效期		1815	1211	927	735
有效期		1916	1291	1012	793

(3) 节点密度对网络性能的影响

图 3-8 表示在数据包长度设定为 1000byte 时, 不同节点密度下网络的死亡节点数、剩余能量和数据传输量。无人机节点数量为 100 个, 仿真区域大小分别取值为 100×100 , 300×300 和 500×500 , 单位为 m^2 。

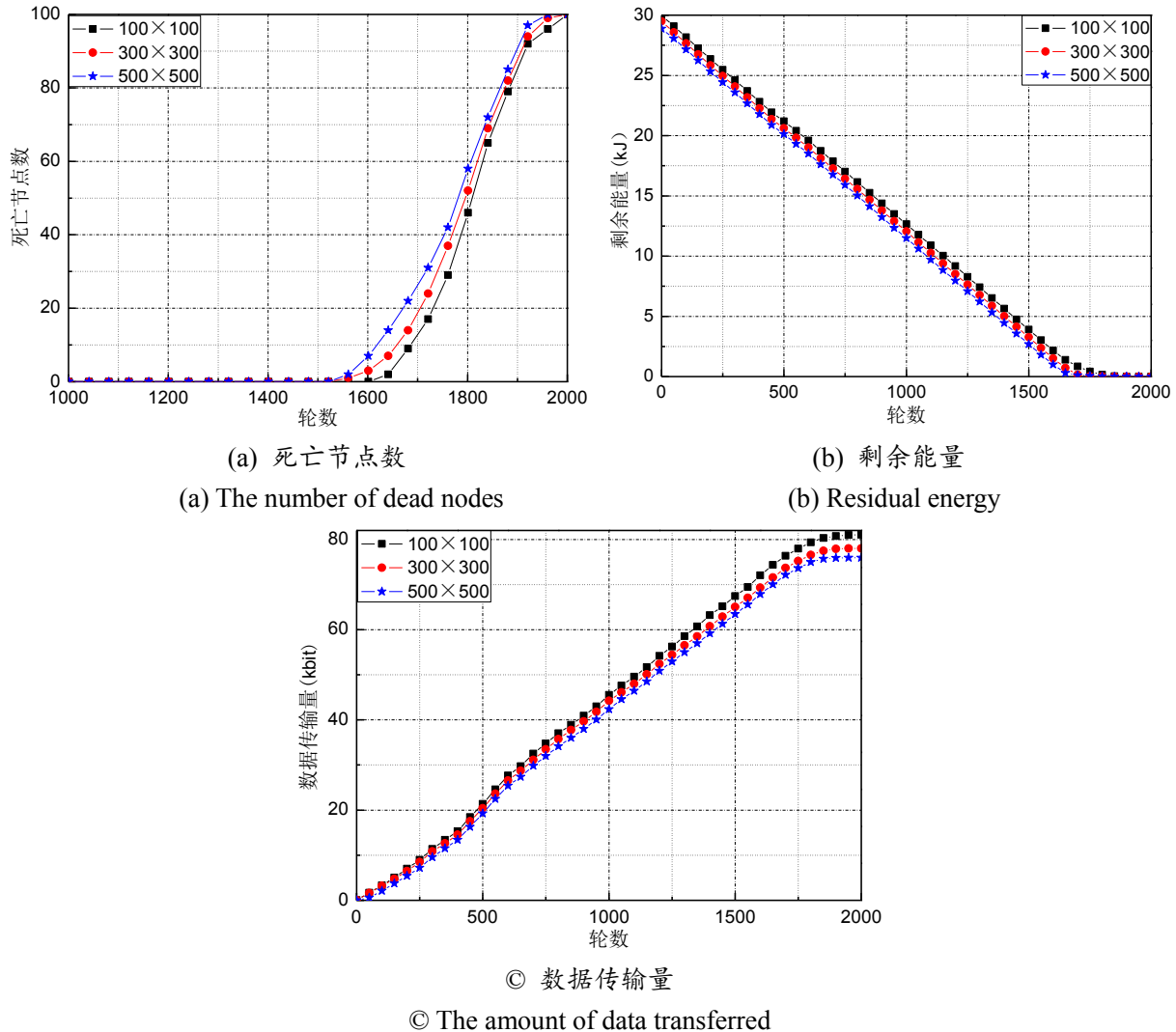


图 3-8 不同节点密度下网络性能对比

Fig.3-8 Comparison of network performance under different node densities

由图 3-8(a)可以看出, 网络的节点密度越小, 节点的死亡速度就越快, 并且出现第一个死亡节点和全部节点死亡的轮数越早。图 3-8(b)反映了网络节点密度对节点能耗的影响, 从图中可以看出, 节点密度越小, 节点能量消耗越快。分析可知, 网络节点密度的减小使得节点分布更加分散, 增大了节点间的通信距离, 节点在进行无线紫外光通信时产生更大的能量衰减。为了在接收端得到可接受的信噪比, 节点需提高发射功率来补偿信道传输中的能量衰减, 从而加快了节点的能耗速度。图 3-8(c)显示了不同节点密度下的数据传输量, 可以看出, 网络节点密度的增大减缓了节点能量消耗, 使得长机能够接收到来自僚机更多的侦察数据。

表 3-4 反映了不同节点密度下的网络生存性能。从表中可以看出, 网络节点密度在一

定程度上影响着网络各方面性能，但其影响程度小于数据包长度。无人机节点数量设定为 100，区域面积为 500m×500m 时网络的稳定期、高效期和有效期较于区域面积为 100m×100m 时分别下降了 5%、1%和 0.6%，表明 EECOA 算法也可适用于较大规模网络。

表 3-4 不同节点密度下的网络生存性能

Tab.3-4 Network survivability under different node densities

网络状态	区域面积		
	100m×100m	300m×300m	500m×500m
稳定期	1607	1561	1533
高效期	1815	1800	1790
有效期	1916	1911	1904

3.6 本章小结

为了提高无人机蜂群分簇通信时的能量效率和传输效率，本章研究了 EECOA 算法。仿真结果表明，与 LEACH 算法相比，EECOA 算法可将网络稳定期提高约 31%，高效期提高约 17%，有效期提高约 9%，表明在无人机蜂群中使用 EECOA 算法可平衡网络能耗，延长网络生命周期，并且仿真分析了数据包长度和节点密度对网络性能的影响。EECOA 算法仅对节点能量同构的无人机蜂群进行了研究分析，但在战场环境下无人机承担任务不同时会搭载不同初始能量，因此还需对节点能量异构情况下无人机蜂群的负载均衡问题进行讨论。

<此页空白>

4 阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略

本章主要关注的是节点能量异构条件下无人机蜂群网络的分簇控制问题，设计了一种阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略(Threshold Sensitive Energy Balance Strategy, TSEBS)。根据节点不同的初始能量值对簇首选举概率进行能量加权，并通过信息变化率来衡量无人机节点侦察信息的更新程度，设定阈值减少节点不必要的传输次数。从网络异构性、死亡节点数、网络剩余能量和数据传输量等多个方面对该策略下异构无人机蜂群的网络性能进行了分析讨论。

4.1 能量异构的无人机蜂群分簇模型

未来战场环境日益复杂且不可预见，单个无人机由于自身条件限制只能携带有限数量的传感器，降低了任务执行能力，无法同时从多个角度了解战场信息。而无人机蜂群中多任务无人机协同作战，通过优势互补和分工协作能够更加有效地完成任务，提高无人机系统作战效能^[81]。异构无人机蜂群中无人机因携带多种任务载荷而具备不同资源配置，为延长无人机蜂群的生存时间，获得更多的采集信息，采用分簇结构对异构无人机蜂群进行能效优化。

如图 4-1 所示为异构无人机蜂群分簇模型，无人机蜂群采用“长机-僚机”飞行模式扩大探测深度。无人机由于不同侦察任务需求具有不同初始能量^[17]，网络节点根据能量异构性可分为高级节点和普通节点，高级节点具有比普通节点更高的初始能量。僚机节点都可以成为簇首节点或簇成员节点，并且具有唯一 ID 标识。每架无人机均挂载无线紫外光通信收发装置，并且假设当无人机间相互通信时，数据的接收方向已知。

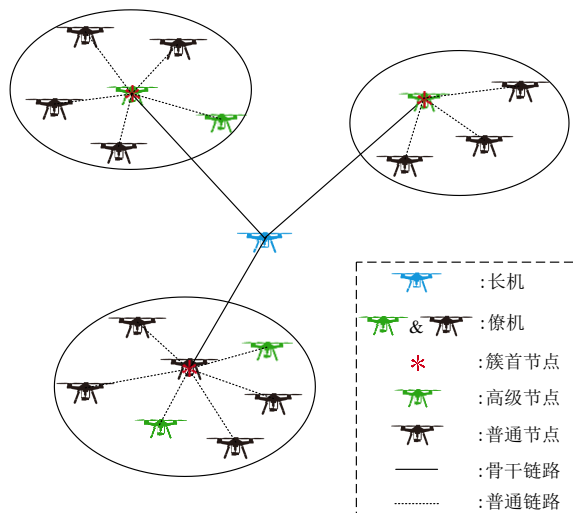


图 4-1 异构无人机蜂群分簇模型

Fig.4-1 Clustering model of heterogeneous UAV swarm

无人机蜂群处于编队保持状态时，基于分簇对能量异构的无人机网络进行拓扑管理。僚机节点被组织划分为多个簇结构，每个簇中选择一个僚机作为簇首，允许其他僚机节点

作为簇成员加入该簇。簇首僚机负责接收来自成员僚机的侦察数据，并对数据进行融合压缩后传输给长机。成员僚机则主要负责侦察信息采集和数据传输。网络在持续运行一段时间后会重新进入启动阶段，采用簇首轮换机制实现簇的动态改变，使得网络的能耗分布相对均衡。

低空空域中无人机机间进行无线紫外光通信时，大气气体分子和气溶胶粒子的散射和吸收作用使得紫外光信号产生衰减，沿用公式(3-4)的路径损耗模型表示信道中的链路衰减 L ，并采用 3.2.1 节中的无线紫外光通信能耗模型对异构无人机蜂群飞行时的通信能量消耗进行分析。

4.2 阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略

4.2.1 能量加权选举簇首

LEACH 分簇算法中引入高级节点能够延长网络生命周期，但簇首是以随机的方式选举产生，并未考虑高级节点和普通节点的能量异构情况，两者具有相同的簇首选举概率，不利于改善网络负载均衡性能^[82]。TSEBS 算法通过设定两种能量加权的簇首选举门限适应节点能量的异构性，一定程度上使得高级节点比普通节点更频繁地成为簇首，能够将网络负载尽可能按照节点初始能量加权分配到每个节点，避免能量消耗不均造成部分节点过早失效，导致网络生存时间的缩短。

假设异构无人机蜂群中无人机节点总数为 N ，高级节点占网络节点总数的比例为 m ，与普通节点的初始能量相比，高级节点能量多出的比例为 α ， p_{opt} 为簇首节点在网络节点中所占百分比的期望值，则 TSEBS 分簇算法中普通节点的簇首选举概率设为：

$$p_{nrm} = \frac{p_{opt}}{1 + \alpha m} \quad (4-1)$$

高级节点的簇首选举概率设为：

$$p_{adv} = \frac{p_{opt}(1 + \alpha)}{1 + \alpha m} \quad (4-2)$$

在这种情况下，选择高级节点为簇首的概率是普通节点的 $(1 + \alpha)$ 倍，普通节点和高级节点将有不同的簇首选举周期。其中，普通节点的簇首选举周期为：

$$T_{nrm} = \frac{1}{p_{nrm}} = \frac{1 + \alpha m}{p_{opt}} \quad (4-3)$$

高级节点的簇首选举周期为：

$$T_{adv} = \frac{1}{p_{adv}} = \frac{1 + \alpha m}{p_{opt}(1 + \alpha)} \quad (4-4)$$

图 4-2 表示当 m 等于 0.2， α 分别取值为 1 和 3 时 TSEBS 算法选举周期示意图。可以看出，高级节点的选举周期明显短于普通节点的选举周期，并且当高级节点高于普通节点的能量比例 α 越大，网络能量异构性越高，高级节点较于普通节点更易被选举为簇首，说

明 TSEBS 算法在一定程度上使得网络负载均衡和簇首均匀分布趋于最佳。

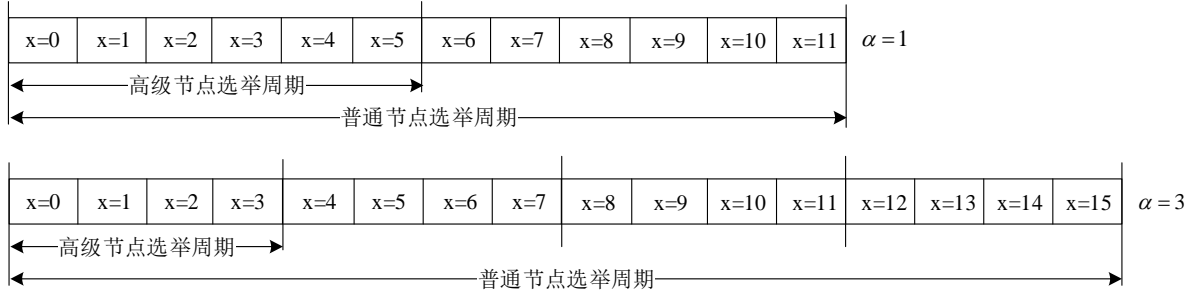


图 4-2 TSEBS 选举周期示意图

Fig.4-2 TSEBS election period diagram

此时，普通节点的簇首选举门限为：

$$T(n_{nrm}) = \begin{cases} \frac{p_{nrm}}{1 - p_{nrm}(R \bmod \frac{1}{p_{nrm}})} & \text{if } n_{nrm} \in G' \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4-5)$$

高级节点的簇首选举门限为：

$$T(n_{adv}) = \begin{cases} \frac{p_{adv}}{1 - p_{adv}(R \bmod \frac{1}{p_{adv}})} & \text{if } n_{adv} \in G'' \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4-6)$$

其中 G' 和 G'' 分别为前 $R-1$ 轮中未当选簇首的普通节点和高级节点的集合。每一轮中普通节点和高级节点选举为簇首的平均数目分别是 $n(1-m)p_{nrm}$ 和 nmp_{adv} ，使得异构无人机蜂群网络每轮簇首数量的平均值为 $n(1-m)p_{nrm} + nmp_{adv} = np_{opt}$ ，保持与网络中簇首数目的期望值一致。僚机节点从 0 到 1 之间抽取随机数作为标志位，并与之对应的簇首选举门限进行比较，当标志位小于簇首选举门限时，该节点在本轮当选簇首。

4.2.2 簇的建立

网络经过一轮运行后，部分节点当选为簇首，每个簇首节点向网络中其他节点广播一个通知消息，其中包含节点 ID 和消息类型。其他节点一直等待接收来自簇首节点的通知包，并且可能会收到来自不同簇首的当选消息，此时其他节点根据通信代价最小原则来决定归属于哪个簇，即节点以收到的通知消息的信号强弱为判断依据，选取信号强度最强的节点作为簇首。当节点选定自己的簇首之后，成员节点需发出一个加入请求消息通知簇首，消息包括节点自身 ID 和簇首 ID。

网络的簇结构基本建立后，簇首节点根据本簇成员的节点数产生 TDMA(Time Division Multiple Access)时隙表，分配成员节点向簇首发送数据的时间点，成员节点只能在属于自己的特定时隙内才可以传输侦察数据至簇首节点^[77]。

4.2.3 阈值约束下的数据传输

僚机节点持续对战场环境进行侦察监视和数据采集。在稳定数据传输阶段，LEACH

算法中的成员节点需不间断地向簇首节点发送侦察采集到的数据，然而节点在新一轮获取到的战场信息与上一轮相比可能具有较高的重复性，直接发送会浪费通信资源。针对上述问题 TSEBS 算法引入了信息变化率的概念来衡量待发送区的有效信息量，即与上一轮采集信息 Message_{R-1} 相比，节点在新一轮采集信息 Message_R 的更新程度，定义为：

$$u = \frac{\text{Message}_R - \text{Message}_{R-1}}{\text{Message}_{R-1}} \quad (4-7)$$

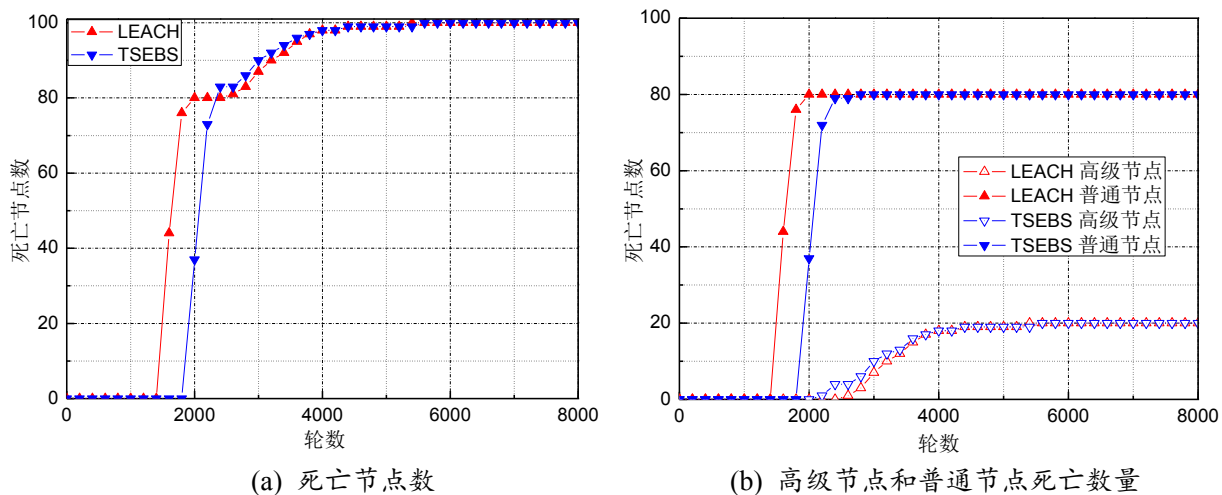
通过对信息变化率设定阈值 β ，只有当信息变化率达到预设阈值时成员节点才能将侦察数据发送给簇首。如果当前采集信息与上一轮信息相比变化不大，成员节点无需向簇首报告，从而减少不必要的数据传输次数，降低信息冗余度，提高无人机网络的传输效率。簇内所有成员节点完成与簇首节点的信息传输后，由于侦察信息的冗余性，簇首将信息融合压缩后发送给长机。

4.3 结果与讨论

本章主要研究节点能量异构条件下无人机蜂群网络的分簇控制问题，本节中仍采用表 3-1 的仿真参数对算法进行仿真分析，其中普通节点初始能量设为 300J。

4.3.1 算法对比分析

为评估异构无人机蜂群能耗均衡策略的优劣性，对能量异构的无人机蜂群网络中 TSEBS 与 LEACH 的性能进行了比较。仿真区域设为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ ，数据包长度选取 1000byte，阈值 β 取值为 0.1，从死亡节点数、网络剩余能量及数据传输量等多个角度对两种算法进行对比和分析。当 m 和 α 分别取值为 0.2 和 1 时，LEACH 和 TSEBS 的性能比较如图 4-3 所示。



(a) The number of dead nodes (b) The number of dead nodes for advanced and normal nodes

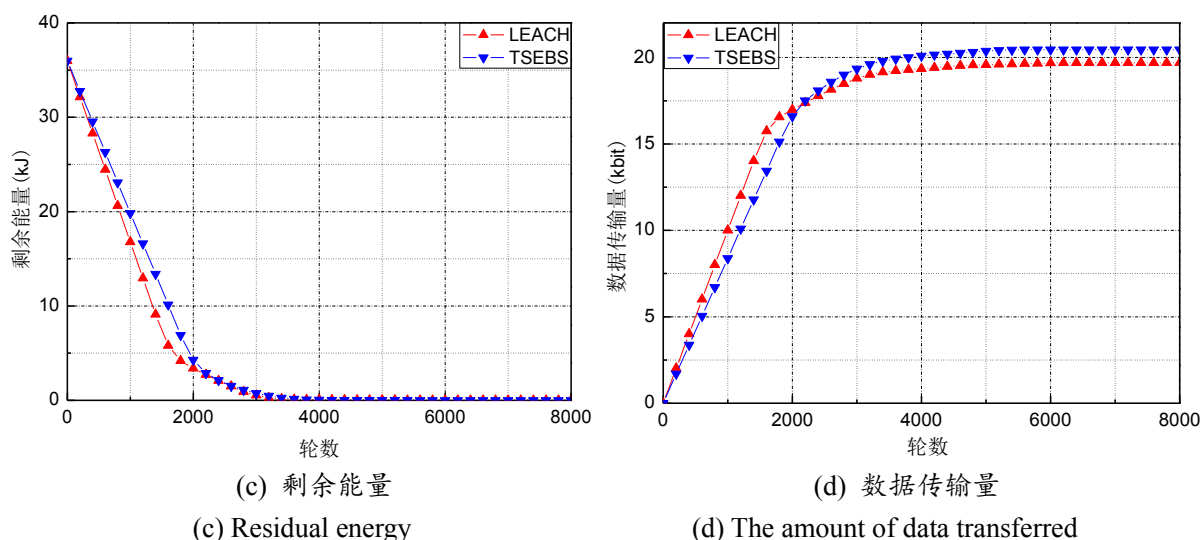


图 4-3 算法性能对比

Fig.4-3 Comparison of algorithm performance

图 4-3(a)和图 4-3(b)分别表示网络中死亡节点总数对比和高级节点及普通节点的死亡数量对比。从图 4-3(a)可知,与 LEACH 相比, TSEBS 的稳定区域延长了约 28.6%,且 TSEBS 的不稳定期明显短于 LEACH。图 4-3(b)表明在 LEACH 算法中,相对于高级节点,普通节点的死亡速度很快,并且过早的因能量耗尽而全部死亡。TSEBS 算法则有效缩短了高级节点和普通节点之间的死亡时间差,使得网络的稳定周期得到较大的提高。分析表明, LEACH 算法未考虑节点初始能量的异构性,因此无人机网络的能量消耗没有得到优化。TSEBS 算法通过对节点初始能量加权的簇首选举概率进行分配,避免耗能不均导致部分节点过早死亡,利用异构感知扩展了网络的稳定区域。

图 4-3(c)表示异构无人机蜂群网络的剩余能量对比。从图中可以看出, TSEBS 算法中无人机节点的能耗速率低于 LEACH 算法,表明 TSEBS 算法中设定能量加权的簇首选举门限达到了平衡网络能耗的目的。除此之外, TSEBS 算法引入了阈值 β 来衡量信息变化率,减少了不必要的数据传输次数,降低了簇成员节点传输数据时的能耗,同时也降低了簇首节点接收数据和数据融合的能量消耗。图 4-3(d)表示两种算法下长机接收到的数据传输量对比,图中表明网络在最初运行阶段, LEACH 算法中长机接收到的数据传输量要高于 TSEBS 算法,说明对网络中信息变化率设定阈值一定程度上控制了数据传输量。随着网络的运行, TSEBS 中长机接收到的数据传输量超过了 LEACH,这是因为 LEACH 算法中节点有更高的死亡速度,从而影响了无人机节点的信息采集和数据传输。

无人机蜂群执行侦察监视任务时,长机需要通过僚机节点获得采集数据,为作战提供全面可靠的情报保障,因此无人机网络稳定期的长度是算法性能的主要衡量指标。无人机网络在节点死亡数量未超过一半时,能较好的完成区域目标侦察和信息采集,而当节点死亡率超过 90%时基本可以判定网络死亡,长机已经无法从僚机处获得可靠数据。

图 4-4 为当高级节点占节点总数的比例 m 设定为 0.2 时,高级节点的初始能量高于普通节点的比例 α 取值改变对网络性能的影响。从图中可以看出, LEACH 算法并没有很好

地利用 α 改变带来的额外能量，网络的稳定期和高效期在 α 取值改变过程中几乎保持不变，并且均小于 TSEBS 算法，这表明 LEACH 算法平等看待所有网络节点，并未考虑节点的能量差异。反之，TSEBS 算法中网络的稳定期和高效期均随着 α 取值的增大而增大，说明通过设定两种能量加权的簇首选举门限，使得无人机网络能够很好地利用高级节点的额外能量，避免部分节点因耗能过快而较早死亡，从而延长了网络的稳定期和高效期。 α 取值较小时，TSEBS 算法中网络的有效期要高于 LEACH 算法，说明 TSEBS 算法能够合理地消耗节点额外能量。随着 α 取值的增大，LEACH 算法中的网络有效期逐渐高于 TSEBS 算法，但同时也延长了网络的不稳定期，导致网络链路处于不稳定状态，影响了数据传输性能，说明 TSEBS 算法由于区别对待初始能量不同的节点，获得了比 LEACH 算法更多的有效数据量和更长的网络稳定周期。

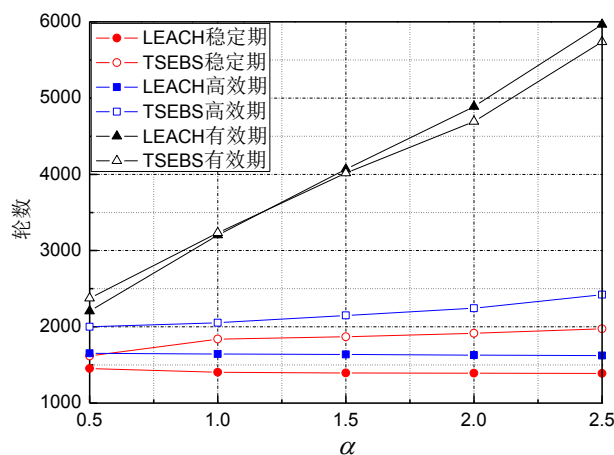
图 4-4 α 变化时算法性能对比Fig.4-4 Comparison of algorithm performance with α change

图 4-5 为当高级节点的初始能量高于普通节点的比例 α 设定为 1 时，高级节点占节点总数的比例 m 取值改变对网络性能的影响。从图中可以看出，随着 m 取值的增大，LEACH 算法和 TSEBS 算法中网络的稳定期都有所延长，并且 TSEBS 中网络稳定期的增长趋势更加明显。说明高级节点所占比例的增大一定程度上延长了网络的生命周期，其中 TSEBS 算法因对簇首选举概率进行能量加权，使得 TSEBS 更能适应能量异构性高的网络结构，从而扩展了网络的稳定区域。

LEACH 算法和 TSEBS 算法中的网络高效期也随着 m 取值的增大而增大，且 TSEBS 算法中的网络高效期明显高于 LEACH 算法。由于无人机蜂群在高效期内运行时还能够保持较好的侦察监视性能，当超过一半的节点死亡时，无人机蜂群的侦察性能就会大幅下降。因此为了在作战中提供可靠的情报保障，应保证无人机蜂群网络高效期具有一定持续性。

TSEBS 算法中网络有效期在高级节点所占比例较小时低于 LEACH 算法，说明在网络能量异构性较弱时，LEACH 算法中的网络有较好的生存性。随着 m 取值的增大，TSEBS 算法中网络有效期增长速度逐渐大于 LEACH 算法，并且 TSEBS 算法中网络的不稳定期要短于 LEACH 算法，说明 TSEBS 算法在延长网络生存时间的同时降低了网络链路的不稳定性对数据传输效率的影响。

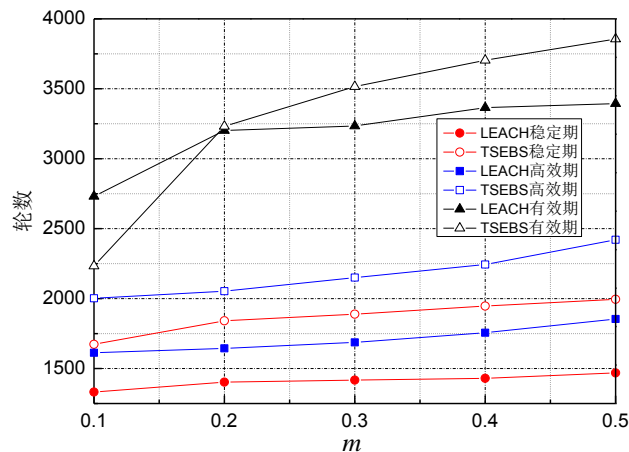
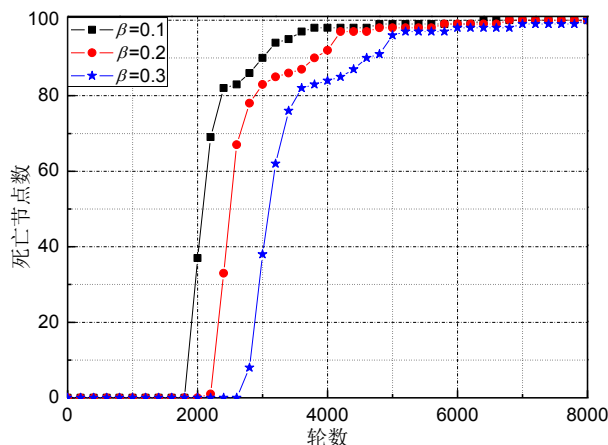

 图 4-5 m 变化时算法性能对比

 Fig.4-5 Comparison of algorithm performance with m change

4.3.2 算法性能分析

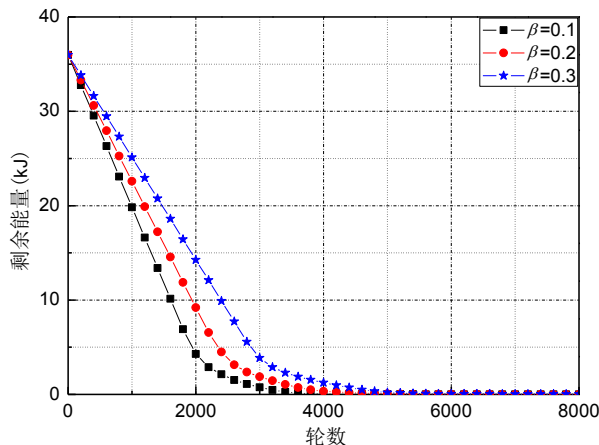
设定高级节点占节点总数的比例 m 为 0.2, 高级节点初始能量高于普通节点的比例 α 为 1, 分析讨论了不同的信息变化率阈值 β 和数据包长度对网络性能的影响。图 4-6 为设置信息变化率的不同阈值 β 对无人机网络性能的影响。从图 4-6(a)和图 4-6(b)中可以看出, 阈值 β 的增大使得无人机节点的能量消耗速度减慢, 延长了无人机网络的生命周期。分析可知, 阈值 β 的设置降低了采集信息的冗余度, 减少了节点不必要的数据传输次数, 降低了成员节点发送数据的能耗和簇首节点接收数据及数据融合的能耗。为了提高网络采集数据的精确性, 可以对信息变化率设置一个较小的阈值, 但同时会增大传输过程的能量消耗, 因此应根据实际情况设定合适的阈值, 以平衡监测数据的精确性和系统的能源效率。

图 4-6(c)表示不同阈值 β 下长机接收到的数据传输量。从图中可以看出, 阈值 β 的值越大, 长机在网络运行初期接收到的数据传输量越小, 说明阈值的设置有效控制了节点的数据传输。但随着网络运行, 当阈值较大时, 长机端的数据传输量逐渐高于阈值小的数据传输量, 这是因为阈值较小的网络节点在早期的发送数据、接收数据和数据融合过程中消耗了过多的能量, 导致节点的死亡率较高, 影响了后期无人机节点的信息采集和数据传输。



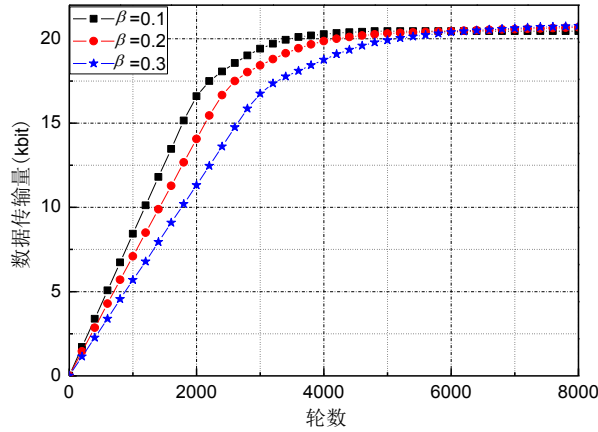
(a) 死亡节点数

(a) The number of dead nodes



(b) 剩余能量

(b) Residual energy

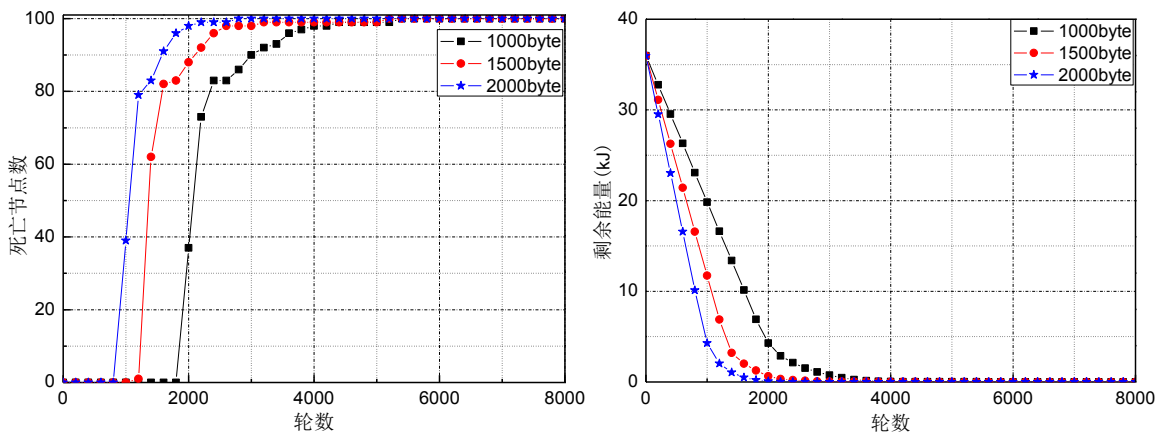


(c) 数据传输量

(c) The amount of data transferred

图 4-6 不同阈值 β 下网络性能对比Fig.4-6 Comparison of network performance under different thresholds β

不同数据包长度下异构无人机蜂群网络的节点死亡速度如图 4-7(a)所示。从图中可以看出，数据包长度越大，节点的死亡速度越快，网络出现第一个死亡节点和所有节点死亡的轮数越早，无人机网络的生命周期越短。图 4-7(b)表示不同数据包长度下网络的剩余能量，当数据包长度为 1000byte 时，网络中节点能量在 5200 轮时耗尽，当数据包长度为 2000byte 时，节点能量在 2800 轮时耗尽，说明数据包长度的增大加速了无人机网络的能量消耗。这是因为当数据包长度增大时，无人机节点在发送数据、接收数据和数据融合时消耗更多的能量，造成节点因能量耗尽而较早死亡。



(a) 死亡节点数

(a) The number of dead nodes

(b) 剩余能量

(b) Residual energy

图 4-7 不同数据包长度下网络性能对比

Fig.4-7 Comparison of network performance under different packet lengths

4.4 本章小结

本章探讨了节点能量异构条件下无人机蜂群网络的分簇控制问题，介绍了异构无人机蜂群网络分簇模型，通过对节点初始能量加权的簇首选举概率进行分配达到均衡网络能耗的目的。仿真结果表明，TSEBS 算法能有效缩短高级节点和普通节点之间的死亡时

间差，合理利用节点额外能量，通过异构感知延长无人机网络的生命周期。除此之外，TSEBS 算法设定阈值来衡量信息变化率，减少不必要的数据传输数量，降低网络数据传输时的能耗。同时也讨论分析了不同的信息变化率阈值和数据包长度对网络性能的影响，结果表明，应合理选择阈值大小和数据包长度，平衡数据精确性和能源效率的关系。

<此页空白>

5 总结与展望

5.1 本文总结

采用无线“日盲”紫外光通信技术实现无人机蜂群的机间通信,具有全天候、非直视、不受射频干扰和隐秘通信等优势,能为无人机蜂群在强电磁干扰和复杂大气环境中的任务执行提供有效保障。在无线紫外光通信能耗模型的基础上,本文主要研究了无人机节点能量同构和异构情况下,无人机蜂群网络的分簇控制问题。主要工作包含以下几部分:

(1) 介绍了将无线紫外光通信技术应用于无人机蜂群的可行性和优越性,阐述了研究无人机蜂群分簇控制的必要性,并对无线紫外光通信技术和无人机蜂群分簇机制的国内外研究进展进行了综合分析。

(2) 论述了紫外光通信的基本原理、传输特性和链路模型的基础知识,介绍了无人机蜂群分簇控制的相关理论,包括编队控制策略分类、网络分簇的基本思想及分类和经典分簇算法。

(3) 针对无人机节点能量同构时无人机蜂群网络的能效优化问题,研究了机间紫外光通信网络中高能效分簇优化算法。在考虑紫外光通信链路衰减的基础上,从簇首选举和簇的建立两方面优化了网络分簇过程,仿真证明了算法的有效性,并分析了传输数据包长度和无人机节点密度对网络性能的影响。

(4) 针对节点能量异构条件下无人机蜂群网络的分簇问题,设计了一种阈值敏感的异构无人机蜂群能耗均衡策略。该策略通过对节点初始能量加权的簇首选举概率进行分配达到均衡网络能耗的目的,并设定阈值有效控制无人机网络中的信息传输量。从网络异构性、死亡节点数、数据传输量等方面对该策略进行了仿真,结果证明了通过本策略可以延长无人机网络的生命周期,减少不必要的数据传输数量,有效提高无人机蜂群分簇通信时的能量效率和传输效率。

5.2 展望

本文利用无线紫外光通信技术完成无人机蜂群中机间的可靠隐秘通信,建立了无线紫外光通信能耗模型,并在能量同构和异构的无人机蜂群网络分簇模型的基础上,结合高效的分簇方法实现了无人机网络的负载均衡和能效优化。在本文的研究基础上,可从以下几个方面开展后续工作:

(1) 研究无线紫外光通信收发装置,使设备更加小型化和轻量化,以满足无人机机载通信需求。对紫外光光源结构进行优化,使其更加符合无人机蜂群分簇结构下的通信要求。

(2) 本文研究编队保持状态下的无人机蜂群分簇问题时,无人机运动模式单一。可考虑结合无人机运动模型对紫外光通信方式下无人机蜂群的能耗均衡问题进行讨论研究。

<此页空白>

致谢

三载韶华，在理工大的读研究生涯即将接近尾声。昨天的我心怀憧憬，满载期望来到校园，今天的我又将不忘初心，继续出发。值此毕业之际，向所有关心帮助我的人们致以感谢与祝福。

感恩导师赵太飞教授。赵老师严谨的学术态度、阳光的人生理念让我感受到了师之大德，虽只历时三载，却将为我未来的人生轨迹指引方向。三年来，赵老师不仅在课题研究方面给予了诸多建议和支持，更是从各方面锻炼培养我们的学习能力，使得即将步入社会的我们有更大的勇气去面对未知挑战。

感恩学科带头人柯熙政教授。柯老师渊博的专业知识，崇高的敬业精神和一丝不苟的工作作风对我影响至深，并在课题研究方面提出专业的指导意见和严格的学术要求，使我养成了良好的科研习惯。

感谢六个同级的伙伴。无论是生活方面还是科研方面都有你们的鼓励和帮助，假期同游时的欢声笑语，论文投稿前的互相修改，都是我三年时光中最珍贵的回忆，愿我们的同窗之谊永久长存。

感谢已毕业的师兄师姐。当我的课题研究遇到困惑时，你们耐心指导和精准意见帮助我在课题方面实现了一次又一次的小突破。

感谢我的师弟师妹。非常荣幸在科研的道路上能与你们为伴，希望在未来的日子里，我们能够互帮互助，共同前行。

回想三年的科研时光，虽有不易，却让我磨砺品格，受益良多，因此倍感珍惜。在这里，再一次衷心感谢三年求学生活中给予我帮助与关心的老师、同学和朋友们，愿你们在以后的日子里一切安好。

<此页空白>

参考文献

- [1] 袁成. 蜂拥而至:快速发展中的美军无人机蜂群[J]. 军事文摘, 2017, 19(9):30-33.
- [2] 道格拉斯·威斯, 胡文翰. 中国大力发展无人机“蜂群”作战能力[J]. 环球军事, 2017, 89(22):68.
- [3] Bürkle, F.Segor, M.Kollmann. Towards autonomous micro UAV swarms[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 61(1-4):339-353.
- [4] M.Shalaby, W.Saad, M.Shokair, et al. Evaluation of electromagnetic interference in wireless broadband systems[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(2):2223-2237.
- [5] J.Li, K.Qiu. Military application of UV communication[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(4):19-21.
- [6] R.Austin. Unmanned aircraft systems: UAVs design, development, and deployment[J]. Wiley, 2010, 79(50):31-36.
- [7] K.Nonami. Prospect and recent research & development for civil use autonomous unmanned aircraft as UAV and MAV[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2007, 1(2):120-128.
- [8] P.B.Sujit, J.M.George, R.W.Beard. Multiple UAV coalition formation[C]. American Control Conference. IEEE, 2008:2010-2015.
- [9] W.Cao, S.Xu. Comparison of multi-UAV cooperation architectures[C]. 2017 3rd International Conference on Information Management (ICIM). IEEE, 2017:500-505.
- [10] W.Li. Persistent surveillance for a swarm of micro aerial vehicles by flocking algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(1):185-194.
- [11] S.Simi, R.Kurup, S.Rao. Distributed task allocation and coordination scheme for a multi-UAV sensor network[C]. Tenth International Conference on Wireless & Optical Communications Networks. IEEE, 2013:12-16.
- [12] D.Rudinskas, Z.Goraj, J.Stankūnas. Security analysis of UAV radio communication system[J]. Aviation, 2009, 13(4):116-121.
- [13] D.M.Reilly, D.T.Moriarty, J.A.Maynard. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, 5611:244-254.
- [14] Y.Sun, C.Gong, Z.Xu, et al. Link gain and pulse width broadening evaluation of non-line-of-sight optical wireless scattering communication over broad spectra[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3):1-12.
- [15] H.Qin, Y.Zuo, F.Li, et al. Noncoplanar geometry for mobile NLOS MIMO ultraviolet communication with linear complexity signal detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017,

9(5):1-12.

- [16] Y.Zeng, R.Zhang. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6):3747-3760.
- [17] J.Scherer, B.Rinner. Persistent multi-UAV surveillance with energy and communication constraints[C]. International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2016:1-6.
- [18] 倪国强, 钟生东, 刘榴绶, 等. 自由大气紫外光学通信的研究[J]. 光学技术, 2000, 26(4):297-303.
- [19] 许桂华. 紫外光通信[J]. 现代通信, 2000, (4):6-7.
- [20] D.Kedar, S.Arnon. Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel[J]. Applied Optics, 2006, 45(33):8454-8461.
- [21] D.Kedar. Multiaccess interference in a non-line-of-sight ultraviolet optical wireless sensor network[J]. Applied Optics, 2007, 46(23):5895-5901.
- [22] D.Kedar, S.Arnon. An ultraviolet optical wireless sensor network in multi-scattering channels[J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 860(1):436-445.
- [23] D.Kedar, S.Arnon. Subsea ultraviolet solar-blind broadband free-space optics communication[J]. Optical Engineering, 2009, 48(4):046001.
- [24] A.Vavoulas, H.G.Sandalidis, D.Varoutas. Connectivity issues for ultraviolet UV-C networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2011, 3(3):199-205.
- [25] A.Vavoulas, H.G.Sandalidis, D.Varoutas. Node isolation probability for serial ultraviolet UV-C multi-hop networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2011, 3(9):750-757.
- [26] Y.Li, J.Ning, Z.Xu, et al. UVOC-MAC: a MAC protocol for outdoor ultraviolet networks[J]. Wireless Networks, 2013, 19(6):1101-1120.
- [27] L.Wang, Y.Li, Z.Xu, et al. A novel neighbor discovery protocol for ultraviolet wireless networks[C]. Acm International Conference on Modeling. ACM, 2011:1-8.
- [28] Y.Li, L.Wang, Z.Xu, et al. Neighbor discovery for ultraviolet ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(10):2002-2011.
- [29] M.H.Ardakani, A.R.Heidarpour, M.Uysal. Performance analysis of relay-assisted NLOS ultraviolet communications over turbulence channels[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(1):109-118.
- [30] R.Ali, A.Mohamed, M.S.El-Mahallawy, et al. Performance analysis of multiple NLOS UV communication cooperative relays over turbulent channels[J]. Optics Express, 2018, 26(16):19972-19985.

- [31] M.H.Ardakani, M.Uysal. Relay-assisted OFDM for ultraviolet communications: performance analysis and optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(1):607-618.
- [32] 蓝天, 倪国强. 紫外通信的大气传输特性模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4):419-423.
- [33] 唐义, 倪国强, 蓝天, 等. “日盲”紫外光通信系统传输距离的仿真计算[J]. 光学技术, 2007, 33(1):27-30.
- [34] 刘润彬, 李霁野. 新型紫外光非视距通信系统信道估计的研究[J]. 光通信研究, 2011, 37(1):31-33.
- [35] 刘金龙, 左勇, 张文博, 等. 基于FPGA平台紫外通信系统的调制技术研究[J]. 光电子技术, 2011, 31(3):188-191.
- [36] H.Xiao, Y.Zuo, J.Wu, et al. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model[J]. Optics Express, 2011, 19(18):17864-17875.
- [37] 吴朝桦, 左勇, 范成, 等. 紫外光通信网络中 MAC 层功率控制研究[J]. 光通信研究, 2013, 39(6):28-30.
- [38] T.Zhao, X.Ke, L.Deng, et al. Research on the flooding routing arithmetic of wireless sensor networks based on solar-blind UV light[J]. Optoelectronics Letters, 2010, 6(6):449-453.
- [39] 赵太飞, 冯艳玲, 柯熙政, 等. “日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8):2229-2235.
- [40] H.He, X.Ke, T.Zhao. Research of position in the wireless "solar-blind" ultraviolet mesh network[J]. Laser Technology, 2010, 34(5):607-610.
- [41] T.Zhao, X.Wang, X.Ke. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3):14-21.
- [42] 赵太飞, 刘雪, 娄俊鹏. 直升机起降中无线紫外光喷泉码引导方法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10):2452-2459.
- [43] T.Zhao, Y.Xie, Y.Zhang. Connectivity properties for UAVs networks in wireless ultraviolet communication[J]. Photonic Network Communications, 2018, 35(3):316-324.
- [44] 张曦文, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于空分复用的多信道机间紫外光通信定向 MAC 协议[J]. 激光技术, 2016, 40(3):451-455.
- [45] C.W.Reynolds. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[J]. Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Computer Graphics, 1987, 21(4):25-34.
- [46] F.Mondada, L.M.Gambardella, D.Floreano, et al. The cooperation of swarm-bots: physical interactions in collective robotics[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2005, 12(2):21-28.
- [47] M.Nagy, Z.Aákos, D.Biro, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks[J]. Nature,

- 2010, 464(7290):890-893.
- [48] Virágh, G.Vásárhelyi, N.Tarcai, et al. Flocking algorithm for autonomous flying robots[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(2):1-15.
- [49] N.Roy, P.Newman, S.Srinivasa. Towards a swarm of agile micro quadrotors[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(4):287-300.
- [50] T.Zhang. Unmanned aerial vehicle formation inspired by bird flocking and foraging behavior[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(4): 402-416.
- [51] R.K.Sharma, D.Ghose. Collision avoidance between UAV clusters using swarm intelligence techniques[J]. International Journal of Systems Science, 2009, 40(5):521-538.
- [52] S.Tang, Z.Qin, J.Xin. Collaborative task assignment scheme for multi-UAV based on cluster structure[C]. Second International Conference on Intelligent Human-machine Systems & Cybernetics. IEEE Computer Society, 2010:285-289.
- [53] Y.Yu, L.Ru, K.Fang, et al. Comprehensive mobility prediction based clustering algorithm for ad hoc UAV networks[C]. International Conference on Machinery, 2016:601-614.
- [54] J.H.Park, S.C.Choi, H.R.Hussen, et al. Analysis of dynamic cluster head selection for mission-oriented flying ad hoc network[C]. IEEE 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2017:21-23.
- [55] H.Wu, X.Tao, N.Zhang, et al. Cooperative UAV cluster assisted terrestrial cellular networks for ubiquitous coverage[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(1):2045-2058.
- [56] T.Shima, S.J.Rasmussen, A.G.Sparks. UAV cooperative multiple task assignments using genetic algorithms[C]. American Control Conference. IEEE, 2005:2989-2994.
- [57] D.Cai, J.Sun, S.Wu. UAVs formation flight control based on behavior and virtual structure[J]. Communications in Computer and Information Science, 2012, 325(3):429-438.
- [58] B.Di, R.Zhou, H.Duan. Potential field based receding horizon motion planning for centrality-aware multiple UAV cooperative surveillance[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 46(1):386-397.
- [59] Z.Liu, X.Gao, X.Fu. Coalition formation for multiple UAVs cooperative search and attack with communication constraints in unknown environment[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 34(6):688-699.
- [60] L.Huang, H.Qu, L.Zuo. Multi-type UAVs cooperative task allocation under resource constraints[J]. IEEE Access, 2018, 6(1):17841-17850.
- [61] B.Bates. Atmospheric ultraviolet remote sensing[J]. Optica Acta International Journal of Optics, 1993, 40(6):1191.
- [62] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京:科学出版社, 2011:3-5, 8, 32, 45.

- [63] Y.Tanaka, E.C.Y.Inn, K.Watanabe. Absorption coefficients of gases in the vacuum ultraviolet. part IV. ozone[J]. Journal of Chemical Physics, 1952, 20(12):1969-1970.
- [64] R.Penndorf. α les of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μ and their application to atmospheric optics[J]. Journal of the Optical Society of America, 1957, 47(2):176-182.
- [65] A.Bucholtz. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere[J]. Applied Optics, 1995, 34(15):2765-2773.
- [66] M.Gebhart, E.Leitgeb, S.S.Muhammad, et al. Measurement of light attenuation in dense fog conditions for FSO applications[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 5891:175-186.
- [67] A.S.Zachor. Aureole radiance field about a source in a scattering-absorbing medium[J]. Applied Optics, 1978, 17(12):1911-1922.
- [68] 唐义, 倪国强, 张丽君, 等. 非直视紫外光通信单次散射传输模型研究[J]. 光学技术, 2007, 33(5):759-762.
- [69] Y.Zuo, H.Xiao, J.Wu, et al. A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels[J]. Optics Express, 2012, 20(9):10359-10369.
- [70] H.Ding, Z.Xu, B.M.Sadler. A path loss model for non-line-of-sight ultraviolet multiple scattering channels[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, 2010(1):598572.
- [71] 张爱利. 无线紫外光通信链路性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014:16-17.
- [72] M.K.Naeem, M.Patwary, M.Abdel-Maguid. Universal and dynamic clustering scheme for energy constrained cooperative wireless sensor networks[J]. IEEE Access, 2017, 5(9):12318-12337.
- [73] S.Dewangan, S.D.Mishra. A survey on energy optimization in WSN using distributed clustering approach[J]. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, 2016, 4(11):19020-19023.
- [74] L.Xu. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2012, 12(1):11113-11153.
- [75] V.K.Arora, V.Sharma, M.Sachdeva. A survey on LEACH and other's routing protocols in wireless sensor network[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(16):6590-6600.
- [76] M.R.Luettgen, J.H.Shapiro, D.M.Reilly. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. Journal of the Optical Society of America, 1991, 8(12):1964-1972.
- [77] Z.Xu, H.Ding, B.M.Sadler, et al. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. Optics Letters, 2008, 33(16):1860-1862.

- [78]B.Yun, B.M.Chen, K.Y.Lum, et al. A leader-follower formation flight control scheme for UAV helicopters[C]. IEEE International Conference on Automation & Logistics. IEEE, 2008:39-44.
- [79]W.B.Heinzelman, A.P.Chandrakasan, H.Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670.
- [80]温佩芝, 许晨蛟, 邓珍荣, 等. 多级异构无线传感器网络分簇路由协议[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(6):1471-1477.
- [81]I.Bekmezci, O.K.Sahingoz, S.Temel. Flying ad-hoc networks (FANETs): a survey[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3):1254-1270.
- [82]H.LI. LEACH-HPR: An energy efficient routing algorithm for Heterogeneous WSN[C]. IEEE International Conference on Intelligent Computing & Intelligent Systems. IEEE, 2010:507-511.

攻读学位期间主要研究成果

(1) 研究成果:

[1] 赵太飞, 许杉, 屈瑶, 等. 基于无线紫外光隐秘通信的侦察无人机蜂群分簇算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 967-972. (EI 已发表)

[2] Taifei Zhao, **Shan Xu**, Peng Gao, et al. Heterogeneous UAV Swarm Clustering Algorithm Based on Wireless Ultraviolet Secret Communication[J]. Optical Engineering. (外审中)

[3] 赵太飞, 许杉, 王晶, 等. 无线紫外光协作无人机编队网络中能耗均衡方法[P]. 发明专利, 专利申请号: 201810642454.7. (已公开)

[4] 赵太飞, 许杉, 姚丹, 等. 隧道交通智能管控逃生系统 1.0. 软件著作权, 登记号: 2018SR155974. (已授权)

(2) 获奖情况:

[1] 2017 年陕西省第四届研究生电子设计竞赛省级三等奖。

[2] 2017 年第二届中国“互联网+”大学生创新创业大赛校二等奖。

[3] 2017 年研究生智慧城市技术与创意设计大赛校二等奖。

[4] 2018 年陕西省科技工作者创新创业大赛铜奖。

[5] 2015-2016 学年研究生二等奖学金。

[6] 2016-2017 学年研究生一等奖学金。

[7] 2017-2018 学年研究生一等奖学金。

[8] 2016-2017 学年三好学生。

[9] 2017-2018 学年三好学生。

(3) 参与科研项目:

[1] 2016 年 9 月-2017 年 12 月, 参与了国家自然科学基金项目: 复杂环境中直升机应急起降的无线紫外光引导技术研究(U1433110)课题研究。

[2] 2017 年 6 月-至今, 参与了陕西省教育厅服务地方专项计划项目(17JF024)资助“快递无人机飞行中多波长无线紫外光安全引导系统开发”课题研究。