

基于自供电无人机远距离中继通信与计算卸载策略优化研究

薛建彬, 田桂英, 马玉玲, 邵斐, 王涛

引用本文

薛建彬, 田桂英, 马玉玲, 邵斐, 王涛. 基于自供电无人机远距离中继通信与计算卸载策略优化研究[J]. 计算机科学, 2024, 51(11A): 240300069-7.

XUE Jianbin, TIAN Guiying, MA Yuling, SHAO Fei, WANG Tao. Study on Optimization of Long-distance Relay Communication and Computational Offloading Strategy Based on Self-powered UAVs [J]. Computer Science, 2024, 51(11A): 240300069-7.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[边缘计算网络中基于排队论的通信和计算资源联合优化](#)

Queueing Theory-based Joint Optimization of Communication and Computing Resources in Edge Computing Networks

计算机科学, 2024, 51(11A): 240100103-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240100103>

[基于多智能体协同的无人机编队控制研究](#)

Study on Unmanned Aircraft Formation Control Based on Multi-agent Collaboration

计算机科学, 2024, 51(11A): 240100105-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240100105>

[基于端边协同的节点部署和资源分配联合优化方法](#)

Joint Optimization Method for Node Deployment and Resource Allocation Based on End-EdgeCollaboration

计算机科学, 2024, 51(11A): 240200010-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240200010>

[基于深度强化学习的无人机自主探索方法](#)

Autonomous Exploration Methods for Unmanned Aerial Vehicles Based on Deep ReinforcementLearning

计算机科学, 2024, 51(11A): 231100139-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.231100139>

[基于OpenFaaS的多边缘管理框架](#)

Open FaaS-based Multi-edge Management Framework

计算机科学, 2024, 51(10): 362-371. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230800203>

基于自供电无人机远距离中继通信与计算卸载策略优化研究

薛建彬 田桂英 马玉玲 邵斐 王涛

兰州理工大学计算机与通信学院 兰州 730050

(xuejb@lut.edu.cn)

摘要 移动边缘计算(MEC)在无线用户服务中发挥了重要作用,显著提升了计算服务的效率。然而,随着地面用户数量的快速增长,无线设备直接访问 MEC 节点变得日益困难。针对这一挑战,提出了一种创新的通信系统模型,该模型利用自充电无人机(UAV)协同地面基站(包括 MEC 节点和能量发射站 LS),旨在提升地面无线通信系统的性能。深入探讨了 UAV-MEC 系统、能量发射站(LS)、IoT 设备以及边缘云(EC)之间的协同工作机制。综合考虑了 UAV 的功耗、LS 对 UAV 的充电过程以及 RF-DC 信号的转换损耗,目标是在保证 UAV 持续稳定运行的同时,最大化其完成任务后的剩余能量。其次,联合优化了 UAV 的悬停位置、通信和计算资源的分配以及任务分割的决策,旨在最小化 UAV 的能耗,同时确保无线通信系统整体性能的最优化。由于该问题高度非凸,提出了一种基于逐次凸逼近的高效算法,以获取次优解。通过大量的仿真实验,验证了所提方案在实际应用中的性能,其显著优于基准方案。

关键词: 无人机;移动边缘计算;无线电力传输;计算卸载能耗;资源分配

中图分类号 TN929

Study on Optimization of Long-distance Relay Communication and Computational Offloading Strategy Based on Self-powered UAVs

XUE Jianbin, TIAN Guiying, MA Yuling, SHAO Fei and WANG Tao

School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract Mobile edge computing(MEC) plays an important role in wireless subscriber services and significantly improves the efficiency of computing services. However, with the rapid growth of the number of terrestrial users, it becomes increasingly difficult for wireless devices to directly access MEC nodes. To address this challenge, this paper proposes an innovative communication system model that utilizes self-charging unmanned aerial vehicles(UAVs) to collaborate with terrestrial base stations, including MEC nodes and energy transmitting station LSs, aiming to enhance the performance of terrestrial wireless communication systems. The cooperative working mechanism between UAV-MEC system, energy launching station(LS), IoT devices, and edge cloud(EC) is deeply explored. The power consumption of the UAV, the charging process of the LS to the UAV, and the conversion loss of the RF-DC signals are considered comprehensively, aiming to maximize the residual energy of the UAV after completing its mission while ensure its continuous and stable operation. Secondly, the UAV's hovering position, the allocation of communication and computational resources, and the decision of task segmentation are jointly optimized with the aim of minimizing the UAV's energy consumption while ensuring the optimization of the overall performance of the wireless communication system. Since the problem is highly nonconvex, an efficient algorithm based on successive convex approximation is proposed to obtain a suboptimal solution. Extensive simulation experiments verify that the proposed scheme significantly outperforms the baseline schemes in practical applications.

Keywords Unmanned aerial vehicle, Mobile edge computing, Wireless power transmission, Computation offloading energy consumption, Resource allocation

1 引言

随着全球物流业务的持续增长以及消费者对即时交付服务需求的不断上升,物流服务的效率和速度已成为物流行业亟待解决的关键问题。在此背景下,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)因其独特的优势,如灵活性和高效性,被广泛认为是未来物流应用领域中潜力巨大的运输方式^[1]。近年来,

基于人工智能的 UAV 在智能交通领域的应用愈发广泛,推动了物流服务的创新与发展^[2-3]。UAV 物流服务作为一种新兴且具有巨大潜力的市场,利用先进的 UAV 技术将物品快速、高效地运送至城市和农村地区,为用户提供了前所未有的物流体验。随着 UAV 技术的日益成熟和低空空域管理政策的逐步放宽,终端物流配送有望实现 UAV 的广泛应用^[3]。与传统的物流车辆相比,UAV 具有恒定且高速的行驶能力,

基金项目:甘肃省创新基金项目(2022A-215);甘肃省科技计划基金项目(23YFGA0062)

This work was supported by the Gansu Innovation Fund (2022A-215) and Gansu Science and Technology Program Fund (23YFGA0062).

通信作者:田桂英(Luciana_8@163.com)

能够在拥堵的城市环境中快速穿越,显著提升物流效率^[4-5]。

同时,移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)作为部署下一代移动网络的关键技术,通过将云服务器部署在智能移动边缘的位置,为物联网设备提供了高质量的服务体验^[6-8]。MEC允许物联网设备将计算任务卸载到距离较近的边缘服务器,从而快速、节能地执行计算任务^[7]。这种计算模式的转变不仅减少了网络拥塞,还提高了服务质量(Quality of Service, QoS),降低了时延和能耗,为物联网设备带来了诸多益处。然而,随着移动用户的急剧增加,传统的 MEC网络已经难以满足地面物联网设备日益增长的计算和通信需求。因此,研究者们提出了 UAV 辅助的 MEC 网络作为改善地面物联网设备连接的有效方案。UAV 支持的 MEC 被认为是物联网实现无处不在的通信和计算服务的有前途的范例,具有广阔的应用前景和深远的社会意义。

2 相关工作

UAV 在多个应用场景下展现出卓越的通信和计算能力,同时还具备缓存部分数据以进一步降低通信时延和能耗的潜力^[9]。然而,尽管 UAV 具有这些优势,其运动控制问题,特别是路径规划,仍面临诸多挑战,包括能耗、防撞、轨迹成本、通信成本、可飞行成本以及人为成本等^[10-11]。为了应对这些挑战,研究者们提出了多种优化策略。文献[12]提出了一种联合优化 UAV 轨迹和计算资源分配的新方法,旨在最小化 UAV 和用户设备(UD)的加权和能耗。在这种方法中,配备有 MEC 的移动式 UAV 协助 UD 执行计算任务,UD 则执行部分计算任务。此外,该研究还考虑了非正交和正交多路访问两种类型的访问模式,以进一步提升系统性能。文献[13]则探讨了空地海一体化计算系统,其中 UAV 和卫星分别提供边缘计算和云计算服务。这种架构能够充分利用 UAV 和卫星的互补优势,为物联网设备提供无缝的计算服务。在 MEC 系统的能源效率方面,文献[14]的研究目标是最小化 UAV 的计算能耗和悬停能耗。这一研究对于延长 UAV 的续航时间和提高系统能效具有重要意义。针对 UAV 辅助的无线电力传输(Wireless Power Transmission, WPT)-MEC 系统,文献[15]通过优化 UAV CPU 频率和 UAV 轨迹,实现了 UAV 总能耗的最小化。这一研究为 UAV 在能源受限环境下的应用提供了新的思路。在 UAV 的飞行性能方面,文献[16]进行了深入研究。该研究不仅考虑了 UAV 的飞行轨迹和速度,还考虑了 UAV 的动力学特性和环境因素,为 UAV 的安全飞行提供了有力保障。文献[17]则联合优化了 UAV 进行隐蔽作业的飞行位置和无线通信发射功率。在通信隐蔽性、最大发射功率和与所需监视质量相关的 UAV 物理位置的特定限制下,该研究最大限度地提高了地面接收器的通信质量,为组合约束的优化问题提供了明确的解决方案。然而,随着 UAV 尺寸和功率的减小,UAV 电池容量成为限制其巡航距离和任务持续时间的关键因素。为了克服这一挑战,无线充电技术在 UAV 领域的应用逐渐受到关注。文献[18]提出的 WPT 技术作为一种有效的解决方案,在民用和军用领域的各种应用中均展现出巨大潜力。

在 UAV 辅助的 WPT 系统中,文献[19]研究了一种双用户 WPT 通信网络。在该网络中,UAV 作为能量发射器在空中飞行,为地面上的能量接收器(Energy Receiver, ER)充电。

通过优化 UAV 的三维轨迹,实现了能量消耗和 WPT 性能之间的权衡,从而最大化 ER 在给定任务期间收集的能量。文献[20]则研究了旋翼 UAV 作为能量发射器为一组能量收集器进行无线充电的场景。该研究考虑了 UAV 高度和覆盖范围对能量传输效率的影响,并通过优化 UAV 位置和充电时间,实现了能量收集器所收集能量的最大化。在文献[21]中,UAV 可以为许多场景提供可靠的无线通信解决方案。文献[22]考虑了 UAV 给用户分配的计算资源。文献[23]研究了一种新型 UAV、地面用户(Ground Users, GUs)和接入点之间的新交互式 MEC 系统。

上述研究尽管为 UAV WPT 系统的使用提供了有价值的指导,但仍然存在一些挑战。例如,大多数文献仅考虑了 UAV, GUs 及基站之间的通信,而较少关注 UAV 与边缘计算节点(Edge Computing Nodes, ECs)之间的协同计算和 UAV 能量有限的问题。此外,在 UAV 无线通信系统的研究中,实际情况下 UAV 起飞时所需的加速减速过程以及 UAV 的功耗和能量传输在现有工作中往往被忽视。为了应对这些挑战,本研究考虑了 UAV 的功耗、从电源(Power Source, PS)到 UAV 的功率传输以及实际转换效率和 UAV 的推动能耗。在 GUs 部署在一维拓扑的情况下,推导出 UAV 的最佳位置,并通过最小化 UAV 的能耗来确定 UAV 为地面物联网设备提供服务时所需携带的最大能量。这一研究不仅有助于优化 UAV 的能量使用效率,还为 UAV 在能源受限环境下的应用提供了新的思路。

贡献概括为:(1)通过结合自充电 UAV 与地面基站,构建了一个高效、可靠的无线通信系统,不仅有效解决了无线设备直接访问 MEC 节点的难题,还为 UAV 提供了持续稳定的能量供应,从而极大地提升了无线通信系统的性能和可靠性;(2)分析推导了在更好的信道条件下,优化 UAV 在 WPT 系统中的 UAV 位置、通信和计算资源分配以及任务分割决策最小化 UAV 能耗,最大化 UAV 携带的能量;(3)对于优化问题的非凸性,开发了一种基于 SCA 的算法来解决原始问题的非凸性,首先将原始非凸问题转化为其近似凸形式,然后高效求解。通过方案的纵横对比,评估提出的协同 UAV-MEC 方案的性能是优于其他方案的。

3 系统模型

考虑了具有能量收集功能的旋翼 UAV 辅助的 MEC 系统的模型如图 1 所示。

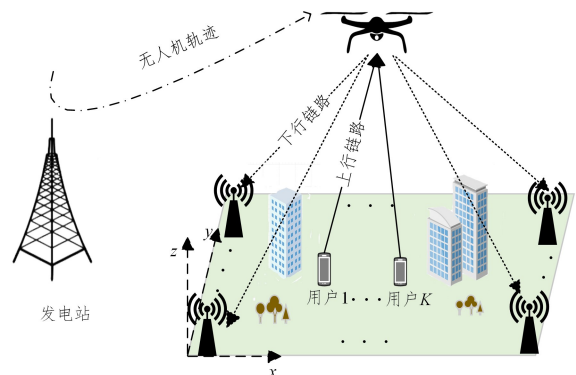


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

考虑多用户场景用集合 $k \in N = \{1, 2, \dots, K\}$ 表示 GUs

和用集合 $j \in J = \{1, 2, \dots, J\}$ 表示 ECs。用户由于计算能力有限,不具备执行本地计算卸载的能力,因此将所有任务卸载到 UAV 上。采用视距链路将计算任务全部卸载给 UAV, UAV 采用部分卸载策略。GUs, UAV 和基站形成三维无线通信网络。采用三维笛卡尔坐标系, UAV 任意时刻的位置为 $q_{\text{UAV}} = [x, y, H], t \in [0, T]$, 高度 H 固定, 发电站(PS)的位置可以表示为 $L_{\text{ps}} = (0, 0, h)$, 用户 GUs 表示为 $M_k = (x_k, y_k, 0)$, 基站群 ECs 记为 $X_j = (x_{\text{bs}}, y_{\text{bs}}, 0)$ 。为了量化计算, 假设 GUs 和 ECs 在某一时刻的位置是固定的。

3.1 能耗模型

在 UAV-MEC 系统中, 视距链路传输比其他信道损伤更占主导地位, 并由于 UAV 移动性而产生的多普勒效应可以由接收机完全补偿。因此 GUs k 到 UAV 和 UAV 到基站群的信道增益可以根据自由空间路径损耗模型表示:

$$h_{k-U} = \beta_0 d_k^{-2} = \frac{\beta_0}{\|M_k - q_{\text{UAV}}\|^2}, \forall k \quad (1)$$

$$h_{U-j} = \beta_0 d_j^{-2} = \frac{\beta_0}{\|q_{\text{UAV}} - X_j\|^2}, \forall k \quad (2)$$

其中, β_0 表示参考距离 d_0 处的通道功率增益, d_k 表示用户到 UAV 的上行距离。根据香农公式, 用户到 UAV 和 UAV 到基站群的信息速率表示为:

$$R_{k-U} = B_k \log_2 \left(1 + \frac{h_{k-U} P_k}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

$$R_{U-j} = B_j \log_2 \left(1 + \frac{h_{U-j} P_U}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

其中, B_k 和 B_j 表示信道带宽(Hz), P_k 和 P_U 表示用户 k 的卸载功率和 UAV 的传输功率, σ^2 和 δ^2 表示 UAV 的噪声功率, $\gamma_k = \frac{\beta_0 P_k}{\sigma^2}$, $\gamma_j = \frac{\beta_0 P_U}{\sigma^2}$ 。为简单起见, 假定 UAV 和 EC 的噪声功率是一样的。

定义 $\rho_U \in [0, 1]$ 为 UAV 接收到任务需要处理的部分, $\{\rho_j \in [0, 1]\}_{j \in J}$ 表示 EC j 接收的任务需要处理的部分。其中 f_U (CPU/s) 是 UAV 分配给用户的计算资源。注意:

$$\rho_U = \begin{cases} 0, & \text{表示 UAV 将任务全部卸载给 BS} \\ 1, & \text{表示 UAV 进行本地计算} \end{cases}$$

UAV 本地处理任务的时延和能耗可以表示为:

$$t^U = \frac{\rho_U L_i C_i}{f_U} \quad (5)$$

$$E_{\text{local}}^{\text{UAV}} = \xi f_U^3 t^U = \xi f_U^2 \rho_U L_i C_i \quad (6)$$

其中, L_i (bit) 表示需要处理的计算任务数据量, C_i 表示处理 1 bit 计算任务需要的 CPU 转数。为确保 UAV 服务的可持续性, UAV 的能耗也非常重要。UAV 的能耗建模为 $\xi(f_U^3)$, 其中 ξ 取决于 CPU 架构的有效电容开关。

用户 k 到 UAV 的上行卸载时间和能耗为:

$$t_{\text{UAV}}^{\text{UP}} = \frac{L_i}{\frac{1}{k} \sum_{k=1}^K R_{k-U}} \quad (7)$$

$$E_{\text{UAV}}^{\text{UP}} = P^{\text{UAV}} t_{\text{UAV}}^{\text{UP}} = \frac{L_i P^{\text{UAV}}}{\frac{1}{k} \sum_{k=1}^K R_{k-U}} \quad (8)$$

其中, P^{UAV} 为 UAV 接收功率。此外, UAV 将用户 k 的任务通过下行传输信道卸载到 EC j 时的传输时间和能耗为:

$$t_{\text{BS}}^{\text{down}} = \max_{j \in J} \left\{ \frac{\rho_j L_i}{R_{U-j}} \right\} \quad (9)$$

$$E_{\text{BS}}^{\text{down}} = P_U t_{\text{BS}}^{\text{down}} = \sum_{j=1}^J \frac{P_U \rho_j L_i}{R_{U-j}} \quad (10)$$

其中, P_U 表示 UAV 的传输功率。ECs 接收到 UAV 卸载的任务数据后开始计算。因此, ECs 通过 UAV 处理从 MU i 到 EC j 的卸载任务的时延和能耗分别为:

$$t_j^{\text{BS}} = \frac{\rho_j L_i C_i}{f_j^{\text{BS}}} \quad (11)$$

$$E_j^{\text{BS}} = \sum_{j=1}^J \xi (f_j^{\text{BS}})^3 t_j^{\text{BS}} = \sum_{j=1}^J \xi \rho_j L_i C_i (f_j^{\text{BS}})^2 \quad (12)$$

其中, f_j^{BS} 是 ECs 分配给用户的计算资源, ECs 的计算的能耗可以表示为式(12)。因此, UAV 在整个过程中的总能耗为:

$$E_k^{\text{com}} = \lambda_k (E_{\text{local}}^{\text{UAV}} + E_{\text{UAV}}^{\text{UP}} + E_{\text{BS}}^{\text{down}}) \quad (13)$$

其中, λ_k 表示任务的可达率。

3.2 机动模型

根据自由空间路径损耗模型得到发电站和 UAV 之间的传输损耗可以表示为:

$$PL_{\text{PS-UAV}} = 20 \lg(f) + 20 \lg(d_{\text{ps}}) - 147.55 \quad (14)$$

其中, f 表示载波频率, $d_{\text{ps}} = H - H_{\text{ps}} \geq 1 \text{ m}$ 为基站与 UAV 之间的距离。UAV 在 PS 进行能量收集所接收到的射频功率可以表示为:

$$P_{\text{PS-UAV}} = P_t + G_t + G_{\text{uvv}} - PL_{\text{PS-UAV}} \quad (15)$$

其中, P_t 表示发射功率, G_t 表示 PS 的发射电磁波的信道增益, G_{uvv} 表示 UAV 处的接收信道增益, $PL_{\text{PS-UAV}}$ 为 PS 和 UAV 之间的路径增益。

假设能量收集在线性区域并使用线性模型得到射频和直流信号的线性关系 $P_{\text{DC}} = \eta P_{\text{RF}}$, 可以表示为计算得到 UAV 接收到的直流能量为:

$$E_{\text{PS-UAV}} = \eta 10^{\frac{P_{\text{PS-UAV}}}{10}} T_1 \quad (16)$$

其中, T_1 表示能量收集的时间, P_{DC} 表示接收端的直流功率, η 表示恒定的转换效率, P_{RF} 是接收到的射频功率。为了保证 UAV 在充电过程中不坠落, 接收到的直流功率必须大于悬停功率, $\eta 10^{\frac{P_{\text{PS-UAV}}}{10}} > P(0)$ 。

UAV 从充电站收集能量飞行至用户上方过程中的各种机动动作产生 UAV 功耗。在文献[24]中, 作者推导了飞行速度 V 的旋翼 UAV 的推进功耗模型为:

$$P(V) = P_0 \left(1 + \frac{3V^2}{U_{\text{tip}}^2} \right) + P_i \left(\sqrt{1 + \frac{V^4}{4v_0^4}} - \frac{V^2}{2v_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{d_0 \rho s A V^3}{2} \quad (17)$$

其中 $P_0, U_{\text{tip}}, P_i, v_0, d_0, \rho, s, A$ 各参数的实际物理意义在表 1 中有详细说明, 此处不再赘述。速度 V 的飞行能耗为 $E_V = P(V) T_{\text{fly}}, T_{\text{fly}}$ 表示 UAV 飞行的时间。将 $V=0$ 代入上述模型中即可得到悬停功耗和能耗为:

$$P(0) = P_0 + P_i \quad (18)$$

$$E_{\text{hov}} = P(0) T_1 \quad (19)$$

其中, T_1 表示 UAV 在速度 $V=0$ 时的悬停时间, 与 UAV 能量收集的时间是相等的。在线性加减速过程中, 时间和速度之间的关系式为 $V = v_0 + at$, 其中 v_0 表示初速度, a 表示加速度, t 表示时间。UAV 在加速过程中消耗的能耗可以表示为:

$$E_{\text{acc}} = \int_0^{\frac{V}{a}} P(t) dt \quad (20)$$

其中, $\frac{V}{a}$ 表示加速的时间, $v_0 = 0$ 表示初速度为 0。

$$P(t) = P_0 \left(1 + \frac{3(at)^2}{U_{hp}^2} \right) + P_i \left(\sqrt{1 + \frac{(at)^4}{4v_0^4}} - \frac{(at)^2}{2v_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} d_0 \rho_s A (at)^3 \quad (21)$$

加速和减速过程在研究中是对称的, $E_{acc} = E_{dec}$ 。UAV 飞行能耗可以表示为:

$$E_{mov-to} = P(V) \frac{x_h - \frac{V^2}{a}}{V} + 2 \int_0^{\frac{V}{a}} P(t) dt \quad (22)$$

为保证 UAV 在巡航过程中有足够的能量防止坠毁, 需满足 $E_{mov-to} = E_{mov-back}$ 。UAV 在最后旅程中剩余的电量可以表示为:

$$E_{fly} = E_{PS-UAV} - E_{hov} - 2(E_V + 2E_{acc}) \quad (23)$$

4 问题提出及解决

本章目标是最大化能量, 因此优化问题可以分别表示为:

$$P_0: (x^*, y^*, H) = \arg \max_{x_h, y_h, H} E_{fly}(x_h, y_h, H)$$

$$P_1: \max_{\rho_U, B_k, \rho_U, \rho_j, f_U, f_j^{BS}}$$

$$s. t. C1: 0 \leq \rho_U \leq 1$$

$$C2: 0 \leq \rho_j \leq 1, \forall j$$

$$C3: \rho_U + \sum_{j=1}^J \rho_j = 1, \forall j$$

$$C4: \sum_{k \in K} B_k \leq B \quad (24)$$

$$C5: B_k \geq 0, \forall k$$

$$C6: f_U \geq 0$$

$$C7: f_j^{BS} \geq 0, \forall j$$

$$C8: f_U \leq F_U$$

$$C9: \sum_{j=1}^J f_j^{BS} \leq F_j^{BS}$$

上述公式中, 约束 C1, C2 和 C3 表示用户 U_s 的卸载任务完全由 UAV 和基站群处理, 分值在 0 到 1 之间变化; 约束 C4, C5 和 C6, C7, C8, C9 确保上行带宽, UAV 和 BS 的 CPU 频率分配的资源非负且不超过限定约束。为了降低计算复杂度, 通过分析问题 P_0 中约束条件和目标函数的结构, 将其分解为两个相互依赖的子问题并进行分步求解。

(1) 针对问题 P_0 : UAV 在卸载的同时还额外需要能量进行悬停, UAV 卸载时的总功率和用户将计算任务卸载给 UAV 进行计算的能量为:

$$P_k = \frac{E_{fly}}{t_{total}} - P(0) \quad (25)$$

$$E_{sum}^k(x_h, y_h, H) = \sum_{k=1}^K Q_{sum}^k(x_h, y_h, H) \quad (26)$$

其中, $t_{total} = t_{BS}^{down} + t_{UAV}^{UP} + t^U$, $Q_{sum}^k(x_h, y_h, H) = 10^{\frac{P_k}{10}} t_{total}$, 因此问题 P_0 重新表述为:

$$P_2: (x^*, y^*, H) = \arg \min_{x_h, y_h} E_{sum}^k(x_h, y_h, H) \quad (27)$$

$$s. t. E_{fly} \geq 0$$

优化 UAV 位置算法的流程如算法 1 所示。

算法 1 优化 UAV 位置

输入: 地面用户 $GU_s k$ 的位置矩阵 $S = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k), \dots, (x_K, y_K)]$; P_1 ; G ; G_{uav} ; V ; a ; H ; T_1 ; $X = \min(S \rightarrow x)$;

步长: $\max(S \rightarrow x)$; $Y = \min(S \rightarrow y)$; 步长: $\min(S \rightarrow y)$

输出: 优化的 UAV 位置 x^*, y^*

1. for $i = 1 : \text{length}(X)$ do

2. for $j = 1 : \text{length}(Y)$ do

3. 初始化 E_{sum}^k

$$E_{sum}^k \text{ index}(i, j) = (X(i) - \min(X)) * \text{length}(Y) + Y(j) - \min(Y) + 1$$

4. 用式(15)一式(23)计算 $E_{fly}(\text{index}(i, j))$

5. if $E_{fly}(\text{index}(i, j)) \geq 0$ then

6. for $k = 1 : \text{length}(S)$ do

7. 用式(24)一式(27)计算 E_{sum}^k

$$8. E_{sum}^k(\text{index}(i, j)) = E_{sum}^k(\text{index}(i, j)) + Q_{sum}^k(k)$$

9. else

10. break;

$$11. \text{index}^*(i, j) = \arg \min E_{sum}^k(\text{index}(i, j))$$

$$12. i, j \leftarrow \text{index}^*(i, j)$$

结果: $x^* = X(i), y^* = Y(i)$

(2) 问题 P_1 : 由于目标函数和约束条件的非凸性, 问题 P_1 很难求解。设计基于逐次凸逼近的算法, 将非凸目标函数和约束转换为合适的凸近似, 以迭代求解由此产生的优化问题。用户数据传输时速率公式中 UAV 位置 q_i 都是非凸的。根据文献[25]提到的示例, 将重新制定非凸约束和非凸目标函数转换为合适的近似值。在式(9)中, $\frac{1}{R_{U-j}}, \frac{1}{R_{k-U}}$ 是关于 UAV 位置的非凸函数, 因此使用非负的辅助变量 $\{\alpha_j\}_{j \in J}, \{\beta_k\}_{k \in N}$ 替换。通过定义 $\widehat{R_{k-U}} = \log_2 \left(1 + \frac{h_{k-U} P_k}{\sigma^2} \right)$ 。

目标函数: $E_k^{com} = E_{local}^{UAV} + E_{UAV}^{UP} + E_{BS}^{down} = \xi \rho_U L_i C_i f_U^2 + \frac{L_i P^{UAV}}{R_{k-U}} + \frac{P_U \rho_j L_i}{R_{U-j}}$, 因此目标函数的非凸项可以重新表述为凸和非负函数的乘积:

$$E_{local}^{UAV} = \xi \rho_U L_i C_i f_U^2 = \xi L_i C_i \sigma_1(\rho_U) \sigma_2(f_U) \quad (28)$$

$$E_j^{BS} = \xi \rho_j L_i C_i (f_j^{BS})^2 = \xi L_i C_i \sigma_1(\rho_j) \sigma_2(f_j^{BS}) \quad (29)$$

$$E_{UAV}^{UP} = P^{UAV} t_{UAV}^{UP} = P^{UAV} L_i \sigma_3(B_k) \sigma_3(\beta_k) \quad (30)$$

$$E_{UAV}^{UP} = P^{UAV} t_{UAV}^{UP} = P^{UAV} L_i \sigma_3(B_k) \sigma_3(\beta_k) \quad (31)$$

式(28)中, $\sigma_1(\rho_U) = \rho_U$; 式(29)中, $\sigma_2(f_j^{BS}) = (f_j^{BS})^2$; 在式(30)和式(31)中, $\sigma_3(B_k) = B_k, \sigma_3(\beta_k) = \frac{1}{\beta_k} h_1(\rho_j) = \rho_j, \sigma_3(\alpha_j) = \frac{1}{\alpha_j}$ 。基于给定的 SCA 算法第 i 次迭代的可行解, 根据 $\rho_U(i), \rho_j(i), B_k(i), \alpha_j(i), \beta_k(i), f_U(i)$ 推导出 $E_{local}^{UAV}, E_{UAV}^{UP}, E_{BS}^{down}$ 的凸约束。

$$\begin{aligned} & \widehat{E_{local}^{UAV}}(\rho_U, f_U; \rho_U(i), f_U(i)) \\ & \triangleq \xi L_i C_i [\rho_U(i)^2 + \rho_U(i) (f_U)^2] + \frac{\tau_{\rho_U}}{2} (\rho_U - \rho_U(i))^2 + \\ & \frac{\tau_{f_U}}{2} (f_U - f_U(i))^2 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & \widehat{E_{BS}^{down}}(\rho_j, \alpha_j; \rho_j(i), \alpha_j(i)) \\ & \triangleq P_U L_i \left(\frac{\rho_j}{\alpha_j(i)} + \frac{\rho_j(i)}{\alpha_j} \right) + \frac{\tau_{\rho_j}}{2} (\rho_j - \rho_j(i))^2 + \frac{\tau_{\alpha_j}}{2} (\alpha_j - \alpha_j(i))^2 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} & \widehat{E_{UAV}^{UP}}(B_k, \beta_k; B_k(i), \beta_k(i)) \\ & \triangleq P^{UAV} \left[L_i \left(\frac{1}{B_k \beta_k(i)} + \frac{1}{B_k(i) \beta_k} \right) + \frac{\tau_{B_k}}{2} (B_k - B_k(i))^2 + a \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\tau_{\beta_k}}{2}(\beta_k - \beta_k(i)) \quad (34)$$

其中, i 表示迭代次数, $\tau_{\rho_U}, \tau_{f_U}, \tau_{B_k}, \tau_{\beta_k}, \tau_{\rho_j}, \tau_{\alpha_j} > 0$, 因此目标函数可以表示为:

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k (\widehat{E}_{\text{local}}^{\text{UAV}} + \widehat{E}_{\text{UAV}}^{\text{UP}} + \widehat{E}_{\text{BS}}^{\text{down}}) \quad (35)$$

为了解决非凸性, 有约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_j \leq R_{U_j}, \forall j \\ 0 \leq \beta_k \leq R_{k-U}, \forall k \end{cases} \quad (36)$$

利用一阶泰勒展开得到全局下界。因此, 对 $R_{U_j}, \widehat{R}_{k-U}$ 进行关于轨迹的泰勒展开, 分别得到基于 SCA 算法的第 i 次迭代的 UAV 轨迹的下界:

$$\begin{aligned} R_{U_j} &\geq R'_{U_j}(q_{\text{UAV}}^i; q_{\text{UAV}}^i(i)) \\ &\triangleq R_{U_j}(q_{\text{UAV}}^i(i)) - \\ &\quad \frac{B_j \gamma_j (\|q_{\text{UAV}}^i - X_j\|^2 - \|q_{\text{UAV}}^i(i) - X_j\|^2)}{\ln 2 (\|q_{\text{UAV}}^i(i) - X_j\|^2) (\gamma_j + \|q_{\text{UAV}}^i(i) - X_j\|^2)} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \widehat{R}_{k-U} &\geq \widehat{R}'_{k-U}(q_{\text{UAV}}^i; q_{\text{UAV}}^i(i)) \\ &\triangleq \widehat{R}_{k-U}(q_{\text{UAV}}^i(i)) - \\ &\quad \frac{\gamma_k (\|M_k - q_{\text{UAV}}^i\|^2 - \|M_k - q_{\text{UAV}}^i(i)\|^2)}{\ln 2 (\|M_k - q_{\text{UAV}}^i(i)\|^2) (\gamma_k + \|M_k - q_{\text{UAV}}^i(i)\|^2)} \end{aligned} \quad (38)$$

其中, $\gamma_j = \frac{\beta_0 P_U}{\sigma^2}, \gamma_k = \frac{\beta_0 P_k}{\sigma^2}$ 。由于 R_{U_j} 和 \widehat{R}_{k-U} 是关于 UAV 轨迹的凹函数, 通过替换它们的下界, 得到凸约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_j \leq R'_{U_j}(q_{\text{UAV}}^i; q_{\text{UAV}}^i(i)) \\ 0 \leq \beta_k \leq \widehat{R}'_{k-U}(q_{\text{UAV}}^i; q_{\text{UAV}}^i(i)) \end{cases} \quad (39)$$

最后, 一组决策变量 ω 表示优化问题。重构第 i 次迭代的凸近似 $\widetilde{\omega}(i)$ 的优化问题。

$$\begin{aligned} \widetilde{\omega} &= (q_{\text{UAV}}^i, B_k, \rho_U, \rho_j, f_U, f_j^{\text{BS}}, \alpha_j, \beta_k) \\ P_3: \min_{\omega} &\sum_{k \in N} \lambda_k (\widehat{E}_{\text{local}}^{\text{UAV}}(\widetilde{\omega}, \widetilde{\omega}(i)) + \widehat{E}_{\text{UAV}}^{\text{UP}}(\widetilde{\omega}, \widetilde{\omega}(i)) + \\ &\sum_{j \in J} \widehat{E}_{\text{BS}}^{\text{down}}(\widetilde{\omega}, \widetilde{\omega}(i))) \\ \text{s. t. } &0 \leq \alpha_j \leq R'_{U_j}(\widetilde{\omega}, \widetilde{\omega}(i)), \forall j \\ &0 \leq \beta_k \leq \widehat{R}'_{k-U}(\widetilde{\omega}, \widetilde{\omega}(i)), \forall k \end{aligned} \quad (40)$$

$P_1: C1 - C9$

优化子问题算法流程如算法 2 所示。

算法 2 优化子问题 (P_3)

输入: $i=0, \delta=0.5, \epsilon=0.01, \widetilde{\omega}(0) = (q_{\text{UAV}}^1(0), B_k(0), \rho_U(0), \rho_j(0), f_U(0), f_j^{\text{BS}}(0), \alpha_j(0), \beta_k(0)), \tau_{\rho_U}, \tau_{f_U}, \tau_{B_k}, \tau_{\beta_k}, \tau_{\rho_j}, \tau_{\alpha_j} > 0, \theta(i) \in (0, 1]$

输出: $q_{\text{UAV}}^i, B_k, \rho_U, \rho_j, f_U, f_j^{\text{BS}}$

循环:

1. 计算原问题的 $\widehat{\omega}(\widetilde{\omega}(i))$
2. $\widetilde{\omega}(i+1) = \widetilde{\omega}(i) + \theta(i) (\widehat{\omega}(\widetilde{\omega}(i)) - \widetilde{\omega}(i))$
 $\theta(i) = \theta(i-1) (1 - \delta \theta(i))$
3. $i \leftarrow i+1$

收敛条件: 原问题 $\widetilde{\omega}(i)$ 是一个固定解

在步骤 2 中, 步长是递减的, 如果选择步长 $\theta(i)$, 使得 $\theta(i) \in (0, 1), \theta(i) \rightarrow 0$, 且 $\sum \theta(i) = \infty$, 保证算法的收敛性, $\theta(i)$

有界, 且至少有一个极限点是静止的。 $\|\widehat{\omega}(\widetilde{\omega}(i)) - \widetilde{\omega}(i)\|$ 是

衡量平稳性的终止判据。因此, 存在一个收敛阈值使得 $\|\widehat{\omega}(\widetilde{\omega}(i)) - \widetilde{\omega}(i)\| \leq \epsilon$ 。

5 仿真分析

系统中考虑了 4 个地面基站和 10 个随机分布的 GUs 组成的 UAV 辅助的 MEC 系统。将通过仿真来验证所提出方案的性能与有效性。定义 UAV 的飞行高度 H 为 100 m, 发电站 PS 的高度 h 为 45 m, 发电站的信道增益 G_t 为 14 dBi, UAV 接收的信道增益 G_{uav} 为 2 dBi, UAV 悬停状态下型阻功率为 P_0 , UAV 的噪声功率 $\sigma^2 = -100$ dBm, 用户的卸载功率 $P_k = 0.1$ W, UAV 的传输功率 $P_U = 1$ W, UAV 接收功率为 P^{UAV} , 需要处理的计算任务数据量 $L_i (i=1, 2, \dots, 10) = [2, 3, 5, 4, 5, 3, 5, 1, 1, 5]$ Mbit, 处理 1 bit 任务需要的 CPU 转数 $C_i = [100, 200]$ cycles/bit, UAV 总的计算资源 $F_U = 3$ GHz, 基站总的计算资源 $F_j^{\text{BS}} = [6, 7, 9, 8]$ GHz, 其他部分仿真参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters setting

参数	代表含义
$P_t = 50$ W	发射功率
$f = 925$ MHz	载波频率
$a = 1$ m/s ²	加速度
$\eta = 0.6$	转换效率
$V = 10$ m/s	速度
$P_0 = 14.81$	型阻功率
$U_{\text{tip}} = 80$	UAV 叶尖角速度
$P_j = 41.54$	诱导功率
$v_0 = 5.12$ m/s	诱导速度
$d_0 = 0.5$	机身阻力比
$\rho = 1.225$ kg/m ³	空气密度
$s = 0.12$	总叶片面积/叶片扫过面积之比
$A = 0.125$ m ²	UAV 叶片扫过的面积
$\beta_0 = -50$ dB	信道功率增益
$\xi = 10^{-28}$	有效电容系数
$\lambda_k = 30$ task/min	任务的可达率
$P^{\text{UAV}} = 0.1$ W	UAV 接收功率
$B = 10$ MHz	下行链路带宽
$B_j = 0.5$ MHz	信道带宽

考虑了一个 UAV 辅助的 MEC 系统和 4 个地面基站边缘及 10 个 GUs 随机分布在 1000×1000 的二维坐标中, 如图 2 所示。部署和操作 UAV 是为了方便 MEC 系统, 利用优化的位置找到 UAV 的最佳三维位置。

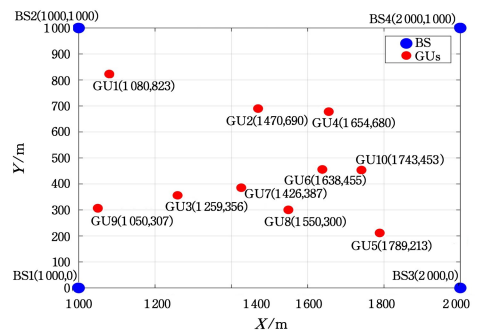


图 2 地面基站和随机分布的地面用户

Fig. 2 Terrestrial base stations and randomly distributed terrestrial users

UAV 飞行的速度对 UAV 携带能量的影响如图 3 所示。

通过仿真分析验证了合适的 UAV 速度对 UAV 携带的能量的影响。从图中选取 5 个速度值, 分别是 $V=6, 8, 9, 10, 12$, 横坐标表示 η 的取值, 纵坐标表示 UAV 携带的能量。在 η 取值相同的情况下, UAV 携带的能量随着 UAV 速度的增加而增加, 这是因为当 UAV 的速度逐渐增加的时候, UAV 的推进功耗会降低, 从而降低了 UAV 的功耗。但是, 当速度较大时, 能量的变化开始微乎其微, 这是因为 UAV 高速悬停的时候, 从速度为 0 加速和减速到速度为 0 时需要消耗更多的时间, 而加速和减速会消耗额外的能量。

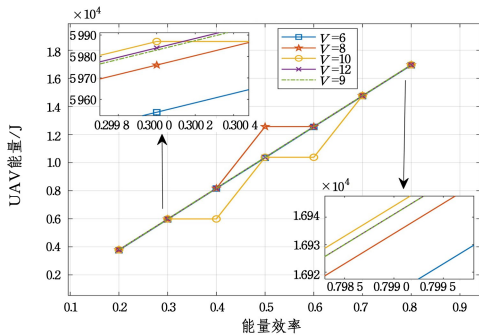


图 3 不同的速度 V 对结果的影响

Fig. 3 Effect of different speeds V on the results

图 4 描述的是 UAV 和基站在计算卸载任务时的最佳任务分配比。可以看出, 用户 GU3, GU4, GU5, GU7, GU10 是输入数据量比较大的用户, 当输入的数据量比较大时, 用户将任务先分配给 UAV, 图中用户将 30.8% 的任务卸载给 UAV 先进行计算, 然后将剩余的任务分配给基站进一步卸载计算。

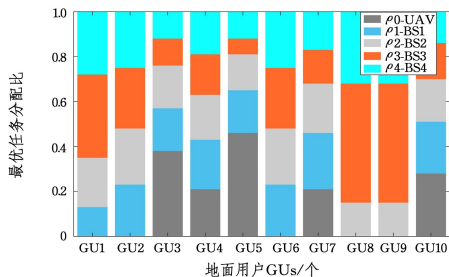


图 4 无人机和基站的最佳任务分割比

Fig. 4 Optimal task splitting ratio for UAVs and BS

图 5 给出了 UAV 的下行链路对 UAV 辅助的 MEC 系统的影响。

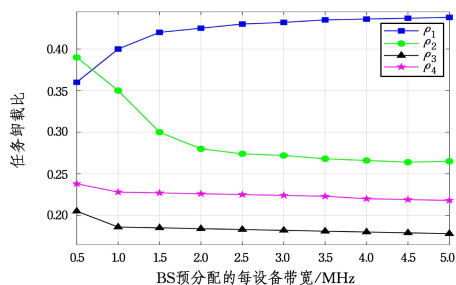


图 5 每带宽与基站的最佳任务分配比

Fig. 5 Optimal task allocation ratio per bandwidth vs. BS

首先研究了每设备带宽对地面基站最佳任务分配的影响。计算卸载的设备带宽是事先分配给每个用户的。假设地面基站的设备带宽从 $B_{j=1} = 0.5$ MHz 增加到 5 MHz, $B_{j=2,3,4}$ 数值不变。从图中更可以看出, BS1 对 GU1 的最佳任务分配

比 ρ_{11} 随着 BS1 的每个设备带宽的增大而增加, 与此同时 $\rho_{12}, \rho_{13}, \rho_{14}$ 在逐步减少。这是因为计算任务卸载随着 B_1 的增大, UAV 的下行传输时延减小, 会有更多的任务卸载到基站进行计算处理, 因此相应的计算任务分割比率就会增加。

图 6 给出了 UAV 的计算能力从 3 GHz 增加到 30 GHz 时和系统成本之间的关系。从图中可以观察到, 对于仅有边缘云方案, 系统成本不随 UAV 计算能力的增加而发生改变。针对 UAV 相同计算能力, 系统成本从大到小是: 仅有 UAV 方案, 仅有边缘云方案, UAV 边缘云协同方案, 且其他的 3 个方案都随着 UAV 计算能力的增加而呈现下降的趋势, 因为更多的计算资源可以用来减少 UAV 的任务计算延迟。

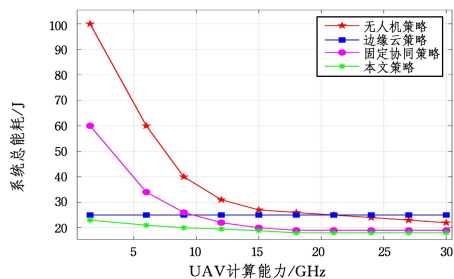


图 6 4 种方案下无人机的计算能力对比

Fig. 6 Comparison of computing power of UAVs in four schemes

如图 7 所示, 仅有 UAV 方案的系统成本随着 UAV 传输功率的增加而保持不变, 这是因为所有的用户将全部的计算任务卸载到 UAV 上进行处理。其他 3 种方案的系统成本均随着 UAV 传输功率的增加相应增加, 因为在 UAV 和边缘云的传输链路中, UAV 的传输能耗和和传输功率成正比关系。提出的方案在降低系统成本方面优于基准方案, 这验证了协同 UAV 和边缘云在任务卸载过程中的优势。

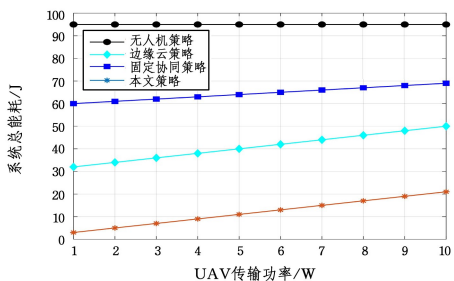


图 7 不同卸载方案下无人机传输功率和系统能耗的关系

Fig. 7 Relationship between UAV transmission power and system energy consumption in different offloading schemes

结束语 本文研究了一种 UAV 辅助的 WPT-MEC 系统。针对第一部分 UAV 的能耗问题, 通过优化 UAV 的位置, 找到 UAV 在卸载计算任务之前携带能量最大的位置; 针对第二部分 UAV 的计算卸载能耗, 通过联合优化 UAV 位置、通信和计算资源分配以及任务分配决策, 使 UAV 能耗最小化, 将非凸问题转换为凸问题并成功求解。提出了一种基于 SCA 的算法来解决原始非凸问题, 首先将原始非凸问题转化为其近似凸形式, 然后高效求解。通过方案对比发现 UAV 的速度和发射功率越高, UAV 携带的总能量就越高。实验验证了 UAV-EC 协作卸载方案在很大程度上优于无线通信中只有 UAV 或 EC 进行 MEC 的基线方案。然而, 亟需解决的一个问题是 UAV 通过射频进行的无线功率传输是非常有限的, 而 UAV 的能耗却非常大。未来, 会把研究重点放到多架

UAV 的环境中,并引入智能反射面解决上述 UAV 能量收集和时间复杂度的问题。

参 考 文 献

- [1] MOSHREF-JAVADI M, WINKENBACH M. Applications and Research avenues for drone-based models in logistics: A classification and review[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 177: 114854.
- [2] DU P, HE X, CAO H, et al. AI-based energy-efficient path planning of multiple logistics UAVs in intelligent transportation systems[J]. *Computer Communications*, 2023, 207: 46-55.
- [3] ZHANG H, TIAN T, FENG O, et al. Research on Public Air Route Network Planning of Urban Low-Altitude Logistics Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Sustainability*, 2023, 15(15): 12021.
- [4] LI S, ZHANG H, LI Z, et al. An air route network planning model of logistics UAV terminal distribution in urban low altitude airspace[J]. *Sustainability*, 2021, 13(23): 13079.
- [5] RAJ R, MURRAY C. The multiple flying sidekicks traveling salesman problem with variable drone speeds[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 120: 102813.
- [6] XIANG B, ELIAS J, MARTIGNON F, et al. Resource calendaring for mobile edge computing: centralized and decentralized optimization approaches [J]. *Computer Networks*, 2021, 199: 108426.
- [7] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: The communication perspective[J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [8] ZHANG J, HU X, NING Z, et al. Joint resource allocation for latency-sensitive services over mobile edge computing networks with caching[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 6(3): 4283-4294.
- [9] YAO Z, WU H, CHEN Y. Multi-objective cooperative computation offloading for mec in uavs hybrid networks via integrated optimization framework[J]. *Computer Communications*, 2023, 202: 124-134.
- [10] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2334-2360.
- [11] CHENG F, GUI G, ZHAO N, et al. UAV-relaying-assisted secure transmission with caching[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(5): 3140-3153.
- [12] JI J, ZHU K, YI C, et al. Energy consumption minimization in UAV-assisted mobile-edge computing systems: Joint resource allocation and trajectory design[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(10): 8570-8584.
- [13] CHENG N, LYU F, QUAN W, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: A learning-based approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(5): 1117-1129.
- [14] YANG Z, PAN C, WANGK, et al. Energy efficient resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(9): 4576-4589.
- [15] ZHOU F, WU Y. UAV-enabled mobile edge computing: Offloading optimization and trajectory design[C]// 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018: 1-6.
- [16] LIU R, ZHANG Z, JIAO Y, et al. Study on Flight Performance of Propeller-Driven UAV[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 2019(1): 6282451.
- [17] YAN S, HANLY S V, COLLINGS I B. Optimal transmit power and flying location for UAV covert wireless communications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(11): 3321-3333.
- [18] NGUYEN M T, NGUYEN C V, TRUONG L H, et al. Electromagnetic field based wpt technologies for uavs: A comprehensive survey[J]. *Electronics*, 2020, 9(3): 461.
- [19] XU J, ZENG Y, ZHANG R. UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(8): 5092-5106.
- [20] FENG W, ZHAO N, AO S, et al. Joint 3D trajectory design and time allocation for UAV-enabled wireless power transfer networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 9265-9278.
- [21] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2334-2360.
- [22] ASHERALIEVA A, NIYATO D. Hierarchical game-theoretic and reinforcement learning framework for computational offloading in UAV-enabled mobile edge computing networks with multiple service providers[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8753-8769.
- [23] HU X, WONG K K, YANG K, et al. UAV-assisted relaying and edge computing: Scheduling and trajectory optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(10): 4738-4752.
- [24] 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.
- [25] SCUTARI G, FACCHINEI F, LAMPARIELLO L. Parallel and distributed methods for constrained nonconvex optimization — Part I: Theory [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 65(8): 1929-1944.



XUE Jianbin, born in 1973, Ph.D, professor. His main research interests include mobile edge computing, wireless communication theory and technology.



TIAN Guiying, born in 1997. Her main research interests include unmanned aerial vehicles, energy harvesting, and long-range communications.