



专题：无人机空地无线通信技术

无人机辅助 MEC 系统：架构、关键技术与未来挑战

张天魁¹, 徐瑜¹, 刘元玮², 杨鼎成³, 任元红⁴

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;

2. 英国伦敦玛丽女王大学电子工程与计算机科学学院, 英国 伦敦 E1 4NS;

3. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031;

4. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 随着 5G 加速部署和 6G 研究工作持续推进, 无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 辅助移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 技术在克服复杂地域限制、解决终端设备计算需求和提高系统任务卸载速率等方面具有显著优势, 得到了学术界和工业界的广泛关注。首先阐明了无人机辅助 MEC 系统的概念和技术优势, 提出了一种无人机辅助 MEC 通用架构, 并给出了各个功能模块定义; 接着总结了典型应用场景, 梳理了现有的关键性技术, 获得了无人机 MEC 系统的设计方法; 最后对未来的研究方向和存在的挑战进行了展望和阐述。

关键词: 5G; 6G; 无人机; 移动边缘计算; 任务卸载

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022237

UAV-assisted MEC systems: architecture, key technology, and future challenges

ZHANG Tiankui¹, XU Yu¹, LIU Yuanwei², YANG Dingcheng³, REN Yuanhong⁴

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary University of London, London E1 4NS, U.K.

3. Information Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China

4. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China

Abstract: With the fast deployment of 5G and the on-going development of 6G, unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted mobile edge computing (MEC) technology has significant advantages in the terms of overcoming the geographic restrictions, addressing the computational requirements of terminal devices, and enhancing the task offloading rate of the systems, which attracts wide attentions in academia and industry. The concept and the technique advantages of the UAV-assisted MEC systems were firstly clarified, and a general UAV-assisted MEC architecture

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61971060); 北京市自然科学基金资助项目 (No.4222010); 北京邮电大学博士生创新基金资助项目 (No. CX2022305)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61971060), The Natural Science Foundation of Beijing (No.4222010), BUPT Excellent Ph.D. Students Foundation (No. CX2022305)



was proposed, along with the definition of each function module. Then the classic application scenarios were summarized, and the existing key techniques were sorted out, based on which the design methods for the UAV-assisted MEC were achieved. Finally, the research directions and the potential challenges in the future were prospected and clarified.

Key words: 5G, 6G, UAV, MEC, task offloading

0 引言

随着第五代移动通信技术(5G)快速商业部署和第六代移动通信技术(6G)研究序幕开启,未来网络将变为以“数字孪生”和“智慧泛在”为特点的智慧型网络,万物智联、通感一体、人工智能(artificial intelligence, AI)赋能等愿景将逐步成为现实^[12]。目前,一些新兴移动网络应用技术的不断涌现,如虚拟现实(virtual reality, VR)、自动驾驶、视频直播等,正在推动移动应用技术的变革^[3]。同时,这些计算密集型和时延敏感型应用加剧了移动终端设备在能量及算力等方面的问题,使设备的计算需求不能得到很好的满足。为应对上述挑战,移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)技术应运而生。作为一种新的网络结构,MEC能够将设备的计算任务由传统的云计算采用的中心化处理方式下沉到网络边缘执行,有效缓解核心网计算压力并缩短计算数据的传输距离,从而满足设备对高可靠、低时延计算的需求,极大提高网络的计算能力^[4-7]。

另一方面,为了解决野外、湖泊、灾后等复杂地域环境中边缘设备对计算资源的需求,无人机辅助边缘计算系统成为有效的解决方案^[8],将无人机与边缘计算技术结合,能够突破传统边缘计算场景在灵活部署、地域位置约束、覆盖能力等方面的局限,极大扩展了边缘计算网络适用范围,提高了网络计算能力和用户服务质量。相对于固定基础设施的边缘计算方案,无人机辅助 MEC 具有高移动性、快速响应、灵活可控、使用成本低等优势^[9],成为 5G 和未来 6G 网络中关键技术之一。

为了更好地理解和研究无人机 MEC 技术,本文对无人机 MEC 进行了全面系统的概述:首先,提出了无人机 MEC 系统的一般性架构,介绍了每

一层结构的主要功能;接着,对无人机 MEC 的典型应用场景进行了分析,梳理得到现阶段无人机 MEC 常见网络拓扑结构和关键技术,从中可以获得一般性的设计方法;最后,讨论了未来研究存在的开放性问题 and 实际应用面临的挑战。与现有的无人机 MEC 相关综述文献[8,10-11]相比,本文的创新性主要体现在以下方面。

- 提出了完整的 MEC 系统架构,并对架构中的关键技术和功能进行了介绍,而文献[8,10]只对无人机辅助 MEC 系统的概念和关键使能技术进行了介绍,忽略了其体系架构。
- 梳理了无人机辅助 MEC 关键技术,对现阶段应用的先进技术及各技术之间的脉络关系进行了呈现。现有文献缺乏对无人机辅助 MEC 关键技术的系统性总结,缺少对整个技术轮廓和系统设计的详细刻画。
- 完整阐述了无人机辅助 MEC 在未来无线网络中的潜在技术和挑战,而文献[8,10-11]在这两方面均没有开展全面的总结工作,如未提及多无人机协同、无人机算力网络等内容。

另外,文献[10-11]只重点讨论了无人机 MEC 与当前 5G 网络融合带来的机遇和挑战,没有关注在未来 6G 网络场景中的潜在技术发展和面临的新难题。

1 系统架构与使能技术

1.1 系统架构

无人机辅助 MEC 基本网络架构如图 1 所示,主要由地面数据层、无人机边缘接入层和以飞艇及近地卫星等组成的高空接入层 3 个部分组成。

1.1.1 地面数据层

地面数据层主要收集各种网络应用场景产生

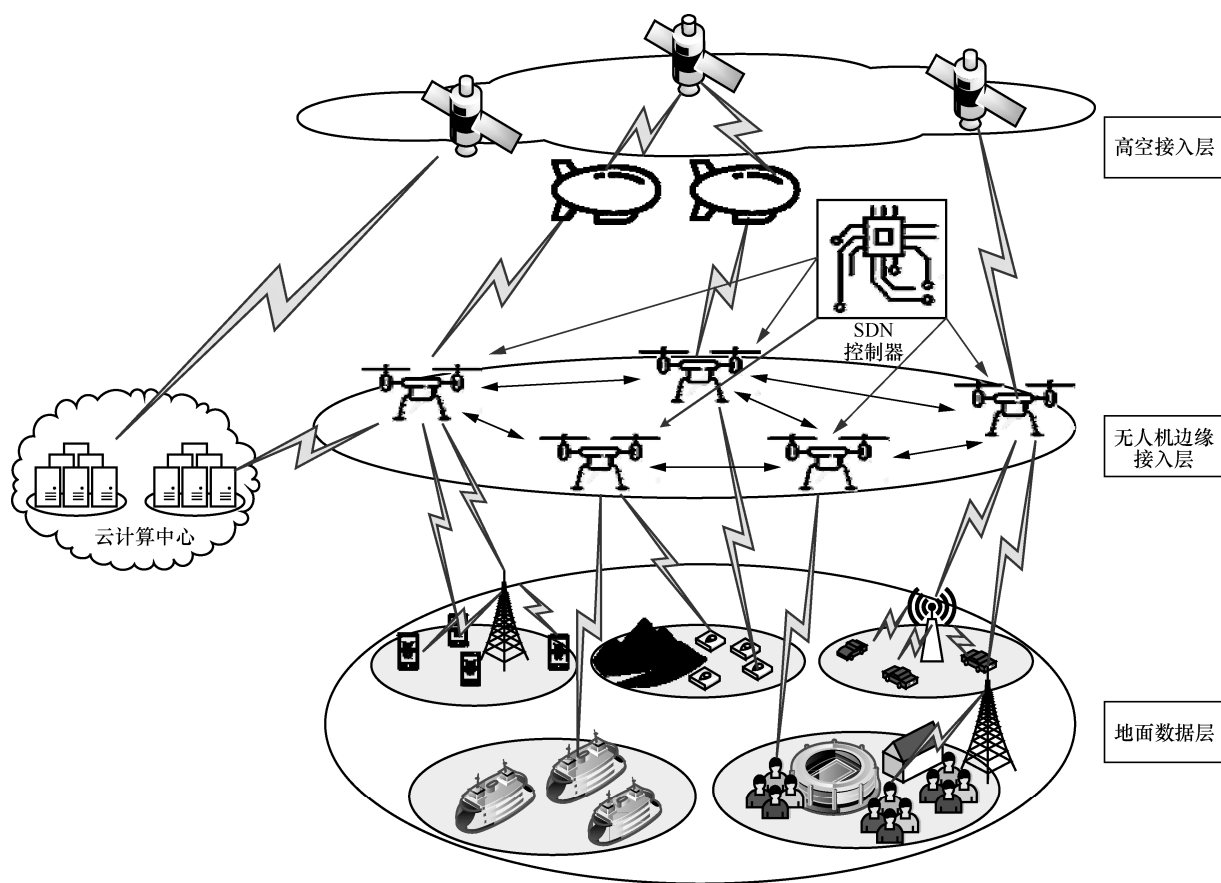


图1 无人机辅助 MEC 基本网络架构

的文本、图片、视频等计算任务，主要网络场景包括无线传感器网络、蜂窝网络、车联网等，这些场景中终端设备会持续产生监测、应用服务等数据，设备自身无法有效处理，需要将计算任务卸载到无人机边缘接入层，由无人机帮助计算，再将结果回传，减少设备计算压力，提高用户体验质量和服务质量。根据无人机和地面 MEC 服务器的协同关系，可以将数据接入方式分为两种类型：第一类为无地面 MEC 服务器协助的场景，此时终端设备通过无线链路直接接入无人机；第二类为空地协同的场景，即终端设备既可以接入无人机，也可以通过无线接入点（access point, AP）或基站接入，将计算任务就近卸载至部署有 MEC 服务器的 AP 和基站侧进行处理，或直接上传至云端进行计算。

1.1.2 无人机边缘接入层

无人机边缘接入层负责接入来自数据层的卸

载任务，并对任务进行处理。在该层，搭载有 MEC 服务器的无人机作为 MEC 计算单元，可以直接接收来自数据层终端设备的计算任务。无人机之间也可以通过无线链路连接，组成多无人机协同系统或无人机集群，计算任务可以从地面终端设备通过多跳的形式进行传输，充分利用网络中无人机的计算资源，提高计算效率。

1.1.3 高空接入层

高空接入层主要是由飞艇、热气球以及近地轨道卫星组成的高空平台，为无人机边缘接入层提供中继通信，即无人机接收计算任务后，可进一步将任务转发至高空平台进行计算。考虑传输时延问题，高空接入层对计算时延不太敏感的业务类型尤为适用，可以进一步提升无人机边缘接入层的计算能力，能够满足终端设备更加严苛的计算需求。高空平台一方面能够



继续提供算力支持，另一方面也能够直接与云计算中心建立通信连接，调度远端更强大的计算资源。由此可知，图 1 构建了完整的端—云—云一体化移动边缘计算网络体系，具有普适的意义。

1.2 使能技术

为了支持图 1 提出的无人机辅助 MEC 基本网络架构，实现对不同无人机之间的管理，还需要采用一些使能技术，主要包括软件定义网络（software defined network, SDN）、人工智能技术和边缘容器管理架构。

（1）软件定义网络

SDN 可以用于网络的控制。具体来说，让某一架无人机当作 SDN-MEC 中心节点，除进行常规计算外，还作为 SDN 控制器，实现对无人机飞行状态控制和网络资源管理。SDN 是一种通过软件控制器进行集中控制的网络架构，能够实现将底层物理设备的控制决策和数据转发两个功能分离，可以为大规模复杂网络的控制提供解决方案^[12-13]。无人机辅助 MEC 系统 SDN 控制器逻辑架构如图 2 所示，自下而上分别是数据层、控制层和应用层。数据层负责信息转发和数据处理，通过基于 OpenFlow 标准协议的南向接口与控制层进行交互；控制层运行各种 SDN 控制软件，分析接收的各类数据流，并将运行结果作为控制策略通过北向接口发至上层，实现网络服务和管理功能，或通过南向接口下发至数据层，实现物理资源管控；应用层主要运行各种应用程序，如无人机轨迹优化、通信/计算资源调度算法等，并通过北向接口将网络行为告知控制层，进而达到对网络全局管控的目的。

（2）人工智能技术

无人机辅助 MEC 网络丰富业务应用和极致性能需求对网络架构提出了较高要求。AI 赋能的无人机辅助 MEC 网络具有支持 AI 原生的能力，为 AI 算法的运行提供基本环境和基础插件。

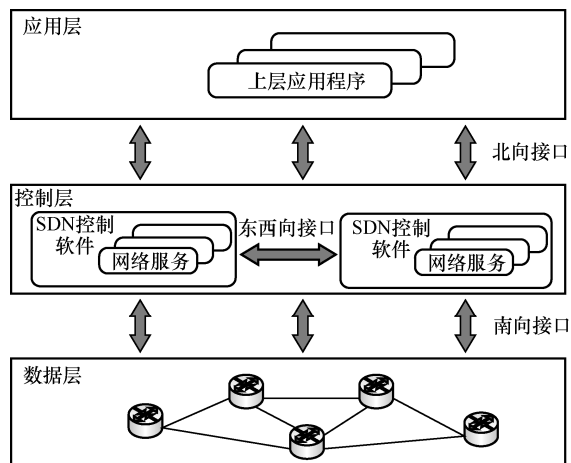


图 2 无人机辅助 MEC 系统 SDN 控制器逻辑架构

通过部署群智协同、云边端一体化和分布式学习等算法，可以提高网络资源的管理能力（如智能调度、跨域管理等）、提升资源利用效率、增强任务匹配性能，并增强对差异化实时业务的兼容能力。在无人机辅助 MEC 网络中，利用 AI 技术不仅为网络提供了一种优化工具，也提供了一种 AI 原生新型网络结构和智能空口技术的有效实现方案，激发网络通信和计算性能上的更大潜力。

（3）边缘容器管理架构

无人机辅助 MEC 系统中应用程序分散在云、边、端各侧，应用程序需要得到有效管理。另外，无人机辅助 MEC 系统还面临单集群节点跨地域、计算资源分散、云边端网络不可靠等问题，应用很难部署到边缘计算节点上进行可靠运行。可以采用基于 Kubernetes(K8S)的边缘容器管理架构，如图 3 所示。通过该架构，能够把分布在云、边、端各处的计算资源放在一个 K8S 集群中进行管理，打造专属边缘平台即服务（platform as a service, PaaS）平台。基于 K8S 的边缘容器管理架构为分布式架构，能够为分布式 MEC 应用系统提供基本框架，并提供管理所有运行应用程序的容器，持续监视应用集群并对其组成进行调整，达到对整个网络资源的弹性纳管和控制的的目的，实现效率上的极致。

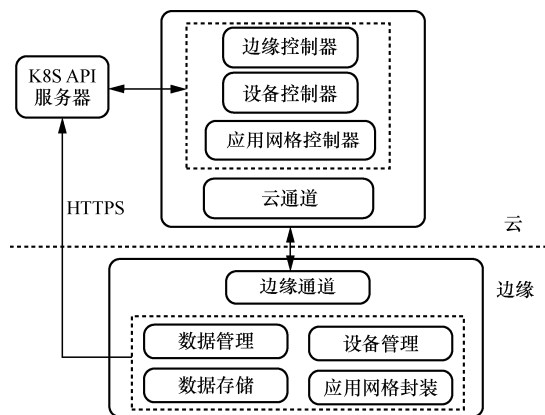


图3 基于K8S的边缘容器管理架构

2 典型应用分类和关键技术

本节主要介绍无人机辅助 MEC 系统常见网络结构以及典型应用分类,并介绍在实际网络设计中涉及的关键技术。

2.1 网络结构

无人机辅助 MEC 网络结构如图4所示,主要

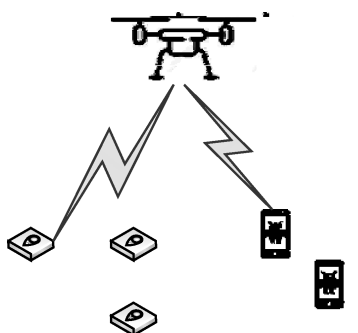
分为4种典型网络拓扑结构。

(1) 点对点计算

无人机作为 MEC 服务器直接为终端设备提供计算服务,此结构常见于无地面基础设施的野外环境、应急救援等场景^[14-16]。终端设备通过任务卸载将数据传输到无人机,无人机通过本地计算再将结果回传至终端,构成两点之间的闭环。这种结构具有拓扑简单、部署快、容易实现等特点,在面对临时快速响应、环境监测等场景时具有良好的应用效果,但对无人机的计算能力要求较高,并不能很好地应对地面超大规模用户、计算需求密集等场景。

(2) 空地协同

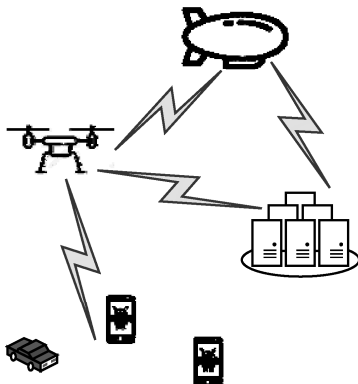
在空地协同网络结构中,终端设备可以将计算任务卸载到无人机和地面 MEC 服务器进行数据处理,即网络中的算力支持同时来自空中无人机平台和地面部署在接入点或基站的 MEC



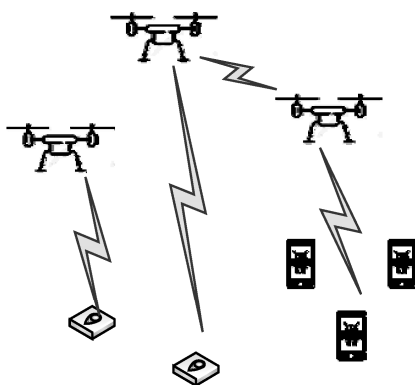
(a) 点对点计算



(b) 空地协同



(c) 空地中继协同



(d) 多无人机协同

图4 无人机辅助 MEC 网络结构



服务器^[17-19]。该场景中，空地协同主要体现在终端设备对空地计算资源的选择和调度上，以及对计算任务的卸载策略上。相对于点对点计算而言，空地协同网络结构能够提供更强大的计算保障，网络拓扑更加灵活，在蜂窝网、热点覆盖、D2D 通信（device-to-device communication）等场景中较为常见，但终端与地面 MEC 服务器之间的信号传输衰减严重，容易受地面传输环境的影响，因此该类结构网络覆盖能力依然有限。

（3）空地中继协同

为了进一步提升上述空地协同网络结构的覆盖能力，学术界提出了一种空地中继协同网络结构，如图 4（c）所示。在空地中继协同网络结构中，无人机同时具备计算和中继转发的功能^[20-22]。无人机接收来自地面终端的计算任务时，无人机可以通过执行本地计算，完成计算任务；也可以通过中继传输协议，将接收的计算任务转发至高空平台或云计算中心协助计算，从而极大地释放自身的计算压力，提升网络计算能力。无人机由于中继的存在，可以调度到远端 MEC 计算资源，有效扩展网络的覆盖范围和计算能力。空地中继协同属于云一边一端深度融合的一种网络结构，能够充分有效地调度全域计算资源，实现全域资源的有效管理，适合计算需求大、覆盖范围广和无人机计算能力受限等场景。然而，此类结构拓扑结构较为复杂，调度策略设计难度较大，而且信号多跳会带来路由管理上的难题和设计上的复杂度，造成额外计算时延开销的问题。

（4）多无人机协同

多无人机协同是一种比较常见的无人机辅助 MEC 网络结构，主要考虑采用多无人机或无人机群的方式为地面终端设备提供计算服务^[23-25]。多无人机协同能够适应更加复杂的网络环境，对不同网络结构、不同任务数据类型具有很好的兼容

能力，如超密集网络、异构蜂窝网络等。通过对多无人机的协同控制，包括无人机之间的计算资源协同管理、无人机轨迹规划等，能够满足不同任务类型对计算能力的要求，从而提供强大的计算支持，并能够解决广域复杂环境的覆盖问题。另外，多无人机间也可以通过链路连接，形成多无人机间资源共享，大幅提升对网络离散资源联动设计的灵活性，消除终端设备对某一部分无人机的依赖性，网络的鲁棒性能够得到充分的保障。值得一提的是，多无人机协同中的无人机联合设计问题、三维轨迹规划问题等在实际研究和应用中依然极具挑战。

2.2 典型应用分类

得益于无线通信领域不断发展，以及在无人机机动性和控制方面取得飞速进步，无人机辅助 MEC 具有广阔的应用前景。目前，常见应用场景包括以下几点。

（1）定制化边缘云服务

根据用户需求，可以利用无人机辅助 MEC 提供定制化边缘云服务，如赛事直播、超清点播、云游戏、云渲染等。通过无人机灵活部署，能够增强用户接入，降低传输时延，满足用户联机互动的需求。另外，还可以通过无人机辅助 MEC 为用户提供云安全解决方案，防止流量攻击和病毒传播，保障用户的计算安全。

（2）热点覆盖

在通信热点区域，如重大赛事、节日活动、音乐会现场等，大规模用户带来密集的计算需求，造成地面固定基础设施超负荷运行，用户服务需求得不到保证。通过部署无人机 MEC，可以对热点区域数据进行分流，扩大网络计算容量，有效缓解区域内计算数据的拥塞，提升用户的体验质量和服务质量。

（3）应急救援

在突发自然灾害时，往往会造成地面通信基础设施损毁的情况。为了及时恢复通信，第一时

间了解受灾现场,可以部署无人机 MEC 节点,通过拍摄图像或视频,分析提取关键信息,如人员搜救、目标物体受灾监测等,辅助指挥人员准确采取有效应对措施。

(4) 数据采集

在湖泊、山地、沙漠等野外环境中,由于缺少通信设施,并受地理地形的影响,环境监测和对广泛部署的传感节点进行数据采集都是难以开展的工作。通过派遣无人机 MEC 节点可以有效克服这些难题,规避人力实施带来的各种危害和风险,而且能够避免建设大量的固定基础设施,极大地降低监测和数据采集成本。

(5) 军事应用

在军事场景中,面临的环境一般都缺少地面通信基础设施,前线与指挥中心的通信连接很难持续得到稳定保障。因此,利用无人机 MEC 节点,不仅可以帮助建立前线与后方之间的无线连接,还能够通过无人机实时侦察并分析回传敌方的状态,为指挥中心作战命令下达提供有效情报。另外,与人工智能、飞控导航等先进技术结合后,

无人机 MEC 还能够参与到人质救援、目标打击、战场毁伤评估等作战活动,加速了无人化、智能化战争的发展。

2.3 关键技术

在当前研究中,无人机辅助 MEC 系统关键技术总结如图 5 所示。在进行设计时,主要从计算任务和无人机设计两个方面考虑,其中计算任务又可分为本地计算和任务卸载两种方式。本地计算是指计算任务在设备自身进行本地处理,根据 CPU 计算频率的分配情况,分为固定计算频率方式和动态计算频率方式;任务卸载是指设备将部分任务传输到其他设备进行辅助计算,这个过程主要包括卸载模式、卸载技术和资源分配 3 个关键方面。首先,卸载模式包括部分卸载和二元卸载(也称为二进制卸载)。部分卸载允许设备将计算任务分成若干子任务,这些子任务一般为相互独立的关系,可以通过无线传输的方式迁移到其他设备进行计算;而二元卸载是将任务作为一个整体,只能在设备本地完成计算或作为整体卸载至其他设备。相比于部分卸载,二元卸载硬件实现

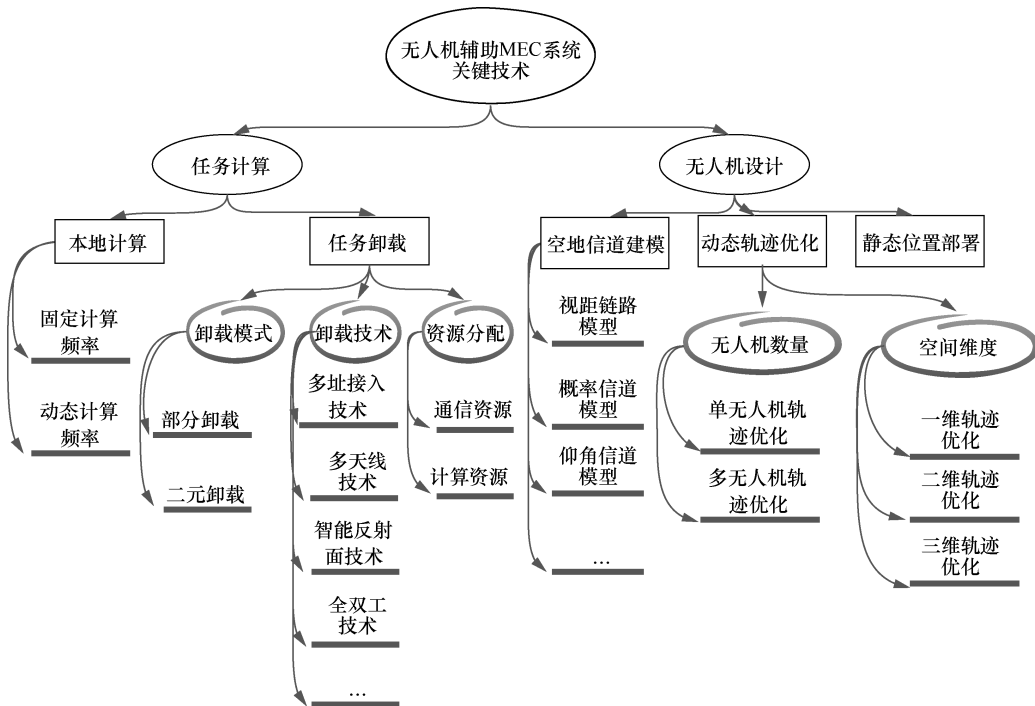


图5 无人机辅助 MEC 系统关键技术总结



复杂度更低，但灵活性不强。另外，卸载技术主要指一些先进的无线传输技术，包括多址接入技术（如 NOMA、正交多址（orthogonal multiple access, OMA））、多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）技术、智能反射面（intelligent reflecting surface, IRS）技术、全双工（full duplex）技术等，通过应用这些技术，能够提高任务卸载速率，使系统获得更大的增益。最后，资源分配主要包括两个方面的内容，分别是通信资源分配和计算资源分配。通信资源主要指系统中的时隙、编码、通信带宽、发射功率等系统资源，计算资源则指设备自身和 MEC 服务器提供的 CPU 计算模块。在实际研究场景中，对系统资源进行分配方案优化对于提高系统运行效率至关重要，是无人机辅助 MEC 系统设计的重点内容。

无人机设计涵盖两个大的方面，一是空地信道建模问题，另一个是无人机控制问题。空地信道建模主要分为 3 种信道模型，分别是视距链路模型（line-of-sight channel model）、概率信道模型（probabilistic channel model）和仰角信道模型（angle dependent channel model）。视距链路模型适用于开阔、没有障碍物遮挡的信道环境，是一种比较理想化的模型；概率信道模型和仰角信道模型都考虑了非视距链路的影响，更适合实际应用场景，如乡村城市等有障碍物影响的传输环境。无人机控制问题可以根据无人机的运动模式分成动态轨迹规划和静态位置部署，其中动态轨迹规划是最为常见的一类。相比于静态位置部署，动

态轨迹规划能够带来更明显的性能增益，无人机的移动性能得到更充分的利用。动态位置规划中，根据无人机的数量可以分为单无人机轨迹规划和多无人机轨迹规划；根据空间维度可以分为一维轨迹优化、二维轨迹优化和三维轨迹优化。目前，无人机的轨迹优化问题正从二维轨迹优化向三维轨迹优化方向发展，同时也出现了诸多仍未彻底解决的问题，如三维无人机能耗建模问题、三维多无人机协同控制问题等。

上述关键技术为无人机辅助 MEC 的研究工作奠定了技术基础和基本设计思路，并催生了诸多应用类型。根据当前文献中研究目标的不同，无人机辅助 MEC 系统研究分类见表 1，大致可分为 5 类。

（1）能耗最小

能耗作为无人机辅助 MEC 系统关键性能指标之一，得到了广泛的研究。无人机辅助 MEC 系统能耗主要来自 3 个方面，即无人机飞行能耗、计算能耗和通信能耗。在具体设计中，需要分别就这 3 部分能耗进行考虑，以达到系统能耗最小的目的。文献[16]的目标是最大化终端设备的最小能耗，提出一种联合优化算法解决了非凸问题；文献[19]采用加权均方误差法和 S-procedure 方法，实现了无人机和终端设备能耗最小化的目的；文献[20]则通过联合优化系统通信和计算资源、无人机轨迹，考虑了无人机作为移动中继 MEC 场景的系统总能耗最小化问题。

（2）计算时延最低

计算时延也是无人机辅助 MEC 系统关键性

表 1 无人机辅助 MEC 系统研究分类

研究目标	参考文献	说明
能耗最小	[16,19-20,24]	主要考虑系统中通信、计算能耗和无人机的飞行能耗
计算时延最低	[14-15,21-23,25]	主要减小系统任务卸载过程的传输时延和任务计算时延
计算容量最高	[26-28]	实现无人机或终端设备最大计算量
计算能效最大	[17,29-31]	权衡计算量与能量开销之间的折中关系
计算安全性最强	[32-35]	考虑任务卸载过程中的数据安全性

能指标之一, 计算时延主要包括 3 个方面: 任务卸载时延、任务计算时延和结果回传时延。减少无人机 MEC 系统的时延开销, 对保障系统的有效性至关重要。文献[15]考虑了最小化最大终端设备计算时延的问题; 文献[15]则考虑了所有终端计算时延和最小化, 并同时考虑了无人机的能耗问题; 文献[21]通过设计三维无人机位置部署, 减少系统的计算时延开销; 文献[23]主要设计了多无人机协同的场景, 通过开展多无人机联合轨迹设计和系统资源管理, 实现了终端设备任务计算时延最小的目标。

(3) 计算容量最高

计算容量的定义为终端设备或无人机在给定的网络资源能够实现的最大计算量, 是用于衡量无人机 MEC 系统计算能力强弱的关键性能指标。一般而言, 无人机辅助 MEC 系统的资源都是受限的, 而如何利用有限的资源满足尽可能多的计算需求具有显著意义。文献[26]提出了在无人机无线能量传输 MEC 网络中的计算容量问题, 同时考虑了部分卸载 (partial offloading) 和二元卸载 (binary offloading) 两种卸载模式; 文献[27]和文献[28]分别提出了在无人机中继协作传输和非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 网络场景的无人机计算容量最大化问题。

(4) 计算能效最大

计算能效是指在单位计算能耗上能完成的最大计算量, 一般也称为计算效率 (computation efficiency), 可以用来权衡计算量与能量开销之间的关系。对于无人机辅助 MEC 系统而言, 计算量和能量都是非常关键的性能指标, 因此在实际设计中, 通常需要考虑两者间的最佳折中关系。文献[17]提出在空地协同场景中, 以系统能效作为目标, 通过对系统资源管理和无人机轨迹设计, 寻求计算容量与计算能耗之间的最佳权衡关系; 文献[29]通过优化无人机的轨迹和任务分配实现了系统能效最大化; 文献[30]和文献[31]都考虑了多

无人机计算能效的问题, 且文献[31]采用了 NOMA 作为多址方式。

(5) 计算安全性最强

由于无线传输环境的开放性, 信息传输很容易受到非法用户的监听, 造成数据泄露风险。无人机辅助 MEC 系统的计算安全主要体现在任务数据卸载的过程。如何有效保障终端设备数据的私密性, 对于衡量无人机 MEC 系统的安全性来说至关重要, 受到比较广泛的关注。文献[32]考虑采用双无人机的网络结构抵御地面窃听用户, 其中一架无人机作为 MEC 服务器辅助地面设备计算, 另一架无人机则作为干扰 (Jamming) 无人机, 用于发射干扰噪声, 抑制非法用户的恶意窃听; 文献[33]考虑了来自空中的非法窃听用户, 利用地面干扰机发射抑制噪声减少窃听, 增大合法用户的安全计算容量; 为了减少计算数据泄露风险, 文献[34]提出通过无人机和地面非卸载用户联合发送噪声的方式抑制窃听, 并考虑了不确切的信道状态信息的情况; 文献[35]提出了在能量收集的网络场景中, 无人机利用全双工通信的方式, 同时接收用户卸载的任务和发送干扰噪声攻击非法窃听器, 从而提高系统的安全计算效率。

3 未来研究方向和应用挑战

3.1 未来研究方向

作为 5G 关键性技术, 无人机辅助 MEC 技术将继续赋能未来 6G 网络发展。可以预见的是, 新兴技术的不断涌现势必会推动无人机 MEC 技术的不断发展与进步。结合当前无线通信领域的研究趋势和潜在技术, 未来无人机辅助 MEC 研究主要包括以下几个方向。

(1) 三维多无人机协同 MEC

如前文所述, 三维无人机设计和多无人机协同均具有显著优势, 也是当前研究的热点。将三维无人机与多无人机进行结合, 可以实现更为复杂的功能。三维无人机轨迹设计能够通



过水平和纵向操纵,实现全空域移动控制,完全释放无人机移动性促进系统性能提升的潜力。另外,多无人机协同能够同时实现空一空、空一地、空一天一地等多域资源联合调度,极大增强网络资源配置的灵活性。因此,三维无人机协同 MEC 将具有巨大应用潜力,是未来通信发展的一种必然范式。

(2) 基于智能无线传输的无人机 MEC

基于智能无线传输的无人机 MEC 是指通过采用 IRS 重构无线传输环境,以达到增强无线传输性能的目的。IRS 是一种无源的平面反射阵列,其表面整齐排列着许多可重构元素,每一个元素都可以对入射信号进行单独的相移和幅度控制,从而改变入射信号的传输特性^[27]。目前,IRS 作为 6G 关键技术,已经被写入 6G 白皮书。在基于智能无线传输的无人机辅助 MEC 系统中,根据场景需求,可以采取地面部署 IRS 的方式,也可以将 IRS 部署在无人机上,两种结构各有其优势。在实际设计中,基于智能无线传输的无人机辅助 MEC 系统主要需要考虑通过结合多天线技术和 IRS 无源波束成形技术,以及对无人机轨迹进行规划,增强信号传输质量,提高任务卸载效率。该研究方向开辟了新的设计维度,是对随机信道被动适应到主动控制的跨越,具有广阔的研究前景。

(3) 通感一体无人机 MEC

通信感知一体化(integrated sensing and communication, ISAC)是未来无线网络发展的一项重要使能技术,能够同时实现通信任务和感知任务^[36]。未来无人机辅助 MEC 系统中,无人机的功能不单单限于通信和计算,还需要具备高精度且稳健的感知能力,以更好地满足工业互联网、环境监测、车联网、智能家居等不同应用场景的需求。一方面,通过复用数据卸载的射频信号,可以实现对目标物体的感知,达到状态观测的目的,扩展了网络功能。尤其通过结合先进的太赫兹(terahertz, THz)超大

带宽通信技术,可以极大提高通信和感知能力,获得高精度的定位和高分辨率 3D 成像信息;另一方面,通过感知,能够获取对无线传输环境的反馈信息,进而辅助增强信号传输质量。因此,通感一体无人机 MEC 的研究将突破传统设计的局限,具有显著的现实意义。目前,通感一体无人机 MEC 相关议题仍处于研究空白阶段,其基本设计思路、典型研究架构、关键性能指标等仍有待进一步探索。

(4) 智能算法融合的无人机 MEC

当前,AI 技术已经逐渐渗透到各研究领域,对基于传统方法开展的研究工作产生了深远的影响。在无人机 MEC 研究场景中,AI 智能算法正在逐步替代传统算法发挥作用。尽管有些场景还未能达到一些经典算法实现的效果,但随着未来算法的改进、机器算力的提升,AI 智能算法不排除取得与经典算法一样的效果,甚至超越经典算法。值得一提的是,AI 智能算法已经在一些问题中发挥不可替代的作用,如高复杂问题求解、随机问题优化、网络预测等,传统方法往往不能有效解决上述问题,或需要依靠复杂的分析、近似和简化等过程获取数值解,性能很难得到保障。而在无人机辅助 MEC 中,经常需要进行计算任务预测,还面临着计算任务和信道参数随机、问题建模结构复杂等现实难题,通过融合智能算法,能够很好地贴合无人机 MEC 场景,并有望开辟全新的设计思路和崭新的研究途径。同时,无人机轨迹规划具有时间上的长期性,且满足马尔可夫决策过程,具有应用智能算法的天然优势。

(5) 无人机算力网络

现有无人机辅助 MEC 系统受限于单个或少数无人机计算能力,没有形成无人机算力网络。与单纯多无人机协同不同的是,无人机算力网络可以通过多无人机间、各云之间的算力资源协同调度与分配,将算力资源信息与网络资源信息匹配,实现多云、多类资源的联合优化。在无人机

算力网络中, 可以将网络中所有的算力资源进行池化, 算力池能够根据当前的状态及时向网络控制面报告可利用的空闲算力信息, 用户会根据得到的算力信息以最佳的路由获取这些空闲算力资源, 极大提高网络的计算性能。目前, 对无人机算力网络的研究处于起步阶段, 对于算力度量、资源视图、信息分发和资源调度等方面的关键性议题仍有待探索。

3.2 未来应用挑战

尽管无人机辅助 MEC 可以克服传统地面 MCE 网络覆盖范围小、灵活性差和成本高等一些弊端, 但是也面临着诸多限制和挑战, 无人机辅助 MEC 系统面临的部分挑战如图 6 所示。

(1) 无人机能力受限

无人机作为空中平台, 一直面临着能量受限的问题, 导致无人机辅助 MEC 系统的服务周期较

短, 给实际任务的开展带来不便。电池续航问题也间接导致网络处理能力的局限性, 对网络进行节能优化、提高续航时间对解决此问题尤为重要。另外, 无人机有效载荷限制也导致无人机只能搭载计算能力极为有限的 MEC 服务器, 因此在计算需求大的网络场景容易出现饱和的状态, 影响系统的计算效果。

(2) 多无人机协同控制

相较于单无人机, 多无人机协同 MEC 场景具有覆盖范围广、计算能力强、网络鲁棒性高等优势, 是未来无人机辅助 MEC 系统发展的重要范式。然而, 多无人机协同控制问题依然需要被解决。在多无人机场景, 需要考虑的关键因素主要包括卸载模式选取、用户接入方式、无人机与地面设备间单跳任务卸载、无人机与无人机之间的多跳任务传输, 以及多无人机联合轨迹设计等,

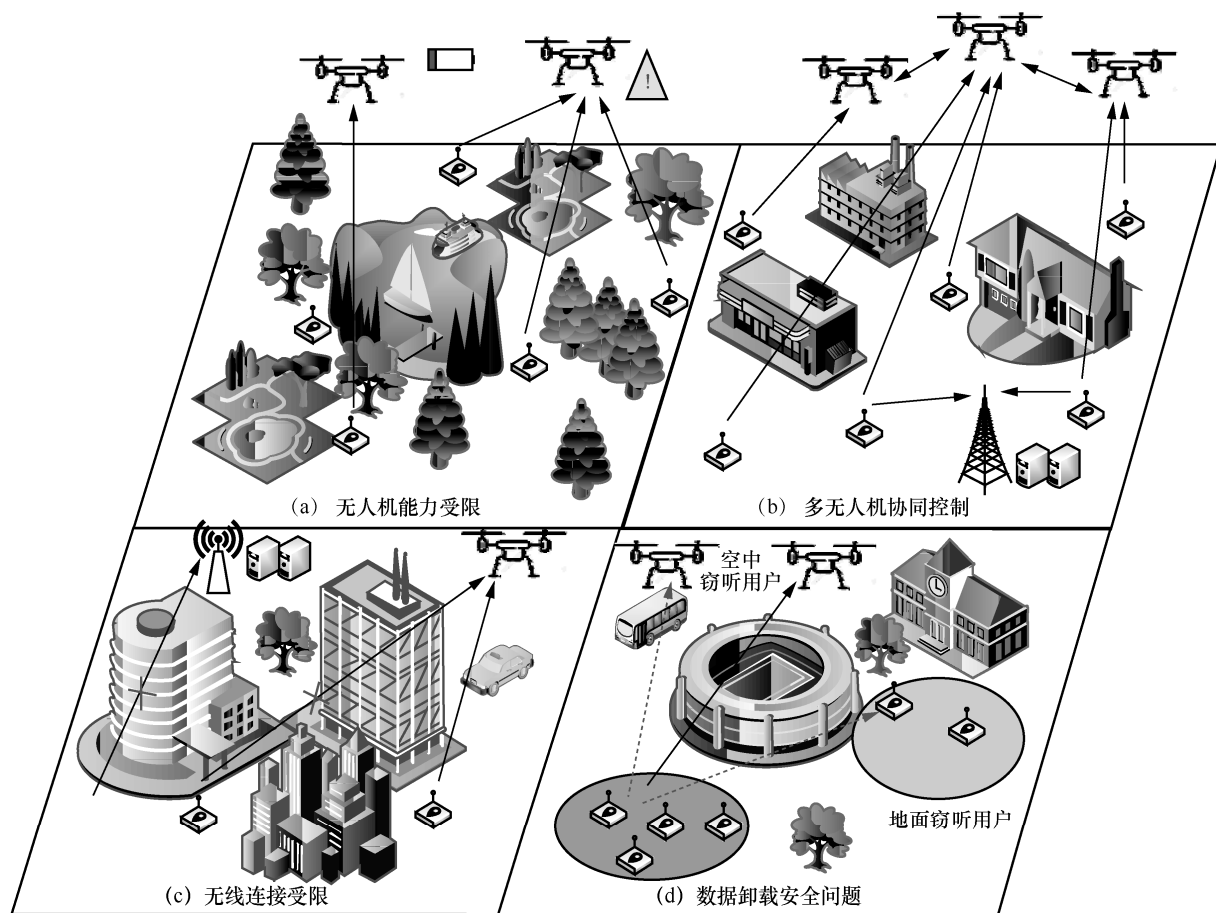


图 6 无人机辅助 MEC 系统面临的部分挑战



这些因素无疑加剧了多无人机协同设计的建模难度和算法实现的复杂度，也是未来多无人机协同 MEC 网络研究需要重点解决的问题。

（3）无线连接受限

无人机由于高空优势，能够获得相较于地面通信更好的链路质量，但在障碍物密集的复杂环境中，如城市、山区、丛林等，无线连接的稳定性和有效性很难得到保障。地面终端的任务卸载很容易受到周围障碍物的遮挡，造成信号传输衰减严重，甚至无法传输到无人机边缘节点。尽管无人机可以通过移动性优势，增强与目标终端之间的链路质量，但在多用户场景中，此时其他设备的服务效果却很难得到保证，从而影响网络整体性能。因此，如何改善无线传输环境，提高无线链路传输质量，也是目前无人机辅助 MEC 系统面临的一大挑战。

（4）数据卸载安全问题

无人机高空优势有助于帮助改善无线传输质量，但同时也增加了数据泄露的风险。而且，未来窃听用户不仅来自地面，也可能来自空中，空地双重窃听无疑极大地增加了数据安全防御方面的挑战。一般而言，窃听方式分为主动窃听和被动窃听两种，主动窃听方式下窃听用户会对外发出电磁信号，容易被侦查识别，进而可以开展精准打击，因此这种方式在实际中相对容易应对。在被动窃听方式下，窃听用户通常保持电磁静默状态，因此无法对其展开精确打击，只能通过技术手段侦查窃听用户的大致范围，通过对网络卸载策略和无人机轨迹设计等，尽可能降低数据泄露的风险，这种情况更具有现实意义，但同时也是目前研究工作中待解决的难题。

（5）无人机无线信道测量与建模

为了能够对无人机通信系统开展可靠研究，并进行实际优化设计和性能评估，建立准确的无人机无线信道模型至关重要。与传统固定路径之间的通信不同，无人机通信系统表现了更为复杂

的特性。首先，无人机的快速移动性导致信号传输不稳定，多普勒频移带来的影响不可忽视；其次，无人机对地通信过程中信号历经的路径复杂多变，容易被各类障碍物的频繁遮挡，造成接收信号包络起伏变化剧烈。因此，开展无人机无线信道测量与建模工作具有现实意义。目前，针对无人机的信道建模方式主要分为确定性模型和统计模型两种。尽管如此，依靠现有模型获得的无人机传输特性与实际测量结果值之间仍有差距，如现有信道模型无法有效反映无人机非平稳信道特性和地面反射分量等。另外，在无人机辅助 MEC 网络中，高计算时延的需求对无人机信道的测量带来了更严峻的挑战。而且，为了便于设计，无人机通信场景对信道模型的低复杂性也有一定的要求。未来的研究工作需要借助各类手段着力解决上述挑战，如通过引入时变参数表现无人机信道的非平稳特性，或通过借助随机几何的方法推导更加普适、低复杂度的参考模型。总之，如何开展无人机无线信道测量、提出无人机无线信道统一标准化模型，是无人机未来应用需要重点解决的问题之一。

（6）标准化及商业模式

无人机辅助 MEC 系统对于运营商、设备商和芯片厂商而言是一种创新的网络架构和业务模式，相关的标准化工作正受到各大标准化组织的关注。目前，关于 MEC 的标准化工作已基本开展完毕，包括平台架构、技术需求、程序接口等都被欧洲电信标准组织（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）明确，而在此之上的无人机辅助 MEC 的标准化工作还没有被制定，有待行业进一步探讨。此外，无人机辅助 MEC 的业务场景虽然可以借鉴 ETSI 对 MEC 的七大业务场景的规范和描述，但对无人机辅助 MEC 系统中区别于传统 MEC 的典型业务场景类型并没有得到行业和标准化组织的统一，从计费标准和商业模式到最后落地部署等一系列工作，仍需要进一步讨论和确定。

4 结束语

无人机辅助 MEC 系统作为未来无线通信网络的发展方向, 具有高空平台、移动性、低成本等优势, 能够显著改善网络计算能力、降低时延, 获得了广阔的研究价值和应用前景。此外, 无人机辅助 MEC 技术融合自身全域资源管理特性, 能够深度赋能未来空—天—地—海一体化网络实现, 有助于打造全方位立体算力网络。本文全面剖析了无人机辅助 MEC 系统的特点、网络架构和关键技术, 讨论了目前面临的主要挑战, 并展望了未来发展方向。无人机辅助 MEC 技术在 5G 中持续发展及产业融合, 将助推集研发设计、生产制造、服务管理于一体的工业生产实践, 为社会和企业赋能。同时, 持续开展对未来无人机辅助 MEC 系统的学术研究, 将有助于推动更多的创新应用出现, 从而带动垂直行业不断演进。同样地, 在社会产业需求的正向反馈下, 无人机辅助 MEC 系统研究也必将获得更深远的发展。

参考文献:

- [1] 刘光毅, 邓娟, 郑青碧, 等. 6G 智慧内生: 技术挑战、架构和关键特征[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 68-78.
LIU G Y, DENG J, ZHENG Q B, et al. 6G native intelligence: technical challenges, architecture and key features[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 68-78.
- [2] 刘光毅, 金婧, 王启星, 等. 6G 愿景与需求: 数字孪生、智能泛在, 移动通信[J]. 2020, 44(6): 3-9.
LIU G Y, JIN J, WANG Q X, et al. Vision and requirements of 6G: Digital twin and ubiquitous intelligence[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 3-9.
- [3] OTHMAN M, MADANI S A, KHAN S U. A survey of mobile cloud computing application models[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2013, 16(1): 393-413.
- [4] 张晓龙, 吴巍, 周彬. 基于移动边缘计算的任务卸载策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4434-4439.
ZHANG X L, WU W, ZHOU B. Task unloading strategy based on mobile edge computing[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(11): 4434-4439.
- [5] 张呈宇, 李红五, 屈阳, 等. 面向工业互联网的 5G 边缘计算发展与应用[J]. 电信科学, 2021, 37(1): 129-136.
ZHANG C Y, LI H W, QU Y, et al. 5G edge computing development and application for industrial Internet[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(1): 129-136.
- [6] PORAMBAGE P, OKWUIBE J, LIYANAGE M, et al. Survey on multi-access edge computing for Internet of Things realization[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2961-2991.
- [7] MAO Y Y, YOU C S, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [8] ZHOU F H, HU R Q, LI Z, et al. Mobile edge computing in unmanned aerial vehicle networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 140-146.
- [9] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向 6G 的无人机通信综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781-789.
CHEN X Y, SHENG M, LI B, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 781-789.
- [10] ZHANG P Y, WANG C, JIANG C X, et al. UAV-assisted multi-access edge computing: technologies and challenges[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2021, 4(4): 12-17.
- [11] 莫鸿彬, 李猛. 无人机边缘计算网络: 架构, 关键技术与挑战[J]. 广东通信技术, 2021, 41(4): 54-59, 79.
MO H B, LI M. UAV-MEC system: Architecture, key technology, and challenges[J]. Guangdong Communication Technology, 2021, 41(4): 54-59, 79.
- [12] 胡光武, 张超钦. 软件定义网络控制器研究进展[J]. 信息与电脑(理论版), 2016(20): 31-35.
HU G W, ZHANG C Q. Research progress of software defined network controller[J]. China Computer & Communication, 2016(20): 31-35.
- [13] 王蒙蒙, 刘建伟, 陈杰, 等. 软件定义网络: 安全模型、机制及研究进展[J]. 软件学报, 2016, 27(4): 969-992.
WANG M M, LIU J W, CHEN J, et al. Software defined networking: security model, threats and mechanism[J]. Journal of Software, 2016, 27(4): 969-992.
- [14] HU Q Y, CAI Y L, YU G D, et al. Joint offloading and trajectory design for UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 1879-1892.
- [15] YU Z, GONG Y M, GONG S M, et al. Joint task offloading and resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 3147-3159.
- [16] DIAO X B, ZHENG J C, CAI Y M, et al. Fair data allocation and trajectory optimization for UAV-assisted mobile edge computing[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2357-2361.
- [17] XU Y, ZHANG T K, LIU Y W, et al. UAV-assisted MEC networks with aerial and ground cooperation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 7712-7727.
- [18] QIN Z, WANG H, QU Y, et al. Air-ground collaborative mobile edge computing: architecture, challenges, and opportunities[J]. arXiv preprint arXiv:2101.07930, 2021.



- [19] LU Y W, HUANG Y, HU T Y. Robust resource scheduling for air-ground cooperative mobile edge computing[C]//Proceedings of 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 764-769.
- [20] ZHANG T, XU Y, LOO J, et al. Joint computation and communication design for UAV-assisted mobile edge computing in IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(8): 5505-5516.
- [21] XU Y, ZHANG T K, YANG D C, et al. UAV-assisted relaying and MEC networks: resource allocation and 3D deployment[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [22] GUO F X, ZHANG H L, JI H, et al. Joint trajectory and computation offloading optimization for UAV-assisted MEC with NOMA[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [23] XU Y, ZHANG T K, LOO J, et al. Completion time minimization for UAV-assisted mobile-edge computing systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(11): 12253-12259.
- [24] ASIM M, MASHWANI W K, SHAH H, et al. An evolutionary trajectory planning algorithm for multi-UAV-assisted MEC system[J]. Soft Computing, 2021, 26(16): 7479-7492.
- [25] SUN S, ZHANG G, MEI H, et al. Optimizing multi-UAV deployment in 3-D space to minimize task completion time in UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(2): 579-583.
- [26] ZHOU F H, WU Y P, HU R Q, et al. Computation rate maximization in UAV-enabled wireless-powered mobile-edge computing systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 1927-1941.
- [27] XU Y, ZHANG T K, LIU Y W, et al. Computation capacity enhancement by joint UAV and RIS design in IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 8983(99): 1.
- [28] XU Y, ZHANG T K, ZOU Y X, et al. Reconfigurable intelligence surface aided UAV-MEC systems with NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2022 (99): 1.
- [29] FAN L Y, YAN W, CHEN X H, et al. An energy efficient design for UAV communication with mobile edge computing[J]. China Communications, 2019, 16(1): 26-36.
- [30] ZHANG J, ZHOU L, ZHOU F H, et al. Computation-efficient offloading and trajectory scheduling for multi-UAV assisted mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(2): 2114-2125.
- [31] ZHANG X C, ZHANG J, XIONG J, et al. Energy-efficient multi-UAV-enabled multiaccess edge computing incorporating NOMA[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5613-5627.
- [32] XU Y, ZHANG T K, YANG D C, et al. Joint resource and trajectory optimization for security in UAV-assisted MEC systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 69(1): 573-588.
- [33] LU W D, DING Y, GAO Y, et al. Resource and trajectory optimization for secure communications in dual unmanned aerial vehicle mobile edge computing systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(4): 2704-2713.
- [34] ZHOU Y, PAN C, YEOH P L, et al. Secure communications for UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 68(1): 376-388.
- [35] GU X, ZHANG G, WANG M, et al. UAV-aided energy-efficient edge computing networks: security offloading optimization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(6): 4245-4258.
- [36] LIU F, CUI Y, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: towards dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728-1767.

[作者简介]



张天魁（1980—），男，北京邮电大学信息与通信工程学院教授，主要研究方向为无线通信网络、智能边缘计算和缓存、信号处理、内容中心网络等。



徐瑜（1992—），男，北京邮电大学信息与通信工程学院博士生，主要研究方向为移动边缘计算、无人机通信、智能反射面等。



刘元玮（1987—），男，英国伦敦玛丽女王大学电子工程与计算机科学学院副教授，主要研究方向为非正交多址接入技术、通感一体化、智能反射面、机器学习等。

杨鼎成（1985—），男，南昌大学信息工程学院教授，主要研究方向为协作通信、无人机通信、无线资源管理等。

任元红（1984—），男，北方自动控制技术研究所高级工程师，主要研究方向为指控系统设计。