

# 无人机集群网络资源优化综述

田 畅, 贾 倩, 陈润丰, 王海超, 李国鑫, 焦雨涛

(中国人民解放军陆军工程大学通信工程学院, 南京 210007)

**摘要:** 无人机集群以其灵活性、低成本和可搭载各类传感器等优势, 已成为执行复杂任务的关键设备, 其应用依赖于及时高效的通信, 因此针对无人机集群网络的研究近年来也得到了广泛关注。无人机集群高移动性、高信息交互量和低能源存储量等固有特性, 使其通信资源的管理面临各种严峻的挑战。本文首先综述了无人机集群网络的应用场景、优势及其特点, 并结合信道接入控制体制, 对无人机集群的无线资源优化问题进行分类, 提炼出资源优化所面临的挑战。随后从策略与方法的角度对现有的网络资源优化方案进行了总结归纳, 梳理了大规模集群场景下的通信性能提升、高动态环境下的及时决策更新, 以及多元异构需求下的通信满意度提升等技术难点。最后, 依据研究现状与潜在机遇, 结合新兴技术的应用优势, 对无人机集群网络的技术方向和发展前景进行了展望。

**关键词:** 无人机集群; 大规模网络; 无人机通信; 资源优化

**中图分类号:** TN929      **文献标志码:** A

## Review on Optimization of Resources in UAV Swarm Networks

TIAN Chang, JIA Qian, CHEN Runfeng, WANG Haichao, LI Guoxin, JIAO Yutao

(College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Unmanned aerial vehicle (UAV) swarms have become critical equipment for performing complex tasks due to their flexibility, low cost, and the ability to carry various sensors. Their application depends on timely and efficient communication. Therefore, the research on UAV swarm communication networks has also received widespread attention in recent years. The inherent characteristics of UAV swarms, such as high mobility, high information interaction, and low energy storage, impose various severe challenges on the management of communication resources. This paper summarizes the application scenarios, advantages, and characteristics of the UAV swarm communication network, and extracts the challenges faced by resource optimization. From the perspectives of strategies and methods, this paper summarizes the existing resource optimization schemes, and sorts out the technical difficulties, such as communication performance improvement in large-scale cluster scenarios, timely decision update in high-complex environments, and communication satisfaction improvement in multi-heterogeneous requirements. Finally, the technical direction and development prospects of the UAV swarm communication network are prospected based on the research status, potential application value and the application advantages of emerging technologies.

**Key words:** unmanned aerial vehicle(UAV) swarm; large-scale network; UAV communication; resource optimization

## 引 言

无人机以其高机动、低成本的特点近年来在军事和民用领域得到广泛应用,自20世纪70年代以来,军用无人机在电子战中扮演着极为重要的角色,无人机技术的发展水平也成为衡量一个国家军事实力和作战力量的重要标志。目前,全球军用无人机已经有两百多种型号,在电子对抗、抵近侦察和信号拦截等任务中展现出独特优势。除了军事领域的应用外,无人机在民用领域也得到了稳步发展,伴随着各国对无人机民用产业的大力扶持,其应用已经渗透到社会生活的方方面面<sup>[1-3]</sup>。据中国产业研究院数据预测数据显示,到2023年中国工业级无人机市场规模会达到968亿元,其中军用无人机约为350亿元,民用无人机近620亿元。

如同自然界中动物通过成群结伴来弥补个体能力的有限,近年来,无人机集群也因其潜在的巨大应用价值得到快速发展<sup>[4]</sup>。以集群形态执行复杂任务已成为无人机应用的重要模式,飞速发展的通信技术确保了无人机之间的高效协同,使得集群满足快速临机部署的要求,能够更快地完成侦察、监视、搜索和救援等任务<sup>[5-7]</sup>。此外,通过频繁的信息交互达成动态协同,使集群呈现出抗打击能力强的特点,对故障具有一定的容忍度。借助邻居辅助传输,无人机集群实现通过簇头、中继等方式交互共享信息与资源,花费开销较低<sup>[8]</sup>。由此可见,无人机集群依托先进开放的通信网络,呈现出快速高效、强抗毁性和低开销等优势。

无人机集群网络是实现无人机集群实时信息传输的神经网络,是飞行自组网(Flying ad hoc network, FANET)<sup>[9]</sup>、无人机协同网络<sup>[10]</sup>、无人机携能网络<sup>[11]</sup>、无人机辅助的认知无线网络<sup>[12]</sup>、无人机辅助物联网<sup>[13]</sup>和超密集无人机蜂群网络<sup>[14]</sup>等场景化网络实现通信的基础。由此可见,通信功能的实现是无人机其他功能应用的依托,是整个无人机网络的核心。与集群的优势相对应,无人机集群网络同样具有其独特的应用优势。例如,单无人机与地面设备组成的通信网络要求无人机保持与控制站、基站和服务器的连接,这对于无人机有限的电量和通信带宽来说是严重的负担。而在无人机集群网络中,能通过部分无人机与地面站或控制中心保持通信,而其他无人机维持组网内部的通信和任务执行,当有节点出现通信中断,还能利用强大的自组织能力重新恢复的通信架构,有效发挥网络分布式和自主性等优势。

从另一个角度讲,与单无人机通信网络相比,集群中无人机数量的大幅增加也导致了交互信息量激增、网络拓扑时变、移动路线复杂化、链路中断频繁、频谱效率低下、网络性能下降和通信资源短缺等问题。在此情况下,如何在保障无人机集群网络稳定通信的条件下,合理规划和分配有限的资源成为急需突破的一项难题<sup>[15]</sup>,这就需要采取各种策略来实现资源的优化和管理。现有无人机集群网络研究相关综述<sup>[16-17]</sup>,重点关注无人机飞行控制、任务规划等领域,缺乏对通信网络资源优化的相关研究梳理总结,因此,有必要针对无人机集群网络资源优化研究开展综述工作。

本文从应用场景与优势入手,首先介绍无人机集群网络研究的巨大应用价值,分析无人机集群网络的特点与挑战,对不同接入体制下的无人机资源优化问题进行分类。其次,对现有研究进行总结,从功率、频谱、空间部署、图论和博弈论等角度梳理现有的资源优化策略和优化方法。最后,探讨无人机集群网络的未来技术方向与发展潜力。

## 1 无人机集群网络概述

随着新一代网络通信业务不断增长,许多复杂任务开始着眼于使用无人机群进行协同配合完成,由多架无人机组成的无人机集群网络应运而生,如图1所示,其相关研究已受到世界各国的重视与关注<sup>[18-19]</sup>,成为无线通信最前沿的研究方向之一。无人机集群网络是实现无人机集群间实时信息传输的通信手段,是一种典型的移动 Ad hoc 网络,由每个无人机分布式做出决策和完成任务<sup>[20]</sup>。

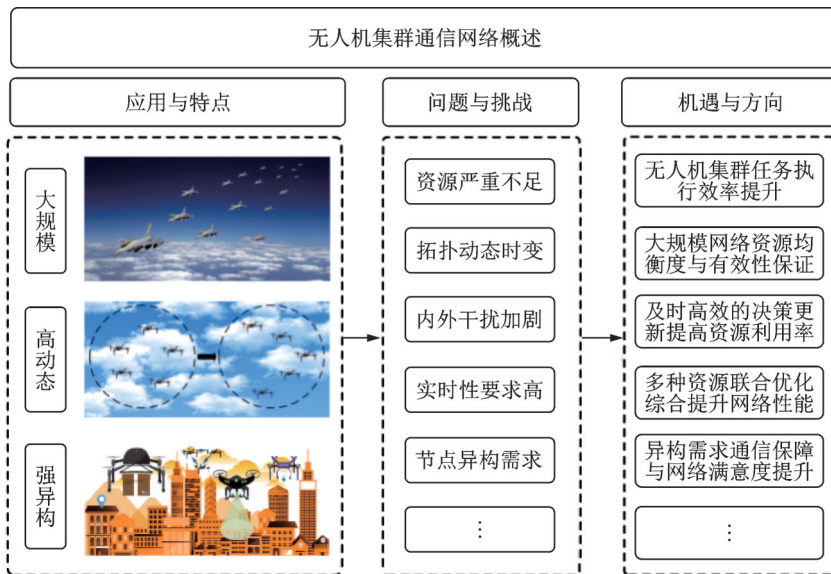


图1 无人机集群网络概述

Fig. 1 Overview of UAV swarm communication network

### 1.1 无人机集群网络的应用场景与优势

随着“集群”和“协作”等概念的推广及相应技术的不断成熟,由整体任务驱动的无人机集群系统已应用于各种复杂场景中<sup>[21]</sup>。例如,城市园区安防<sup>[22]</sup>、电力巡检<sup>[23]</sup>、物流运输<sup>[24]</sup>和水务勘探<sup>[25]</sup>等。进一步地,无人机集群系统的广泛应用与复杂的通信需求也推动了通信网络的研究扩展。无人机集群网络通常以具体的网络形式应用于不同场景中,如在无人机传感器网络<sup>[26]</sup>、空地融合无人机网络<sup>[27]</sup>、无人机携能网络<sup>[28]</sup>、无人机FANET<sup>[29]</sup>、超密集无人机网络<sup>[30]</sup>和无人机辅助物联网<sup>[31]</sup>等网络中提供通信服务。

集群网络不仅是无人机通信的具体形式,还是无人机集群任务执行、信息获取和飞控协同最主要的协作途径。无人机集群网络的通信拓扑有别于单机与地面站的通信拓扑,是一种立体全方位通信网络拓扑,能够更大程度满足现代化通信和复杂任务执行的需求。其研究意义与其在军用、民用通信领域的巨大应用价值是密不可分的。在军用领域,由于无人机集群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,此时,无人机集群网络中其他节点能够及时代替失效节点,完成网络连通性自恢复<sup>[32]</sup>。除此之外,无人机信息通信高效运作对于取得战场信息主动权和达到预定的作战目标都具有重要意义。美国国防部在《无人机系统路线图2005-2030》<sup>[33]</sup>中指出,到2025年,集群无人机将具备战场认知能力,并希望构建横跨航空、太空和网络空间的无人机网络,能够实现完全无人机集群自组织作战。在民用领域,无人机集群网络将服务于机群的通信,面对复杂多变的城市通信环境,无人机集群网络可临时、动态、快速构建分布式无中心的自治性专用网络,可以支持无人机临时加入和退出,从而大幅提高地面勘探、精准农业、应急救援和遥感测绘等场景的作业效率。中国移动《基于5G通信技术的无人机立体覆盖网络白皮书》<sup>[34]</sup>中指出,中国无人机行业的高速发展不仅为相关产业的带来机遇,同时也对无人机通信链路提出了新需求,整体呈现出与蜂窝移动通信技术紧密结合的发展趋势。以往无线信号主要以地面覆盖为主,没有针对低空的覆盖设计,低空无人机网络覆盖和数字化应用是一块有待开发的宝藏,针对无人机集群网络的探索和研究将使得那些原本难以想象的应用成为可能。

## 1.2 无人机集群网络的特点与挑战

无人机集群网络显示出“大规模”、“高动态”、“强异构”等特点,为其深入研究带来了极高的要求和全新的挑战。其中,“大规模”表明无人机群节点数量多规模大,有限的通信资源难以满足每个节点的需求,网络的通信性能受到影响;“高动态”即由机群移动性带来的拓扑变化、内外环境动态变化产生的通信干扰等影响,以及时变的通信任务对机群部署的动态要求等;“强异构”表明机群节点功能多、用途广,通信需求和业务负载呈现出较强的异构性。具体如下。

### 1.2.1 大规模

随着电子技术的发展,无人机集群呈现小型化、蜂群化趋势,由大规模无人机集群网络支持的超密集无人机集群已经成为复杂任务执行的重要形式。然而,通信规模的不断扩大与资源有限性之间的突出矛盾对于资源分配提出了严峻的考验,无人机集群需要维持内部密切的交互与联系,大型任务的执行又对通信业务的性能指标有较高的要求,二者相互影响致使本就稀缺的资源更加紧俏,集群内通信态势更加复杂耦合。这给无人机集群网络的资源分配<sup>[35]</sup>、信道接入<sup>[36]</sup>以及网络路由<sup>[37]</sup>以及计算卸载<sup>[38]</sup>等带来了巨大的挑战。因此,如何实现大规模无人机网络中通信资源的有效分配,如何提升大规模集群场景下的通信网络性能,成为一个关键问题。尽管规模的增大致使资源优化难度增加,但也给无人机集群系统的应用带来了新的机遇,特别是与新兴科技的结合,将给无人机应用场景、任务规模和计算复杂度带来巨大突破。

### 1.2.2 高动态

动态变化的外部环境和无人机群的高机动性是无人机集群网络有别于传统无线网络最显著的特点之一,由此导致的集群内部拓扑的时变特性,显著降低了无人机的决策速度和效率<sup>[39]</sup>。与地面相对静态的通信网络不同,集群中的无人机在整体任务的驱动下,需要持续与相邻或相关无人机交互信息,大量的信息交互导致了通信需求的动态性,进一步地加剧了决策的难度,使得网络的复杂程度进一步加深<sup>[39]</sup>。同时,由于空地链路和无人机飞行环境不稳定等原因,无人机集群网络还存在受到内外部联合干扰的情况。文献[40]的干扰发现理论证实了内外部干扰对无人机集群网络中上行链路容量的严重影响,这对于通信资源的优化方式提出了更高的要求。因此,在高动态的网络背景下,如何实现及时、准确和高效的决策更新,提高资源的利用率,成为当前研究中面临的一个重要挑战。

### 1.2.3 强异构

节点在任务中承担的功能、网络拓扑位置等因素共同导致了网络差异化的需求,节点通信业务负载、服务需求、通信场景和通信质量等方面均呈现出较强的异构性<sup>[41]</sup>,这使得资源的有限性和系统异构需求的增长之间出现矛盾。强异构的通信网络对资源优化提出了新的要求——如何在满足每架无人机需求的条件下节约各种通信资源,实现机群节点业务负载和通信资源高效匹配,这也是当前研究中的难点问题。如何在兼顾通信效能的基础上,对多种资源进行复用,提高资源共享效率,是无人机集群网络资源优化的重要机遇和挑战。从另一个角度讲,需求的强异构发展态势同样也表明机群节点种类繁多、功能用途广泛,反映出无人机集群网络的飞速发展<sup>[42]</sup>。

## 1.3 无人机集群通信的无线信道接入控制体制下的资源优化问题

资源优化问题与网络所使用的信道接入控制体制密不可分。在不同的无线信道接入控制体制下,网络中的通信具有不同的特点,因此,针对资源优化的主要形式和重要内容也不同。对于无人机集群通信而言,常见的接入体制大致可以分为3类:竞争型、固定分配型和按需分配型。基于此,本文从接入体制的视角对资源优化问题进一步划分,主要分为集中式静态资源分配、分布式静态资源分配、分布式动态资源竞争和混合式资源竞争4种类型。同时,本文还列举了每一种接入体制下的资源优化策略。



### 1.3.1 基于竞争的接入体制

基于竞争的信道接入体制以载波侦听多路访问(Carrier sense multiple access, CSMA)为主要形式,在这种体制下,网络节点竞争使用信道发送数据,如果发生了碰撞,就按照一定规则进行退避与重传。在分布式无人机网络中,信道接入的竞争是无人机集群网络资源竞争的主要方面,分布式动态资源竞争问题也是这种接入体制下研究较为广泛的优化问题。例如,在认知无人机网络中,次要无人机可以通过感知来判断主用户是否正在使用信道,以自主寻找和使用空闲频谱,在认知无人机网络中获得通信中断概率性能的改善,进而大幅提升频谱效率<sup>[43]</sup>。

### 1.3.2 基于固定分配的信道接入体制

基于固定分配的信道接入体制以时分复用(Time division multiple access, TDMA)技术、码分复用(Code division multiple access, CDMA)技术等复用技术为主要形式。信道的固定分配对信道内部的资源划分合理性提出了更高的要求,因此,静态资源分配问题成为了资源优化的主要方面。例如,在基于TDMA技术的频谱稀缺无人机集群网络中,节点能够在同一信道的不同时间隙上进行数据传输,将信道分配优化转化为时隙划分优化,既满足了巨大的通信需求,又为频谱分配、频谱共享等问题提供了有效的解决方案。基于固定分配的信道接入体制还能够在媒体存取控制位址(Media access control address, MAC)层增加一层保障机制,文献[44]中提出一种基于混合碰撞协调技术的多址方案,以公平和效率为原则,在MAC层提供一定服务质量(Quality of service, QoS)保障的接入控制协议,推动了跨层联合资源优化问题的研究。尽管复用技术的引入大幅提升了通信资源的利用率,但依然有一定缺点,需要结合多种资源优化策略以达到更好的效果。例如,CDMA技术存在自干扰严重的问题,当这一技术与功率控制算法相结合时,就能够有效实现干扰抑制,发挥其大通信容量、高频谱效率的优势。

在大规模接入场景即无人机蜂群网络中,网络架构和接入控制协议是影响网络性能的重要因素。在这样复杂的场景中,无人机集群通信系统要同时实现异构大规模接入,采用传统的竞争接入机制会带来效率过低、信令开销过大以及复杂度过大等问题。当前,高效的非正交接入体制成为目前的研究热点。非正交多址接入(Non-orthogonal multiple access, NOMA)通过在发射端采用叠加编码和在接收端采用串行干扰消除(Successive interference cancellation, SIC),使得多个信道增益相差较大的移动终端可以共享同一个无线资源块,从而有效地提高系统频谱效率。然而,串行干扰抵消SIC技术和不完美SIC等问题的存在,严重限制了NOMA系统的性能。NOMA接入技术的快速发展和性能受限极大地促进了频谱共享配对和功率分配等问题的研究。例如,文献[45]通过对NOMA网络中强弱用户匹配结果和功率分配进行联合优化,实现了更高的系统和速率。

### 1.3.3 按需分配的信道接入体制

按需分配的信道接入体制以集中轮询竞争为主要形式,典型的有轮询和令牌传递。其中,轮询属于集中式控制,控制节点按一定顺序问询。如果有传输需求,则被询问的用户节点就立即接入信道;如没有,则控制节点依次询问下一节点。令牌环属于分布式控制,在环路中通过特殊的令牌环帧沿着环路传递,只有获得令牌的节点才有权发送信息。当信息发送完毕,就将令牌传递给下一站。基于按需分配的接入体制,无人机集群网络可以通过合理划分优先级机制构建资源竞争模型,通过设置休眠/唤醒和捎带机制降低接入能耗,以及通过门限服务等方式提高数据传输效率,从而实现接入效用的提升<sup>[46]</sup>。

## 2 无人机集群网络通信资源优化相关工作

通信系统的资源优化,就是在物理条件及实际通信质量要求的约束下,通过合理的分配资源来优化预先设定的目标,最大化系统的资源利用效率。无人机集群网络的通信资源是指无人机集群通信过

程中涉及到的资源总称,可以按作用分为计算资源与无线资源以及能量资源。其中,计算资源一般指无人机维持通信、处理任务以及进行各种决策规划时所需的CPU资源<sup>[47]</sup>、内存资源<sup>[48-49]</sup>、硬盘资源<sup>[50]</sup>等。无线资源,即与空口电磁波相关的所有资源,这类资源通常与多址复用有关,例如频分复用对应频谱资源<sup>[51-52]</sup>,时分复用对应时隙资源<sup>[53-54]</sup>。无人机集群网络的能量资源泛指无人机飞行、通信、传感所需的能量,其优化形式以功率控制、部署优化为主<sup>[55-56]</sup>。本文主要针对无线资源与能量资源的优化策略与方法展开综述。

## 2.1 无人机集群网络通信资源优化策略

### 2.1.1 功率优化

不同于地面通信网络,无人机能耗包含飞行能耗和通信能耗,并且飞行能耗通常远大于通信能耗。为此,需要联合考虑无人机飞行能耗和通信能耗,加之无人机由于自身体积与电池限制而能量有限,如果能源配置不合理,则无法长时间保持通信。因此,发射功率的分配与控制问题将直接影响系统能量的效用<sup>[57]</sup>。相关研究表明,无人机集群内部的干扰是导致网络性能降低的主要原因,文献[58]研究了满足无人机间通信速率的前提下节省发射功率的问题,利用深度学习的功率控制方案有效降低无人机的相互干扰、提高系统能量效率。文献[59]针对密集无人机集群的功率控制问题进行研究,将无人机间的互扰关系建模为平均场博弈,并提出了一种基于深度强化学习的平均场博弈论算法,有效增强了系统能效。超密集无人机网络面临更加有限的资源和更复杂的耦合关系,文献[60]研究了超密集无人机网络下行链路功率控制问题,将问题建模为离散平均场博弈(Mean-field games, MFG),并对无人机间的相互作用进行仿真,提出了一种基于深度强化学习的平均场博弈算法,探索无人机最优功率策略,实现了系统能效最大化。针对无人机辅助通信网络中的能量节约问题,文献[61]对能源有限的无人机辅助物联网展开研究,将能量传输与信息传输过程建模为无人机能耗模型,在实际能耗约束下,提出了一种功率约束与有限飞行和悬停能量收集方案,得到最佳时间分配和悬停时间比,最大限度地提高了网络吞吐量。

### 2.1.2 频谱优化

频谱是无线通信网络的重要载体,随着无人机集群规模的扩大和信息交互量的剧增,频谱资源被视为影响无人机通信的重要因素。据可靠数据统计,美军“全球鹰”无人机到目前为止已经占用了550 M/s通信带宽,是“捕食者”无人机占用带宽总和的十多倍。显然,频谱资源的短缺对作战力量将产生显著影响,极大地制约了任务效能。

#### (1) 频谱共享

频谱共享技术能够实现在同一频段按需划分频谱资源。无人机没有专用频谱,为了更好地实现无人机集群通信,通常与蜂窝网络进行频谱共享。在频谱共享过程中,无人机作为蜂窝用户的中继传输节点,不仅帮助无人机获得许可频谱访问机会,还能提高蜂窝用户的传输速率,进而实现双赢的局面<sup>[62]</sup>。文献[63]研究了D2D和无人机间的三维频谱共享问题,其中无人机利用空间频谱传感,机会地访问地面用户的D2D通信信道,在保证D2D网络通信的前提下最大限度地提高了无人机网络单位面积的频谱利用率。近年来,无人机作为空中基站为灾后紧急场景提供临时通信服务,极大地保障了灾后救援的时效性。文献[64]研究了认知无线网络中无人机为受影响地区提供扩展的网络覆盖,提出一种频谱共享框架,在对主要用户造成最大可容忍干扰的严格约束下优化了网络吞吐量。

#### (2) 频谱分配

无人机集群通信所需传输的数据交互频繁,对传输的吞吐量和稳定性要求较高,当可用频谱不足时,若不对信道配置加以优化,时变的信道环境和无人机间的相互干扰会极大地影响传输速率,导致传

输成功率与资源利用率降低。为此,需要使用动态频谱分配,让无人机集群根据信道环境动态的切换信道,解决无人机集群网络在有限的传输条件下的最优频谱选择。目前,已有许多工作对频谱动态分配问题进行了研究。文献[65]将移动性引起的动态拓扑结构建模为动态图,将信道选择问题转换为动态图形着色问题,利用图形着色策略优化频谱分配,降低了动态环境扰动下的同信道干扰。随着匹配博弈理论不断发展,频谱分配问题的研究也得到了极大的推动<sup>[66]</sup>。针对无人机集群受到内外干扰的情况,文献[67]从博弈论的角度探讨了干扰环境下的多无人机网络机会频谱接入问题。考虑每架无人机的通信需求与集群内干扰和集群间干扰,频谱选择问题被建模为加权干扰缓解博弈,设计激励机制,极大地提高了频谱分配的高效性。进一步地,文献[68]将无人机-中继-频谱的匹配关系问题建模为多对多的匹配博弈,并提出了势能匹配选择算法,实现无人机集群网络频谱资源的合理分配,进而达到全网满意度的提升。

除此之外,采用缓存、NOMA等技术优化频谱利用率近年来也备受各国学者关注。文献[69]研究了如何通过有效的边缘缓存来提高整体频谱效率。其中,无人机根据请求的内容为用户提供服务,从而使服务内容更接近用户。基于对以内容为中心的无人机集群频谱效率的分析,提出了一种混合缓存策略,在保证服务质量的同时,利用有限的频谱资源缓存更多数据。近年来,随着NOMA得到广泛研究,第5代及以后(B5G)无线通信的频谱效率得到显著提高。同时,新兴的B5G服务在基于NOMA的无线通信中对频谱效率有更高的需求。为了应对这一挑战,文献[70]研究了多无人机辅助上行链路NOMA的场景,提出了一种基于K-means集群的无人机部署方案和基于位置的用户配对方案,以无人机仅消耗少量中继功耗为代价,显著提高了蜂窝上行链路的频谱效率。

### 2.1.3 部署优化

不同于功率优化、频谱优化,对于无人机位置、路径和轨迹等部署方面的优化既是无人机集群智能协同控制的关键策略,也是空间资源优化的重要方面<sup>[71-72]</sup>。以空地通信资源优化问题中的位置部署为例,不同的位置将对链路质量产生不同的影响,具体来说,空地链路的增益可以表示为

$$g(x, y) = \begin{cases} (x^2 + y^2 + H^2)^{-\alpha} & \text{视距 (Line of sight, LoS)} \\ \eta(x^2 + y^2 + H^2)^{-\alpha} & \text{非视距 (Non line of sight, NLoS)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为无人机空地通信链路的路径损耗指数,表示由非直射传输带来的额外衰减。LoS传输概率取决于无人机和地面节点的位置、环境参数和仰角,可以表示为

$$P_{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + a \exp(-b[\theta - a])} \quad (2)$$

式中 $a$ 和 $b$ 为环境参数。由此可得NLoS的概率为 $P_{\text{NLoS}} = 1 - P_{\text{LoS}}$ 。在实际通信中,空地通信链路的增益为

$$g_u(x, y) = P_{\text{NLoS}} \times \eta(x^2 + y^2 + H^2)^{-\alpha} + P_{\text{LoS}} \times (x^2 + y^2 + H^2)^{-\alpha} \quad (3)$$

在业务流量空间分布不均的无人机通信网络环境下,通过对通信网络空间资源进行实时感知及合理管控,能够辅助网络通信实现高效协同,减少低效、冗余的信息交互,有效节约资源。例如,移动边缘计算(Mobile edge computing, MEC)网络中的业务流量分布具有动态且不均匀性,且不同MEC服务器的计算负载有较大的差异,进而服务器负载与其资源之间的不匹配将导致资源利用率降低和任务时延增大的问题。为了均衡计算负载充分发挥MEC的优势,进一步提升移动通信系统的性能,必然需要考虑MEC系统中的部署优化问题。由此可见,尽管部署优化不是直接对某一种资源进行调节,但通过合理的部署优化,无人机集群网络将在更大程度上发挥各项资源的作用,达到更高的通信性能<sup>[73-77]</sup>。

#### (1) 位置部署

根据无人机的静态和动态特性,其位置部署主要可以分为静态部署与动态部署。文献[71]对无人



机的静态特性展开研究,考虑上行链路和下行链路传输,通过3D位置优化以最大限度地提高了最小平均总和率。实际上,无人机集群在任务执行过程中可能受风力、天气等环境因素影响,其位置的部署难以长时间保持静态,为解决这一问题,许多研究者将目光转移到动态位置部署的研究中,文献[72]令无人机动态学习最佳3D停留位置,将位置博弈建模为势能博弈,其中无人机可以通过仅优化局部效用函数来最大化和速率。此外,还有一些工作如文献[78,79]关注了物联网对节能通信的需求。通过探索无人机的最佳位置,实现无人机数据采集能效最大化。在文献[80]中,每架无人机都受到能量存储和无线覆盖的限制,提出了一种最优的节能位置部署算法,在部署后对无人机物联网设备进行匹配,最大限度地提高了物联网服务请求的可用性,降低了平均服务延迟。

### (2) 轨迹优化

在无人机集群网络中,针对无人机的轨迹优化是提升通信性能、节约资源的常用策略。文献[81]研究了一种无人机辅助地面终端数据收集系统,当无人机靠近地面终端时,地面终端就能够以较低的发射功率传输目标数据。为了达到网络性能与资源节约之间的平衡,优化无人机轨迹与地面终端发射功率,在二者之间实现帕累托最佳权衡。文献[82]研究了无人机的空地无线通信,其中无人机被调度与多个地面节点(Ground nodes, GNs)进行通信。考虑降低无人机的总能耗,包括推进能量和通信相关能量,同时满足每个GN的通信吞吐量要求。优化无人机轨迹和GN之间的通信时间分配以及总任务完成时间,制定能量最小化问题。文献[73]研究了一种无人机辅助通信系统,以按需覆盖的思想优化轨迹,为地面用户提供服务,从而最大限度地提高系统和速率。

### (3) 路径规划

无人机的路径规划就是根据任务的目标对满足所有约束条件的最优飞行路径作出规划,其对资源优化的意义在于合理的飞行路径能够减少资源的浪费,在资源节约和任务执行之间取得平衡。文献[74]研究了蜂窝网络的无人机集群三维路径规划问题,以最小化其从初始位置到最终位置的飞行距离,同时确保目标链路质量,以实现网络性能与复杂度的灵活权衡。文献[75]考虑了最小化无人机群总飞行时间问题,以任务完成可行性为约束,介绍了一种基于图的几何路径规划算法,以生成可行且无碰撞的路径,并根据进化博弈粒子群优化和几何规划生成的路径来实现资源分配优化。文献[76]考虑无人机充当中继的场景,将部分数据流量从过载的小区卸载到另一个小区。通过基于深度强化学习的方法解决路径规划问题,指示无人机在每个位置采取最佳行动,达到了较低的平均信道路径损耗。文献[77]考虑了通过主动设计无人机路径来最大限度地缩短信息传输时间,提出了一个基于无人机间(U2U)通信的通用优化框架,该框架涵盖了吞吐量要求、地面发射机的干扰、无人机最大/最小速度和加速度以及最小U2U距离约束,提出了一种基于精确惩罚法和连续凸近似的路径规划方案,最终在计算复杂性和网络性能之间取得较好平衡。

#### 2.1.4 联合优化

在通信资源优化的研究中,联合优化是一种重要且有效的方式。通常对于复杂场景或复杂优化问题,需要从多个方面改善通信网络。通常,将两种或多种优化方式相结合,实现联合优化,促进问题的解决。文献[83]为了解决移动边缘计算中边缘设备资源有限且多边缘设备间负载不均衡的问题,对多边缘设备协作开展研究,提出一种面向多边缘设备协作的任务卸载和服务缓存在线联合优化机制,将任务卸载和服务缓存联合优化问题解耦两个子问题,分别采取优化策略,设计基于偏好的双边匹配算法,有效降低了任务整体执行时延,同时实现了边缘设备间负载均衡。文献[84]将轨迹优化与功率控制相结合,实现了无人机网络端到端的吞吐量最大化,有效提升了无人机集群通信系统容量。文献[85]采用了基于功率分路的中继方案,解决了物联网设备选择、无人机中继分配、源功率分配和功率分路比的联合优化问题。文献[86]通过将云服务设备部署到无人机上,让多架无人机相互协作以提供大



面积边缘计算。联合迭代优化部署无人机数量和系统的能耗,有效实现了系统性能提升。除此之外,文献[87]研究了无人机协同覆盖和无人机节能问题,联合优化覆盖面积与功率,采用基于空间自适应的高能效覆盖算法,实现了最优节能部署。

综上所述,无人机集群网络通信资源优化策略的总结研究如表1所示,可以主要分为功率优化、频谱优化、部署优化,以及联合优化的策略。针对不同的研究场景,可以采用不同的优化策略,实现有限资源的最大化利用。

表1 无人机网络通信资源优化策略

Table 1 Optimization strategy for communication resources of UAV network

资源类型	资源	优化目标	优化策略与参考文献
能量资源	能量	最小化系统能耗	功率优化 <sup>[55,58-60,61]</sup>
		最大化系统能效	
无线资源	频谱	最大化频谱资源利用率	频谱优化:频谱共享 <sup>[52-53,63-64]</sup>
		最大化和速率、网络性能与灵活性均衡	频谱优化:频谱分配 <sup>[65-68]</sup>
	—	最大化系统吞吐量	部署优化:位置部署 <sup>[56,71-72]</sup>
			部署优化:轨迹优化 <sup>[73-74]</sup>
			部署优化:路径规划 <sup>[75-77]</sup>
能量	覆盖与节能均衡	联合优化:覆盖面积与功率 <sup>[87]</sup>	
时间	最优时间资源分配	联合优化:时隙与功率 <sup>[53-54]</sup>	
计算资源	内存	最优内存资源配置、缓存配置	联合优化:发射功率与轨迹 <sup>[48-49]</sup>
	CPU	CPU资源配置与复杂度均衡	联合优化:CPU频率、数据卸载量、发射功率 <sup>[47]</sup>

## 2.2 无人机集群网络通信资源优化方法

随着无线通信技术的发展,针对通信资源优化的理论与方法研究越来越丰富。在无人机集群网络中,现有的资源优化方法主要包括图论、博弈论、学习算法和启发式算法等方法,以及资源规划、决策优化和联合优化等策略。具体而言,无人机网络通信资源优化理论方法的总结研究如表2所示。

### 2.2.1 图论

图论的引入对无线通信研究领域的影响巨大。在具有大规模、强异构特点的无人机通信网络中,图论能够将复杂的合作与竞争关系刻画为点、边和权重等图元素,起到了将抽象问题具体化的作用,无论在信道的选择决策还是在基站的接入选择中都充分发挥了其优势<sup>[88]</sup>。例如,在文献[89]中,由于受到频谱资源的限制,多个无人机必须复用同一信道,同时需要同信道干扰管理。作者将动态拓扑结构建模为动态图,刻画出动态变化的干扰关系。不同于一般二元干扰模型只关注成对强干扰链路,对于密集的无线网络,二元图不能很好地模拟复杂的干扰关系,为了解决这一局限性,文献[90]在针对频谱资源的优化方法中引入了超图。如图2所示,由同一条线所连接的圆点为选择同频谱的网络节点,其中,二元边刻画两节点间强干扰关系,超边刻画多节点之间更复杂的干扰关系,可见使用超图这一工具对能够关注到弱干扰所形成的累积干扰,对于采取一定方法使总干扰量进一步降低起到了关键作用,促进网络性能得到进一步的提升。文献[91]根据无人机的不同位置确定NOMA中的用户分组和功率分配,提出了一种基于信干扰比超图的联合分组和功率控制NOMA方案,以获得适当的传感器分组和最佳功率控制。文献[92]研究了蜂窝连接的无人机群的能耗与通信满意度平衡问题,采用凸优化技术

和动态权重最短路径算法,得到一个离散化等效问题,并基于图论开发出一个有效的解,揭示了无人机能耗与通信持续时间之间的权衡。

2.2.2 博弈论

博弈论近年来在通信领域问题的求解和优化中主要用于分析多用户之间的相互作用,对多节点系统稳定状态的求解具有良好特性<sup>[93]</sup>。例如,无人机集群网络中的高动态、强异构的特性对于算法的快速收敛提出了更高的要求,而博弈论往往能够精准刻画节点间的资源竞争关系,并以较低的迭代次数实现性能的大幅提升<sup>[94]</sup>。此外,随着无人机群协同得到广泛关注,对于无人机群的成员来说,资源获取与分配逐渐由自私和贪心选择变化为服务于全局任务的完成,使得基于局部信息的分布式博弈被广泛研究<sup>[95-97]</sup>。借助博弈论研究无线网络中的频谱接入、路由选择、功率控制、位置部署和中继选择等问题也成为了现阶段的研究热点。在文献[95]中,无人机和物联网设备的配对被建模为多对一的匹配博弈,根据基于无悔学习的非合作博弈调节匹配结果与发射功率,保证了无人机的快速数据传输和带宽的最佳利用。势能博弈作为一种具有快速收敛特性的博弈模型,在高动态的无人机集群网络分布式决策中展现出其独有优势。文献[96]考虑了将无人机中继通信建模为多对多匹配模型,如图3所示,设计了一种无可替代的势能匹配博弈方法求解,基于局部匹配过程的优化促进全局匹配结果的改进,实现了异构需求下的通信公平性与全网满意度提升。针对干扰环境下的无人机集群通信场景,文献[97]从干扰最小化的角度提出了一种广义干扰模型,构建干扰最小化势能博弈,最大化网络吞吐量。除了上述博弈,联盟博弈<sup>[98]</sup>、斯坦伯格博弈<sup>[99]</sup>、平均场博弈<sup>[100]</sup>等博弈论模型,均对无人机的全局通信性能优化产生了重要影响。

2.2.3 学习算法

学习算法能够根据环境条件的变化进行实时程序和参数的调整,并通过一定的自我决策机制提升策略的选择效率。无人机集群网络中高动态的特性,对于资源竞争的及时决策提出了更高效的要求,当网络环境发生变化,学习算法能够辅助节点进行动态决策更新,在对抗无人机动态干扰攻击的场景中得到广泛研究<sup>[101-104]</sup>。无悔学习、最优响应、对数线性学习和空间自适应行动(Spatial adaptive play, SAP)等学习算法能够分别对不同博弈架构下的分布式多决策模型进行高效稳健的决策学习并求解,其决策动态更新过程图4所示。文献[101]考虑了多无人机辅助地面用户设备(User equipment, UE)通信场景,联合设计无人机位置、发射波束成形以及无人机与UE的关联关系。针对拓扑变化导致无法获得信道状态信息的问题,利用深度Q学习方法解决了确定无人机位置部署的问题,优化了网络性能。文献[102]利用迁移学习技术,使无人机能够“共享”和“迁移”学习知识,从而减少学习时间并显著提高学习质量,显著提高了系统的平均数据收集性能,并将收敛时间缩短多达50%。针对无人机集群受到动态干扰攻击的问题,文献[103]引入分布式协调其信道选择策略,通过博弈论分析和分布式学习,提

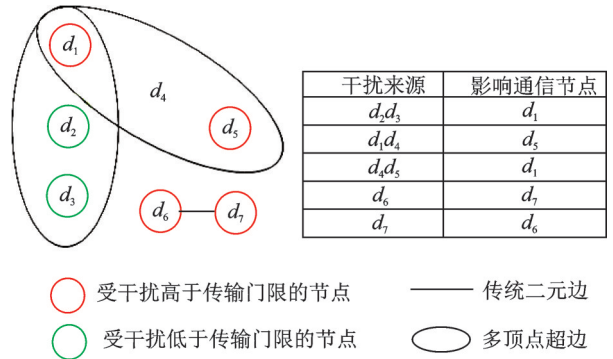


图2 累积干扰超图模型

Fig. 2 Cumulative interference hypergraph model

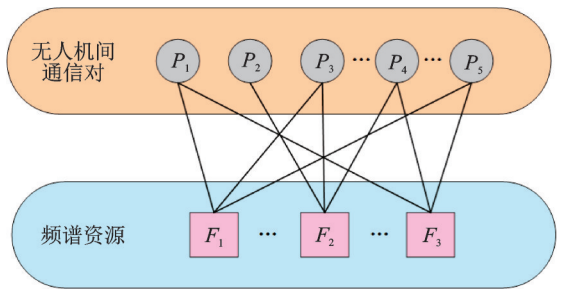


图3 频谱资源匹配博弈

Fig. 3 Spectrum resource matching game

高动态干扰环境下的全网满意度。对于高动态的无人机网络,深度强化学习是解决分布式决策问题的一种高效方法,文献[104]考虑无人机集群用于视频捕获、处理和传输的场景,提出一种基于强化学习的无人机抗干扰视频传输方案,利用深度学习加速无人机学习过程,有效降低传输中断概率、传输时延以及能耗。

除了上述方法,在无人机集群网络资源优化的研究中,随机几何分析<sup>[105]</sup>、凸优化<sup>[106-107]</sup>、拉格朗日对偶法<sup>[108]</sup>、粒子群优化方法<sup>[109]</sup>、非线性优化方法<sup>[110]</sup>以及启发式优化方法<sup>[111-112]</sup>等也发挥了重要的作用。具体而言,无人机网络通信资源优化理论方法的总结研究如表2所示。

表2 无人机网络通信资源优化理论方法研究

Table 2 Theoretical method for optimizing communication resources of UAV networks

研究场景	物理目标	主要约束	优化变量	理论方法	相关文献
无人机集群	最大化系统能效	信噪比	功率	图论、匹配博弈、深度学习	[65-68]、 [71,58,59]
无人机集群辅助地面用户通信	最小化无人机的任务完成时间 最大化地面用户可实现速率之和	接收信噪比、机载能量、飞行持续时间 前传链路容量、中断概率	无人机轨迹 无人机位置、发射波束成形、无人机与地面用户匹配	图论、凸优化 深度Q学习、混合整数非线性规划	[77,78] [101,104]
无人机集群辅助数据收集	最大化网络吞吐量 最小化总飞行时间 网络性能与资源节约均衡	信噪比、功率上界等 任务执行可行性 信噪比、飞行高度限制	无人机位置、传感器分组、功率 无人机路径 无人机路径	超图博弈 图论、博弈论 凸优化	[90] [80] [72,76]
无人机辅助的能量受限物联网节点数据传输	最低能耗 最低中断性能和最大吞吐量	空地链路最小信噪比 距离约束	无人机路径与轨迹优化 节点位置、上下行阶段的时间分配比、无人机的发射功率	图论、凸优化、Q学习 随机几何	[91] [105]
无人机辅助地面基站通信	网络性能和服务成本均衡	基站带宽	节点位置、频谱接入选择、基站带宽分配	演化博弈、非合作博弈、随机几何分析	[94]
无人机中继数据传输	链路抗干扰	满意度要求	频谱选择、无人机间通信配对	匹配博弈、重叠联盟形成博弈	[95,96,103]
无人机边缘计算	数据传输和安全保护	传输速率、能源储备、安全资源需求	频谱分配、频谱利用率	随机几何	[69,83]
超密集无人机网络	最大化和速率	信噪比、功率	无人机水平坐标和高度	平均场博弈、超图博弈	[61,90]

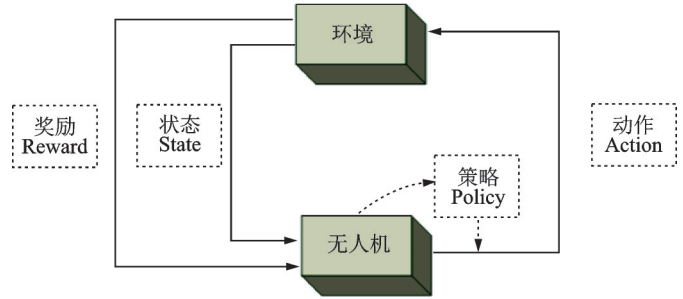


图4 学习算法基本架构

Fig. 4 Learning algorithm infrastructure



### 3 无人机集群网络的未来技术方向与发展潜力

尽管无人机集群系统及其网络已经得到了广泛应用,由于无人机本身的能源限制和频谱资源的有限,使得通信资源优化问题成为构建无人机网络时必须考虑的问题,也是极具挑战性的问题。从另一个角度讲,无人机节点的大规模发展趋势、高动态性和拓扑结构快速变化等特点也驱使了快速收敛的资源优化方法的研究。基于上述研究,本文分析无人机集群网络的未来研究方向或将集中于以下几点。

#### (1) 大规模集群场景下的通信性能提升

大规模无人机场景下的组网通信由于数据量剧增和节点间耦合度增加,通信性能难以得到有效提升。在此背景下,大规模无人机群的组网通信性能将对任务的执行效率和稳定性产生较大影响。针对这一问题,可以采用联合优化方法对系统中的资源进行合理配置,以多元的方式对系统资源进行优化,以节约通信开销。随着无线云技术与大规模无人机集群网络的融合日渐密切,也为无人机集群网络的规模升级创造了条件,使得无人机集群网络在更多场景中得到了广泛应用。此外,大规模输入输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)技术近几年得到了持续发展,对于实现蜂窝连接的无人机集群通信而言,该技术能够成倍提升有限带宽的通信容量与利用率,是破解大规模无人机集群网络性能提升瓶颈的关键突破口<sup>[113]</sup>。

#### (2) 高动态环境下的及时决策更新

智能决策是发挥无人机集群网络优势的核心。强化学习方法作为一种解决动态环境中的分布式决策问题的有效方法,能够使得动态环境下的决策得到优化。动态的拓扑环境与时变的任务目标要求无人机集群具备快速反应能力,及时对航迹路线、任务规划和资源配置做出实时调整,机群内部需要进行实时的信息共享与智能决策控制,以快速响应来自内部或外部的动态变化,提高任务完成的效率和系统的稳定性。针对这一难点,可尝试采用分层模型,对上层的部署和下层的决策进行联合优化,应对通信中可能受到的干扰,通过上下层问题分离来保持通信系统的稳定性。此外,及时决策更新对于算法求解的收敛性能与准确性提出了更高的要求。多智能体分布式决策在应对这类挑战性问题显示出卓越优势,在动态不确定性场景中显示出了较高的稳定性和适应性<sup>[114-115]</sup>。同时,云计算技术的发展也为无人机集群网络提供了动态、易扩展和虚拟化的计算资源,能够辅助无人机集群网络提升复杂任务的分布式计算速度<sup>[116]</sup>。

#### (3) 多元异构需求下的通信满意度提升

需求异构的无人机集群网络通信满意度提升,其意义不仅仅在于实现网络中节点得到想要的信息,更是资源综合利用率提升的体现。针对无人机集群对内容、速率和中断概率等方面的需求,未来研究应当注重对以整体任务的实现效率为目标,采用离线或实时传输方式,将具体任务划分给集群内各个无人机,明确目标和行动,以达到良好的协同效果。同时,应当以异构无人机集群分布式策略优化为重点,强化群体自组织的协调能力,发挥系统可扩展性、鲁棒性强和适应性强的优势。进一步地,对异构无人机的满意度优化问题,可采用稳定匹配、联盟形成等异构分布式协同算法。针对不同任务场景,挖掘核心需求要素,构建基于通信任务的不同维度需求的模型,以多元约束仿真实际场景,设计合理、高效和灵活的群体合作策略,从而实现资源的高效共享。方法层面上,可以考虑采用分层优化、联合优化等方案对异构的需求进行优化,实现多元异构需求下的通信满意度提升,进一步提高无人机集群网络中各种资源的综合利用率。

除此之外,无人机与新兴技术的结合也能产生巨大的产业驱动能力,例如无人机搭载人工智能,协助异构无人机集群实现身份识别、需求分析、分布式智能决策等技术模块,从顶层决策到底层控制实现

核心关键技术的创新突破<sup>[117]</sup>。5G<sup>+</sup>超蜂窝网络支持的无人机集群通信,将空中通信平台和空中用户集成到蜂窝网络中<sup>[118]</sup>。一方面,5G技术能够保证多架无人机安全高效的飞行操作,尤其适用于超密集无人机网络。另一方面,5G技术满足多元化的服务质量要求、下行指挥控制和上行任务相关数据传输等异构需求。此外,电磁传感技术、无线云计算技术也有助于无人机集群网络实现高效可靠的通信,例如避免覆盖漏洞、实现智能协同、定位和轨迹设计,以及联合无人机机动控制提高通信资源分配设计自由度等。

#### 4 结束语

本文从无人机集群网络的应用优势入手,提炼出大规模、高动态和强异构的特点,并分析了资源优化的策略与方法,最后对无人机集群网络的未来发展进行了预测。总体而言,无人机集群已经在众多领域得到了广泛应用,航拍、物流和巡检等各个领域都能看见无人机集群的身影。因此,无人机集群网络的作用也逐渐增加。随着新兴科技的不断发展和复杂任务需求不断增加,无人机集群网络在未来仍具有广阔的发展空间,解决无人机集群任务执行中的资源不足、分配不均和利用率不高等问题,保障多无人机通信网络的高效性与稳定性,对军用和民用领域都具有重大的意义。

#### 参考文献:

- [1] LIU D, XU Y, WANG J, et al. Opportunistic UAV utilization in wireless networks: Motivations, applications, and challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(5):62-68.
- [2] YU X, WU D, LIU D, et al. The heterogeneous demands satisfaction in IoT network: Air-ground collaborative deployment [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(12): 12713-12724.
- [3] 刘育,孙见忠,李航.民用无人机的监管与规范探讨[J].*南京航空航天大学学报*,2017,49(S1):152-157.  
LIU Yu,SUN Jianzhong,LI Hang. Supervision and norm discussion on civil unmanned aerial vehicle [J].*Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*,2017,49(S1):152-157.
- [4] 梁晓龙,侯岳奇,胡利平,等.无人集群试验评估研究现状分析及理论方法[J].*南京航空航天大学学报*,2020,52(6): 846-854.  
LIANG Xiaolong,HOU Yueqi,HU Liping,et al. Analysis and theoretical methods of unmanned cluster test evaluation[J].*Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*,2020,52(6): 846-854.
- [5] WANG B, SUN Y, LIU D, et al. Social-aware UAV-assisted mobile crowd sensing in stochastic and dynamic environments for disaster relief networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 69(1): 1070-1074.
- [6] JIAO Z, ZHANG Y, MU L, et al. A yolov3-based learning strategy for real-time uav-based forest fire detection[C]// *Proceedings of 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. [S.l.]: IEEE, 2020: 4963-4967.
- [7] FENG W, TANG J, YU Y, et al. UAV-enabled SWIPT in IoT networks for emergency communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(5): 140-147.
- [8] LIU D, WANG J, XU K, et al. Task-driven relay assignment in distributed UAV communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(11): 11003-11017.
- [9] CHEN J, XU Y, WU Q, et al. Interference-aware online distributed channel selection for multicluster FANET: A potential game approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3792-3804.
- [10] 邹玉龙,姜晓,严培舜,等.下一代无人机群协同通信网络[J].*南京邮电大学学报(自然科学版)*,2017,37(3):43-51.  
ZOU Yulong,JIANG Xiao,YAN Peishun,et al. Next-generation unmanned aerial vehicle swarm collaborative communication network[J].*Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*,2017,37(3):43-51.
- [11] 黄巍,陈俊良,李犹舜.无人机自组网技术综述与发展展望[J].*电讯技术*,2022,62(1):138-146.  
HUANG Wei,CHEN Junliang,LI Yuhai. Technology Survey and development forecast on unmanned aerial vehicle Ad Hoc networks[J].*Telecommunication Technology*,2022,62(1):138-146.
- [12] LIU D, XU Y, XU Y, et al. Opportunistic data collection in cognitive wireless sensor networks: Air-ground collaborative online planning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9): 8837-8851.

- [13] YUAN Z, JIN J, SUN L, et al. Ultra-reliable IoT communications with UAVs: A swarm use case[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(12): 90-96.
- [14] WANG H, DING G, GAO F, et al. Power control in UAV-supported ultra dense networks: Communications, caching, and energy transfer[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(6): 28-34.
- [15] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(3): 1-14.  
ZONG Qun, WANG Dandan, SHAO Shikai, et al. Research status and development of multi-UAV cooperative formation flight control[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(3): 1-14.
- [16] CHENG N, XU W, SHI W, et al. Air-ground integrated mobile edge networks: Architecture, challenges, and opportunities [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(8): 26-32.
- [17] CHEN J, CHEN P, WU Q, et al. A game-theoretic perspective on resource management for large-scale UAV communication networks[J]. *China Communications*, 2021, 18(1): 70-87.
- [18] ZHOU Y, CHENG N, LU N, et al. Multi-UAV-aided networks: Aerial-ground cooperative vehicular networking architecture [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, 10(4): 36-44.
- [19] GU J, SU T, WANG Q, et al. Multiple moving targets surveillance based on a cooperative network for multi-UAV[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(4): 82-89.
- [20] 王璨, 高辰子. 无人机集群网络拓扑重构及关键技术研究[J]. *舰船电子工程*, 2021, 41(5): 49-52, 82.  
WANG Can, GAO Chenzi. Research on communication networks topology reconstruction and key technologies of UAV swarm k[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(5): 49-52, 82.
- [21] DU Z, WU Q, YANG P, et al. User-demand-aware wireless network selection: A localized cooperation approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(9): 4492-4507.
- [22] 蒋冬婷, 范长军, 雍其润, 等. 面向重点区域安防的无人机探测与反制技术研究[J]. *应用科学学报*, 2022, 40(1): 167-178  
JIANG Dongting, FAN Changjun, YONG Qirun, et al. Research on UAV detection and counter technologies for security key area[J]. *Journal of Applied Science*, 2022, 40(1): 167-178
- [23] LI L, CHENG Q, XUE K, Downlink transmit power control in ultra-dense UAV network based on mean field game and deep reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15594-15605.
- [24] 张芳, 张洪海, 钱欣悦, 等. 面向“最后一公里”的无人机需求预测[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(6): 855-862.  
ZHANG Fang, ZHANG Honghai, QIAN Xinyue, et al. UAV demand forecast for the “last mile”[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 53(6): 855-862.
- [25] 张钟海, 管林杰. 基于无人机 VR 全景的水域岸线监管数字孪生系统研究[J]. *水利水电快报*, 2022, 43(1): 102-106.  
ZHANG Zhonghai, GUAN Linjie. Research on digital twin system of shoretline supervision based on drone VR panoramic VR [J]. *Water Resources and Hydropower Express*, 2022, 43(1): 102-106.
- [26] SAMIR M, SHARAFEDDINE S, ASSI C M, et al., UAV trajectory planning for data collection from time-constrained IoT devices[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(1): 34-46.
- [27] YU Xingyue, DONG Xu, YANG Xiaoqin, et al. Air-ground integrated deployment for UAV-enabled mobile edge computing: A hierarchical game approach[J]. *IET Communications*, 2020, 14(15): 2491-2499.
- [28] 田霖, 苏智杰, 冯婉媚, 等. 面向多无人机携能网络的轨迹与资源规划算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2021, 48(6): 115-122.  
TIAN Lin, SU Zhijie, FENG Wanmei, et al. Trajectory and resource allocation for multi-UAV enabled swipt system[J]. *Journal of Xidian University*, 2021, 48(6): 115-122.
- [29] KHAN A, AFTAB F, ZHANG Z, UAPM: An urgency-aware packet management for disaster management using flying ad-hoc networks[J]. *China Communications*, 2019, 16(11): 167-182.
- [30] LI L, CHENG Q, XUE K, et al. Downlink transmit power control in ultra-dense UAV network based on mean field game and deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15594-15605.
- [31] JI B, LI Y, ZHOU B, et al. Performance analysis of UAV relay assisted IoT communication network enhanced with energy harvesting[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 38738-38747.
- [32] HAN C, LIU A, AN K, et al. Distributed UAV deployment in hostile environment: A game-theoretic approach[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 11(1): 126-130.



- [33] U.S. Department of Defense. Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030[EB/OL].(2005-08-17)[2023-05-29].[https://irp.fas.org/program/collect/uav\\_roadmap2005.pdf](https://irp.fas.org/program/collect/uav_roadmap2005.pdf).
- [34] 华为. 基于5G通信技术的无人机立体覆盖网络白皮书[EB/OL]. (2021-09-06)[2023-05-29]. <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/news/3d-coverage-network-for-uavs-based-on-5g-communications-technology-whitepaper.pdf?la=zh>. Huawei. White paper on uav stereoscopic coverage network based on 5G communication technology[EB/OL]. (2021-09-06)[2023-05-29]. <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/news/3d-coverage-network-for-uavs-based-on-5g-communications-technology-whitepaper.pdf?la=zh>.
- [35] LIU B, ZHANG W, CHEN W, et al. Online computation offloading and traffic routing for UAV swarms in edge-cloud computing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(8): 8777-8791.
- [36] CHEN R, CUI L, WANG M, et al. Joint computation offloading, channel access and scheduling optimization in UAV swarms: A game-theoretic learning approach[J]. *IEEE Open Journal of the Computer Society*, 2021, 2: 308-320.
- [37] WU Q, ZHANG M, DONG C, et al. Routing protocol for heterogeneous FANETs with mobility prediction[J]. *China Communications*, 2022, 19(1): 186-201.
- [38] ZHANG L, ZHAO Z, WU Q, et al. Energy-aware dynamic resource allocation in UAV assisted mobile edge computing over social internet of vehicles[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 56700-56715.
- [39] CAO H, YAO H, CHENG H, et al. A solution for data collection of large-scale outdoor internet of things based on UAV and dynamic clustering[C]//*Proceedings of the 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. [S.l.]: IEEE, 2020: 2133-2136.
- [40] ZHAO T, ZHOU J, MA Y, et al. Enabling capacity estimation with ergodic interference power in cellular-based multiple UAV systems[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 178539-178551.
- [41] ZHEN Z, WEN L, WANG B, et al. Improved contract network protocol algorithm based cooperative target allocation of heterogeneous UAV swarm[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 119: 107054.
- [42] DU W, YING W, YANG P, et al. Network-based heterogeneous particle swarm optimization and its application in UAV communication coverage[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2019, 4(3): 312-323.
- [43] WANG Y, CHEN L, ZHOU Y, et al. Resource allocation and trajectory design in UAV-assisted jamming wideband cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 635-647.
- [44] SAY S, INATA H, SHIMAMOTO S. A hybrid collision coordination-based multiple access scheme for super dense aerial sensor networks[C]// *Proceedings of 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-6.
- [45] 李国权, 林金朝, 徐勇军, 等. 无人机辅助的 NOMA 网络用户分组与功率分配算法[J]. *通信学报*, 2020, 41(9): 21-28. LI Guoquan, LIN Jinchao, XU Yongjun, et al. UAV-assisted NOMA network user grouping and power allocation algorithm [J]. *Journal of Communications*, 2020, 41(9): 21-28.
- [46] LI S, MAO Y. Multi-link cooperative polling scheme for UAV data link based on Gilbert-Elliot channel[C]// *Proceedings of 2011 IEEE the 3rd International Conference on Communication Software and Networks*. [S.l.]: IEEE, 2011: 567-572.
- [47] LIU Y, XIONG K, NI Q, et al. UAV-assisted wireless powered cooperative mobile edge computing: Joint offloading, CPU control, and trajectory optimization[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4): 2777-2790.
- [48] LIN X, MEI W, ZHANG R. A new store-then-amplify-and-forward protocol for UAV mobile relaying[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 591-595.
- [49] ZHANG M, EI-HAJJAR M, NG S X. Intelligent caching in UAV-aided networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(1): 739-752.
- [50] GONG Xiangdong, WANG Jia, Zhang Zhun, et al. Optimization of AES algorithm hardware implementation based on FPGA and application of its IP core[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(12): 15.
- [51] SHANG B, MAROJEVIC V, YI Y, et al. Spectrum sharing for UAV communications: Spatial spectrum sensing and open issues[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2020, 15(2): 104-112.
- [52] HELLAOUI H, BEKKOUCHE O, BAGAA M, et al. Aerial control system for spectrum efficiency in UAV-to-cellular communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(10): 108-113.

- [53] HADZI-VELKOV Z, PEJOSKI S, ZLATANOV N, et al. UAV-assisted wireless powered relay networks with cyclical NOMA-TDMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(12): 2088-2092.
- [54] HU J, JIANG M, ZHANG Q, et al. Joint optimization of UAV position, time slot allocation, and computation task partition in multiuser aerial mobile-edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(7): 7231-7235.
- [55] ZHAO N, YU F R, FAN L, et al. Caching unmanned aerial vehicle-enabled small-cell networks: Employing energy-efficient methods that store and retrieve popular content[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(1): 71-79.
- [56] KIM J, BAEK S, CHOI Y, et al. Hydrone: Reconfigurable energy storage for UAV applications[J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2020, 39(11): 3686-3697.
- [57] YANG Z, XU W, SHIKH-BAHAEI M. Energy efficient UAV communication with energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1913-1927.
- [58] 周世阳,程郁凡,徐丰,等. 基于深度强化学习的无人机间通信链路智能决策[J]. *信号处理*, 2022, 38(7): 1424-1433.  
ZHOU Shiyang, CHENG Yufan, XU Feng, et al. Deep reinforcement learning based intelligent decision-making of communication links between UAVs[J]. *Signal Processing*, 2022, 38(7): 1424-1433.
- [59] 王庆,黄勇,常晶. 一种密集无人机网络下行发射功率控制算法研究[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(13): 59-67.  
WANG Qing, HUANG Yong, CHANG Jing. Downlink transmission power control in dense UAV network based on mean field game and deep reinforcement learning[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(13): 59-67.
- [60] LI L, CHENG Q, XUE K, et al. Downlink transmit power control in ultra-dense uav network based on mean field game and deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15594-15605.
- [61] YE H T, KANG X, JOUNG J, et al. Optimization for wireless-powered IoT networks enabled by an energy-limited UAV under practical energy consumption model[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 10(3): 567-571.
- [62] WANG H, WANG J, DING G, et al. Robust spectrum sharing in air-ground integrated networks: Opportunities and challenges [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(3): 148-155.
- [63] SHANG B, LIU L, RAO R M, et al. 3D spectrum sharing for hybrid D2D and UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5375-5389.
- [64] NGUYEN M H T, GARCIA-PALACIOS E, DO-DUY T, et al. Spectrum-sharing UAV-assisted mission-critical communication: Learning-aided real-time optimisation[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 11622-11632.
- [65] WANG B, SUN Y, ZHAO N, et al. Learn to coloring: Fast response to perturbation in UAV-assisted disaster relief networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(3): 3505-3509.
- [66] LIU D, XU Y, WANG J, et al. Self-organizing relay selection in UAV communication networks: A matching game perspective [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(6): 102-110.
- [67] CHEN J, WU Q, XU Y, et al. Distributed demand-aware channel-slot selection for multi-UAV networks: A game-theoretic learning approach[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 14799-14811.
- [68] LIU D, XU Y, WANG J, et al. Opportunistic utilization of dynamic multi-UAV in device-to-device communication networks [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 6(3): 1069-1083.
- [69] ZHOU F, WANG N, LUO G, et al. Edge Caching in multi-UAV-enabled radio access networks: 3D modeling and spectral efficiency optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 2020, 6: 329-341.
- [70] WANG J, LIU M, SUN J, et al. Multiple unmanned-aerial-vehicles deployment and user pairing for nonorthogonal multiple access schemes[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(3): 1883-1895.
- [71] GUO H, ZOU Y, WU T, et al. 3D location optimization for UAV-aided uplink/downlink transmissions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 4477-4482.
- [72] Wu B, Zhang B, Zhao B, et al. A potential game approach to multiple UAVs 3D placement in iot communication networks [C]//*Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. [S.l.]: IEEE, 2020: 660-665.
- [73] GUPTA N, AGARWAL S, MISHRA D. Trajectory design for throughput maximization in UAV-assisted communication system[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2021, 5(3): 1319-1332.
- [74] ZHANG S, ZHANG R. Radio map-based 3D path planning for cellular-connected UAV[J]. *IEEE Transactions on Wireless*

Communications, 2020, 20(3): 1975-1989.

- [75] SHIN H S, LÉBOUCHER C, TSOURDOS A. Resource allocation with cooperative path planning for multiple UAVs[C]// Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control. [S.l.]: IEEE, 2012: 298-303.
- [76] ZHU S, GUI L, CHENG N, et al. Joint design of access point selection and path planning for UAV-assisted cellular networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7(1): 220-233.
- [77] WANG H, WANG J, DING G, et al. Completion time minimization with path planning for fixed-wing UAV communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(7): 3485-3499.
- [78] MONDAL A, MISHRA D, PRASAD G, et al. Joint optimization framework for minimization of device energy consumption in transmission rate constrained UAV-assisted IoT network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(12): 9591-9607.
- [79] BERA A, MISRA S, CHATTERJEE C. PRISM: Priority-aware service availability in multi-UAV networks for IoT applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(11): 8597-8606.
- [80] ZHANG X, DUAN L. Energy-saving deployment algorithms of UAV swarm for sustainable wireless coverage[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 10320-10335.
- [81] YANG D, WU Q, ZENG Y, et al. Energy tradeoff in ground-to-UAV communication via trajectory design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6721-6726.
- [82] ZENG Y, XU J, ZHANG R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2329-2345.
- [83] 张秋平, 孙胜, 刘敏, 等. 面向多边缘设备协作的任务卸载和服务缓存在线联合优化机制[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(6): 1318-1339.
- ZHANG Qiuping, SUN Sheng, LIU Min, et al. Task offloading and service cache online joint optimization mechanism for multi-edge device collaboration[J]. Computer Research and Development, 2021, 58(6): 1318-1339.
- [84] ZHANG G, WU Q, CUI M, et al. Securing UAV communications via joint trajectory and power control[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(2): 1376-1389.
- [85] YU X, WU D, LIU D, et al. The heterogeneous demands satisfaction in IoT network: Air-ground collaborative deployment [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(12): 12713-12724.
- [86] RAMZAN M R, NAEEM M, ALTAF M, et al. Multi-criterion resource management in energy harvested cooperative UAV-enabled IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021(99): 2944-2959.
- [87] RUAN L, WANG J, CHEN J, et al. Energy-efficient multi-UAV coverage deployment in UAV networks: A game-theoretic framework[J]. China Communications, 2018, 15(10): 194-209.
- [88] ZHANG S, ZENG Y, ZHANG R. Cellular-enabled UAV communication: A connectivity-constrained trajectory optimization perspective[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 67(3): 2580-2604.
- [89] WANG B, SUN Y, ZHAO N, et al. Learn to coloring: Fast response to perturbation in UAV-assisted disaster relief networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 3505-3509.
- [90] CHEN W, ZHAO S, ZHANG R, et al. UAV-assisted data collection with nonorthogonal multiple access[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(1): 501-511.
- [91] ZHAN C, ZENG Y. Energy minimization for cellular-connected UAV: From optimization to deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(7): 5541-5555.
- [92] BELGHITI I D, MABROUK A. 5G-dynamic resource sharing mechanism for vehicular networks: Congestion game approach [C]// Proceedings of 2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT), [S. l.]: IEEE, 2018: 1-5.
- [93] 王尔申, 郭靖, 宏晨, 等. 改进目标收益函数的无人机集群空地对抗模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 888-897.
- WANG Ershen, GUO Jing, HONG chen, et al. Aerial-ground countermeasure model of UAV cluster to improve target yield function[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 53(6): 888-897.
- [94] HADDAD M, ELAYOUBI S E, ALTMAN E, et al. A hybrid approach for radio resource management in heterogeneous cognitive networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2011, 29(4): 831-842.
- [95] LHAZMIR S, OUALHAJ O A, KOBANE A, et al. Matching game with no-regret learning for iot energy-efficient



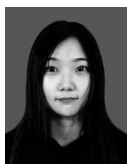
- associations with UAV[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2020, 4(4): 973-981.
- [96] LIU D, XU Y, XU Y, et al. Distributed relay selection for heterogeneous UAV communication networks using a many-to-many matching game without substitutability[C]//*Proceedings of 2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. [S.l.]: IEEE, 2017: 1-6.
- [97] YAO K, WU Q, XU Y, et al. Distributed ABS-slot access in dense heterogeneous networks: A potential game approach with generalized interference model[J]. *IEEE Access*, 2016, 5: 94-104.
- [98] LUAN H, XU Y, LIU D, et al. Energy efficient task cooperation for multi-UAV networks: A coalition formation game approach[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 149372-149384.
- [99] XU Y, REN G, CHEN J, et al. A one-leader multi-follower Bayesian-Stackelberg game for anti-jamming transmission in UAV communication networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 21697-21709.
- [100] LI L, CHENG Q, XUE K, et al. Downlink transmit power control in ultra-dense UAV network based on mean field game and deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15594-15605.
- [101] BRIK B, KSENTINI A, BOUAZIZ M. Federated learning for UAVs-enabled wireless networks: Use cases, challenges, and open problems[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 53841-53849.
- [102] CHU N H, HOANG D T, NGUYEN D N, et al. Joint speed control and energy replenishment optimization for UAV-assisted IoT data collection with deep reinforcement transfer learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 10(7): 5778-5793.
- [103] XU Y, XU Y, REN G, et al. Play it by ear: Context-aware distributed coordinated anti-jamming channel access[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 5279-5293.
- [104] XIAO L, DING Y, HUANG J, et al. UAV anti-jamming video transmissions with QoE guarantee: A reinforcement learning-based approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 5933-5947.
- [105] 姚媛媛, 乌云嘎, 董瑶瑶, 等. 距离约束分簇策略下无人机群空地组网性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 951-959.  
YAO Yuanyuan, WU Yunga, DONG Yaoyao, et al. Performance analysis of unmanned aerial vehicle swarms air-to-ground networking under distance-constrained clustering strategy [J]. *Journal of Electronics and Information*, 2022, 44(3): 951-959.
- [106] 吴允楨, 江汉, 王海超, 等. 无人机使能的空地协同信息分发优化技术[J]. *通信技术*, 2019, 52(5): 1150-1156.  
WU Yunzhen, JIANG Han, WANG Haichao, et al. UAV-enabled air-ground collaborative information-distribution optimization technology [J]. *Communication Technology*, 2019, 52(5): 1150-1156.
- [107] HU S, NI W, WANG X, et al. Joint optimization of trajectory, propulsion, and thrust powers for covert UAV-on-UAV video tracking and surveillance[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 1959-1972.
- [108] 吴启晖, 吴伟. 无人机辅助边缘计算的能效最大化算法设计[J]. *通信学报*, 2020, 41(10): 15-24.  
WU Qihui, WU Wei. Algorithm design on energy efficiency maximization for UAV-assisted edge computing [J]. *Journal of Communications*, 2020, 41(10): 15-24.
- [109] 石岭, 刘春生, 叶青, 等. 基于 PSO 的无人机协同攻击动态资源分配[J]. *飞行力学*, 2014, 32(4): 368-371, 375.  
SHI Ling, LIU Chunsheng, YE Qing, et al. Particle swarm optimization for dynamic resource allocation in coordinated UAV attack[J]. *Flight Mechanics*, 2014, 32(4): 368-371, 375.
- [110] 陶丽佳, 赵宜升, 徐新雅. 无人机协助边缘计算的能效收集 MEC 系统资源分配策略[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(1): 37-44.  
TAO Lijia, ZHAO Yisheng, XU Xinya. Resource allocation strategy for UAV-assisted edge computing energy harvesting MEC system[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2022, 42(1): 37-44.
- [111] TRAN D H, VU T X, CHATZINOTAS S, et al. Coarse trajectory design for energy minimization in UAV-enabled[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 9483-9496.
- [112] LIN M, GOODRICH A., Hierarchical heuristic search using a Gaussian mixture model for UAV coverage planning[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014, 44(12): 2532-2544.
- [113] HUANG Y, WU Q, LU R, et al. Massive MIMO for cellular-connected UAV: Challenges and promising solutions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(2): 84-90.
- [114] LI C, XU Y, XIA J, et al. Protecting secure communication under UAV smart attack with imperfect channel estimation[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 76395-76401.

- [115] XIAO L, LU X, XU D, et al. UAV relay in VANETs against smart jamming with reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4087-4097.
- [116] LUO F, JIANG C, YU S, et al. Stability of cloud-based UAV systems supporting big data acquisition and processing[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2017, 7(3): 866-877.
- [117] LAHMERI M A, KISHK M A, ALOUINI M S. Artificial intelligence for UAV-enabled wireless networks: A survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 1015-1040.
- [118] WANG J, LIU Y, NIU S, et al. Extensive throughput enhancement for 5G-enabled UAV swarm networking[J]. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2021, 2(4): 199-208.

#### 作者简介:



田畅(1963-),男,教授,研究方向:数据链、视频编码、传输优化、深度学习,E-mail:tianchang\_cce@163.com。



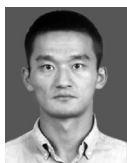
贾倩(1997-),通信作者,女,硕士研究生,研究方向:无线通信、分布式资源优化和博弈论。



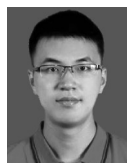
陈润丰(1997-),男,博士研究生,研究方向:无人机通信、频谱协同和博弈论。



王海超(1991-),男,博士,副教授,研究方向:无人机通信、干扰抑制、绿色通信和凸优化。



李国鑫(1989-),男,博士,副教授,研究方向:隐蔽通信、NOMA技术和频谱资源优化。



焦雨涛(1992-),男,博士,讲师,研究方向:联邦学习、区块链、安全通信。

(编辑:陈珺)