

无人机辅助移动边缘计算网络中轨迹设计和带宽分配策略

江雪¹, 赵亮²

(1. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003; 2. 杭州昊舜视讯科技有限公司, 浙江 杭州 310023)

摘要: 研究了在无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 辅助移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing) 网络中, 单个 UAV 可以作为移动基站接收网络中多个用户设备卸载的数据场景。由于需要满足 UAV 的机动性、系统的计算时延和通信时延等要求, 以最小化网络能耗为目标, 提出了联合优化 UAV 三维飞行轨迹和用户设备带宽分配的方法。对应的非凸不易求解的优化问题转换为两个子优化问题, 即在给定带宽的条件下 UAV 三维飞行轨迹优化的问题以及给定 UAV 三维飞行轨迹的条件下用户设备带宽分配策略的优化问题。仿真结果表明, 所提算法的能耗明显低于另外两种典型算法。更进一步, 本文为解决 UAV 辅助 MEC 网络中资源和能耗受限的问题提供了有力的理论依据。

关键词: 移动边缘计算; UAV; 轨迹优化; 带宽分配

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00329

Trajectory design and bandwidth allocation strategy in UAV-assisted MEC network

JIANG Xue¹, ZHAO Liang²

1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Hangzhou Haovision Technology Co., Ltd., Hangzhou 310023, China

Abstract: The unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted mobile edge computing (MEC) network, where the UAV can be used as a mobile base station to collect data from the multiple user devices was studied. Since it should satisfy the UAV velocity constraint, the system computation latency constraint, and the system communication latency constraint, a joint scheme of bandwidth allocation and UAV 3D trajectory was proposed to minimize the total energy consumption of the network. The corresponding non-convex optimization problem that is difficult to solve was converted into two sub-optimization problems, which are the UAV 3D trajectory optimization subproblem by fixing bandwidth allocation, and the user equipment bandwidth allocation subproblem by fixing UAV 3D trajectory. Experiments demonstrate that the energy consumption of the proposed algorithm is less than that of the other two typical algorithms. Furthermore, the theoretical basis for solving the limited resource and energy problem in UAV-assisted MEC network was provided.

Key words: mobile edge computing, UAV, trajectory optimization, bandwidth allocation

0 引言

物联网是新一代信息技术的重要组成部分,但

网络中用户设备的计算能力非常有限,随着物联网中用户设备数量的快速增长,在本地用户设备执行所有的计算任务会导致过高的时延和能耗,严重影

收稿日期: 2022-08-11; 修回日期: 2023-03-16

通信作者: 江雪, jiangx@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62001248); 杭州昊舜视讯科技有限公司合作项目-无人机辅助边缘计算网络资源优化技术研究 (No.HV-20210610B)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62001248), Hangzhou Haovision Technology Co., Ltd. Cooperation Project-Research on UAV Assisted Edge Computing Network Resource Optimization Technology (No.HV-20210610B)

响网络的性能^[1-2]。移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing)^[3]是一种提升用户计算性能的技术,可以在移动网络边缘提供信息技术和云计算服务,主要通过将小型计算机或存储中心的边缘服务器部署在靠近用户设备的地方,将本地用户设备的计算任务卸载至边缘服务器,降低中心核心网的负载和时延,改善整个网络的能耗和时延等性能。无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle)^[4]的可运动性为物联网中的用户设备带来了极大的便利,基于 UAV 辅助 MEC 网络的技术优势主要表现在两个方面:一方面可以明显改善网络的传播时延和路径损耗性能;另一方面是在应急场景或突发自然灾害的情况下,可以发挥重要的处理计算密集型任务的作用。

目前基于 UAV 辅助 MEC 网络的研究主要集中在吞吐量^[5-9]、UAV 的飞行时间^[10-11]、部署 UAV 的数量^[12]、可达速率^[13-14]、时延^[15-16]、能耗^[17-25]等性能指标。文献[5]以最大化用户设备上行链路的吞吐量为目标,考虑 UAV 最大飞行速度和用户设备能耗的限制条件,求解 UAV 的最优轨迹。文献[6]以最大化所有用户设备的总速率为目标,优化 UAV 的三维最优轨迹。文献[7]考虑 UAV 之间的防撞和通信干扰限制条件,通过联合优化 UAV 的功率分配和飞行轨迹最大化系统吞吐量。文献[8]在满足 UAV 最大飞行速度和加速度的约束条件下,求解 UAV 的最优飞行轨迹最大化系统吞吐量。文献[9]考虑能耗中断影响的约束条件,通过联合优化带宽分配、功率分配和飞行轨迹最大化系统吞吐量。文献[10]考虑能耗限制条件,最大化 UAV 的飞行服务时间优化其飞行轨迹。文献[11]在满足 UAV 最大飞行速度、最大加速度、碰撞避免和通信干扰的条件下,最小化 UAV 执行任务的时间。文献[12]通过最小化部署 UAV 的数量,优化给定时间内 UAV 的飞行轨迹和无线资源的分配策略。文献[13]通过对 UAV 的轨迹、用户设备调度和功率分配的联合优化,最大化用户设备之间的平均最小可达速率。文献[14]考虑联合优化信道分配、发射功率和飞行轨迹,在保证地面用户设备公平性的同时,最小化平均速率。文献[15]考虑能量限制条件,最小化所有移动用户设备的总时延,提出联合卸载任务和 UAV 飞行轨迹优化的问题。文献[16]对 UAV 的部署位置、地面用户设备与 UAV 之间的连接关系以及计算任务的卸

载比例进行联合优化,最小化系统内平均任务响应时延。

在 UAV 辅助 MEC 网络中,通过高机动性的 UAV 可以快速建立通信连接,因此可以显著提高数据传输速率,但是无论 UAV 还是用户设备,能量都非常有限,并且对 UAV 和用户设备频繁地充电或者更换电池一般很难实现,能量一旦耗尽,它们都无法收集和处理数据,因此 UAV 辅助 MEC 网络中,以能耗最小化为目标的研究在学术界的关注度比较高。文献[17]考虑地面用户设备和 UAV 的能耗不在一个数量级,通过加权的方式均衡地面用户设备和 UAV 的能耗,联合优化地面用户设备的资源分配策略以及 UAV 的飞行轨迹。文献[18]以最小化 UAV 总能耗为目标,在满足系统总时延、通信和计算资源的限制条件下,设计了一种最优的地面用户设备向 UAV 卸载任务的方案。文献[19]考虑以最小化 UAV 的飞行和计算能耗为目标,在满足所有用户设备服务质量和 UAV 可用计算资源的条件下,联合优化地面用户设备的任务卸载、资源分配以及 UAV 的飞行时间。文献[20]以最小化 UAV 和用户设备的总能量为目标,在满足通信和计算时延的限制条件下,优化用户设备的任务卸载策略、资源分配策略和 UAV 的飞行轨迹。文献[21]以最小化 UAV 总能耗为目标,在满足服务质量 (QoS, quality of service) 的条件下优化 UAV 飞行轨迹的总路径长度,设计 UAV 群的最优飞行轨迹。文献[22]将多架 UAV 作为移动基站,优化多个 UAV 的位置和用户设备的卸载决策使得系统总体能耗最小。文献[23]通过联合优化 UAV 的飞行轨迹、计算频率和计算任务卸载比例实现 UAV 总能耗最小化的目标。文献[24]联合优化用户设备本地任务的数据量、卸载任务的数据量以及 UAV 的轨迹,实现给定时间内用户设备能耗的最小化。文献[25]通过强化学习的方法优化 UAV 的轨迹和用户设备卸载的任务量,最小化系统总能耗。

在 UAV 辅助 MEC 网络中,除了上述以系统能耗最小化为目标的相关研究,还有大量研究将能耗和时延、计算比特量等性能相结合设计优化问题。文献[26]定义总数据比特量与系统总能耗的比值为能效,以系统能效最大化为目标,联合优化设计地面用户设备的计算、通信资源分配策略和 UAV 的飞行轨迹。文献[27]定义总计算比特量

与总能耗的比值为计算效率，以最大化计算效率为目标，优化 UAV 的飞行轨迹。文献[28]针对移动边缘计算中 UAV 群协同任务卸载问题，利用联盟形成博弈理论进行建模，以最小化系统通过程和计算过程的时延与能耗加权为目标，设计联盟效用函数和回报函数，优化通信受限情况下的任务卸载策略。

由以上研究可以看出，在 UAV 辅助 MEC 网络中，系统能耗主要分为 UAV 能耗和用户设备能耗。UAV 能耗主要由 3 个部分组成，分别为飞行能耗、接收卸载任务能耗和执行用户设备卸载任务的能耗。用户设备能耗主要由两个部分组成：卸载任务给 UAV 的能耗以及执行本地计算任务的能耗。在 UAV 辅助 MEC 网络中，以上研究直接^[17-25]或间接^[26-28]针对能耗性能进行了不同方面、不同层次的优化，但是它们大部分都是针对 UAV 飞行轨迹在固定高度的平面，用户设备也在同一平面研究 UAV 飞行轨迹、资源分配和任务卸载问题。而针对三维场景下的 UAV 飞行轨迹设计问题研究极少。而实际应用中，用户设备会处于不同的高度，相应的 UAV 飞行的高度也会随着用户设备位置的高度而变化。针对这个问题，本文主要研究在 MEC 网络中，考虑最小化 UAV 的飞行能耗和 UAV 接收卸载任务能耗，优化 UAV 的三维飞行轨迹和用户设备的带宽分配。

1 系统模型

本文主要研究 UAV 辅助 MEC 网络，网络模型如图 1 所示。网络中有一架 UAV 和 U 个用户设备， U 个用户设备处于不同的高度位置。

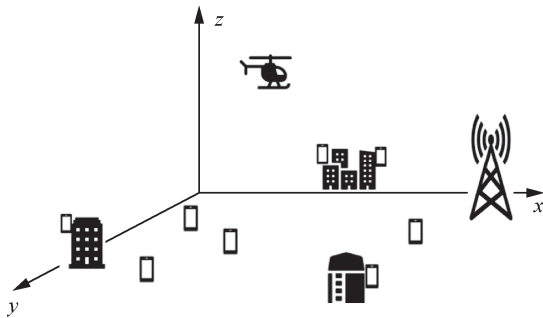


图 1 UAV 辅助 MEC 网络模型

1.1 网络模型

在 UAV 辅助 MEC 网络中， U 个用户设备依靠 UAV 为它们提供数据传输服务，在三维坐标系中，第 u 个用户设备的位置表示为

$$O_u = [x_u, y_u, z_u]^T, u = 1, \dots, U \quad (1)$$

同时，UAV 在时隙 t 的位置表示为

$$c(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T, 0 \leq t \leq M \quad (2)$$

其中，UAV 飞行的时间周期 T_f [s] 被分为 M 个等长时隙。

第 u 个用户设备与 UAV 之间的距离可以表示为

$$d_u(t) = \|c(t) - O_u\| \quad (3)$$

考虑 UAV 飞行一段时间后可以充电来确保可以为用户设备提供稳定服务。因此，假定 UAV 在飞行一段时间后可以回到最初的位置，即需要满足

$$c(1) = c(M) \quad (4)$$

UAV 在时隙 t 的飞行速度 $v(t)$ 和加速度 $\theta(t)$ 分别表示为

$$v(t) = \frac{\|c(t+1) - c(t)\|}{L} \quad (5)$$

$$\theta(t) = \frac{v(t+1) - v(t)}{\delta_t} \quad (6)$$

其中， $L = T_f / M$ 表示每个时隙的长度， δ_t 为固定时间步长。

同时，UAV 的飞行速度和加速度受最大飞行速度和最大飞行加速度的约束^[10,29]，即

$$v(t) \leq V_{\max} \quad (7)$$

$$\theta(t) \leq \theta_{\max} \quad (8)$$

其中， V_{\max} 和 θ_{\max} 分别表示 UAV 的飞行速度和加速度的上限值。

1.2 计算模型

定义在时隙 t 第 u 个用户设备计算 1 bit 数据需要的 CPU 运行周期为 β_u ，完成所有任务需要的时间为 $T_u(t)$ ，需要处理的数据总大小为 $a_u(t)$ ，需要完成的总任务记为 $\{\beta_u, a_u(t), T_u(t)\}$ 。由于受到每个用户设备的功率和计算能力限制，网络中所有用户设备的资源都不够执行所有的本地任务 $a_u(t)$ ，因此需要将部分数据卸载到 UAV 上处理^[5]，即把数据 $a_u(t)$ 分成两部分，一部分卸载到 UAV 上执行，任务量记为 $l_u(t)$ ，另一部分在本地用户设

备执行，任务量记为 $a_u(t) - l_u(t)$ 。在时隙 t ，UAV 执行第 u 个用户设备分配给其对应的任务 $l_u(t)$ 需要的时延记为

$$t_u^{\text{comp}}(t) = \frac{\beta_u l_u(t)}{f_u^c(t)} \quad (9)$$

其中， $f_u^c(t)$ 表示 UAV 在接收用户设备 u 卸载任务后的最大计算能力。

1.3 信道模型

假设 U 个用户设备与 UAV 之间的信道为强视距 (LoS, line of sight) 信道^[20]，当 UAV 与用户设备之间的距离满足一定约束条件时，信道会由于散射而出现小幅度衰落，在快衰落信道模型中，信道系数可以表示为

$$h_u(t) = \sqrt{\zeta_u(t) \rho_u(t)} \quad (10)$$

其中， $\zeta_u(t)$ 表示平均信道增益， $\rho_u(t)$ 表示小尺度信道衰落系数。

定义 ζ_0 表示发送端和接收端距离为 1 m 时对应的平均信道功率，平均信道功率增益 $\zeta_u(t)$ 可以表示为

$$\zeta_u(t) = \zeta_0 (d_u(t))^{-\theta} = \frac{\zeta_0}{(\|c(t) - O_u\|^2)^{\theta/2}} \quad (11)$$

其中， θ 表示路径衰减系数。

本文考虑莱斯衰落信道模型，此时 $\rho_u(t)$ 可以表示为

$$\rho_u(t) = \sqrt{\frac{K_u(n)}{K_u(n)+1}} \rho + \sqrt{\frac{1}{K_u(n)+1}} \hat{\rho} \quad (12)$$

其中， ρ 表示视距分量，并且满足 $|\rho| = 1$ 。 $K_u(n)$ 表示 UAV 到用户设备之间信道的莱斯因子。散射分量 $\hat{\rho}$ 是高斯随机变量。

定义 B 表示系统总带宽， $p_u(t)$ 表示用户设备的发送功率。在每个飞行时隙内，给用户设备分配的带宽根据实际的需求动态调整，定义 $a_u(t)$ 表示在时隙 t 给第 u 个用户设备分配的带宽所占比例。此时，第 u 个用户设备的瞬时信道容量^[20]为

$$C_u(t) = \alpha_u(t) B \log \left(1 + \frac{p_u(t) |h_u(t)|^2}{\sigma^2} \right) \quad (13)$$

其中， σ^2 表示加性白高斯噪声功率。

根据式(13)，可以得出在时隙 t ，UAV 与第 u 个用户设备的中断概率为

$$P_u^{\text{out}}(t) = P(C_u(t) < R_u(t)) = F \left(\frac{\sigma^2 (2^{R_u(t)/(\alpha_u(t)B)} - 1)}{\zeta_u(t) p_u(t)} \right) \quad (14)$$

其中， $F(\cdot)$ 表示随机变量 $|\rho_u(t)|^2$ 的累积分布函数。

定义 ε 表示最大中断概率，给定中断概率 $P_u^{\text{out}}(t) = \varepsilon$ ，可得在时隙 t 第 u 个用户设备的可达数据率为

$$R_u(t) = \alpha_u(t) B \log \left(1 + \frac{F^{-1}(\varepsilon) p_u(t) \zeta_0}{\sigma^2 (\|c(t) - O_u\|^2)^{\theta/2}} \right) \quad (15)$$

其中， $F^{-1}(\cdot)$ 表示互补累积分布函数，是 $F(\cdot)$ 函数的逆函数。

可以得出，在时隙 t 第 u 个用户设备卸载任务 $l_u(t)$ 给 UAV 需要的上行传输时延为

$$t_u^{\text{up}}(t) = \frac{l_u(t)}{R_u(t)} \quad (16)$$

2 问题建模

在 UAV 辅助 MEC 网络中，系统中的总能耗主要由 UAV 能耗和用户设备能耗两部分组成，UAV 能耗和用户设备能耗相差好几个数量级，因此本文主要研究 UAV 能耗。由于 UAV 接收卸载任务能耗和飞行能耗占比最大，所以本文的研究工作主要集中在这两方面。

1) 接收卸载任务能耗

在时隙 t ，由于用户设备 u 的功率和计算能力有限，它会将部分任务 $l_u(t)$ 卸载给 UAV 处理，UAV 接收卸载任务 $l_u(t)$ 需要消耗的能耗可以表示为^[20]

$$E_u^{\text{up}}(t) = \frac{p_u(t) l_u(t)}{R_u(t)} \quad (17)$$

2) 飞行能耗

由于 UAV 需要悬停或飞行来接收不同位置用户设备的卸载任务，由此会产生飞行能耗，飞行能耗主要与 UAV 的质量和飞行距离有关，可以表示为^[20]

$$E^{\text{fly}}(t) = k \left(\frac{\|c(t+1) - c(t)\|}{M} \right) \quad (18)$$

其中, $k = 0.5\Psi$, Ψ 是 UAV 的有效载荷。

本文主要在满足网络中的用户设备和 UAV 的通信和计算等资源的限制条件下, 以最小化系统的总能耗为目标, 联合优化 UAV 三维飞行轨迹和用户设备带宽分配的优化方法。根据上述分析, 建立优化问题如下

$$\text{P1: } \min_{c(t), \alpha_u(t)} \sum_{t=1}^M \sum_{u=1}^U E_u^{\text{up}}(t) + \sum_{t=1}^M E^{\text{fly}}(t) \quad (19)$$

$$\text{C1: } t_u^{\text{up}}(t) + t_u^{\text{comp}}(t) \leq T_u(t) \quad (19a)$$

$$\text{C2: } \sum_{u=1}^U \alpha_u(t) \leq 1, \quad 0 \leq \alpha_u(t) \leq 1 \quad (19b)$$

$$\text{C3: } v(t) \leq V_{\max} \quad (19c)$$

$$\text{C4: } c(1) = c(M) \quad (19d)$$

$$\text{C5: } \theta(t) \leq \theta_{\max} \quad (19e)$$

其中, $t=1, \dots, M$, $u=1, \dots, U$ 。优化问题 P1 中 C1 表示用户设备卸载任务给 UAV 的时间和 UAV 完成卸载任务的总时间需要满足的时延约束条件, C2 表示每个时隙分配给所有用户设备的带宽约束条件, C3 表示 UAV 最大飞行速度的约束条件, C4 表示 UAV 飞行一段时间后需要回到原地充电的约束条件, C5 表示 UAV 的最大飞行加速度的约束条件。

3 优化问题求解

优化问题 P1 为非凸优化问题, 本文通过交替迭代优化方法^[20]分别求解 UAV 轨迹变量 $c(t)$ 和用户设备的带宽分配比例 $\alpha_u(t)$ 。首先, 给定 $\alpha_u(t)$, 求解最优的 $c(t)$ 。然后, 将 $c(t)$ 代入优化问题 P1, 求解 $\alpha_u(t)$, 不断交替迭代求解, 直到目标函数收敛。即是将原优化问题 P1 转化为两个子问题求解: 在给定带宽的条件下 UAV 三维飞行轨迹的优化问题以及给定 UAV 三维飞行轨迹的条件下用户设备带宽分配策略的优化问题。

3.1 UAV 三维飞行轨迹优化问题

UAV 的三维飞行轨迹优化问题对应求解变量 $c(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$, UAV 三维飞行轨迹的优化问题对应约束条件为式(19)中的 C1、C3、C4 和 C5。将给定 $\alpha_u(t)$ 的值代入优化问题 P1, 目标函数可以转化为

P2:

$$\sum_{t=1}^M \sum_{u=1}^U \frac{p_u(t)l_u(t)}{\alpha_u(t)B \text{lb} \left(1 + \frac{F^{-1}(\varepsilon)p_u(t)\zeta_0}{\sigma^2 (\|c(t) - o_u\|^2)^{\theta/2}} \right)} + \quad (20)$$

$$\sum_{t=1}^M k \left(\frac{\|c(t+1) - c(t)\|}{L} \right)$$

同时, 将约束条件 C1 转换为

$$\|c(t) - o_u\|^2 \leq \sqrt{\frac{F^{-1}(\varepsilon)p_u(t)\zeta_0}{2 \left(\frac{1}{T_u(t)} \frac{1}{f_u^c(t)} \frac{1}{\alpha_u(t)B} - 1 \right)}} \cdot \frac{1}{\sigma^2} \quad (21)$$

结合约束条件 C3、C4 和 C5, 可以看出, 求解 UAV 三维飞行轨迹最优解即是需要求解第 1 个到第 $M-1$ 个时隙 UAV 的三维坐标位置。显然, UAV 在时隙 $t+1$ 的位置 $c(t+1)$ 仅与前一个时隙 t 的位置 $c(t)$ 有关, 因此, 可以将求解 UAV 最优轨迹的优化问题分解为 $M-1$ 个子优化问题求解, 按照 $c(1)$ 、 $c(2)$ 、 \dots 、 $c(M-1)$ 的顺序逐个求解, 对应需要求解的子优化问题为

$$\begin{aligned} \min_{c(t)} & \frac{p_u(t)l_u(t)}{\alpha_u(t)B \text{lb} \left(1 + \frac{F^{-1}(\varepsilon)p_u(t)\zeta_0}{\sigma^2 (\|c(t) - o_u\|^2)^{\theta/2}} \right)} + k \left(\frac{\|c(t) - c(t-1)\|}{L} \right) \\ \text{s.t. } & \|c(t) - o_u\|^2 \leq \sqrt{\frac{F^{-1}(\varepsilon)p_u(t)\zeta_0}{2 \left(\frac{1}{T_u(t)} \frac{1}{f_u^c(t)} \frac{1}{\alpha_u(t)B} - 1 \right)}} \cdot \frac{1}{\sigma^2} \\ & \frac{\|c(t) - c(t-1)\|}{L} \leq V \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $t=1, \dots, M-1$, $c(0) = c(M) = [0 \ 0 \ 0]$ 。可以看出,

在已知 o_u 的条件下, $\text{lb} \left(1 + \frac{F^{-1}(\varepsilon)p_u(t)\zeta_0}{\sigma^2 (\|c(t) - o_u\|^2)^{\theta/2}} \right)$

是关于 $(\|c(t) - o_u\|^2)^{\theta/2}$ 的凸函数。在已知 $c(t-1)$ 的条件下, $k \left(\frac{\|c(t) - c(t-1)\|}{L} \right)$ 是关于 $c(t)$ 的凸函数。因此,

对应优化问题可通过凸优化工具 CVX 求解。

3.2 用户设备带宽分配策略优化问题

在时隙 t 分配给用户设备 u 的带宽 $\alpha_u(t)$ 的优化问题, 对应的约束条件为优化问题 P1 中的 C1、C2。当 UAV 三维飞行轨迹 $c(t)$ 给定后, 优化问题 P1 的

目标函数可以转化为

P3:

$$\min_{\alpha_u(t)} \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^U \frac{p_u(t)l_u(t)}{\text{Blb} \left(1 + \frac{F^{-1}(t)p_u(t)\zeta_0}{\sigma^2(H^2 + \|c(t) - o_u\|^2)^{0/2}} \right)} \cdot \frac{1}{\alpha_u(t)} \quad (23)$$

同时, 变换优化问题 P1 中的 C1 可得

$$\alpha_u(t) \geq D \quad (24)$$

其中, $D = \frac{1}{\frac{T_u(t)}{l_u(t)} - \frac{\beta_u}{f_u^c(t)}} \cdot \frac{1}{\text{Blb} \left(1 + \frac{F^{-1}(\varepsilon)p_u(t)\zeta_0}{\sigma^2(H^2 + \|c(t) - o_u\|^2)^{0/2}} \right)}$

结合优化问题 P1 中的 C2 和式(24), 可得关于求解最优 $\alpha_u(t)$ 的约束条件为

$$\sum_{u=1}^U \alpha_u(t) \leq 1 \quad (25)$$

$$D \leq \alpha_u(t) \leq 1 \quad (26)$$

可以看出, 优化问题 P3 中目标函数 $1/\alpha_u(t)$ 是关于 $\alpha_u(t)$ 的凸函数, 对应优化问题可以通过凸优化工具 CVX 求解。

3.3 交替优化算法设计

由于联合 UAV 三维飞行轨迹和用户设备带宽分配的优化问题 P1 非凸, 很难找到全局最优解, 本文将优化问题 P1 转化为两个子优化问题 P2 和 P3, 进而求得优化问题 P1 的一个近似次优解。首先, 给定任意带宽分配比例 $\alpha_u(t)$, 通过式(22)可以求得最优 UAV 飞行轨迹 $c(1)$ 、 $c(2)$ 、 \dots 、 $c(M-1)$; 然后, 将求得的 $c(1)$ 、 $c(2)$ 、 \dots 、 $c(M-1)$ 代入优化问题 P3, 继而求得带宽分配比例 $\alpha_u(t)$ 的最优解; 最后, 通过不断交替迭代求解, 直至目标函数收敛。联合优化 UAV 轨迹和带宽分配的优化算法见算法 1。

算法 1 联合优化 UAV 轨迹和带宽分配的优化算法

初始化 $l_u(t)$ 、 $p_u(t)$ 、 $\alpha_u(t)$ 、迭代步数 $k=1$ 、收敛精度 ε_1

repeat

给定 $\{\alpha_u(t)\}^k$, 求解优化问题 P2, 得到最优解 $\{c(t)\}^{k+1}, \{c(t)\}^{k+1}, \dots, \{c(M-1)\}^{k+1}$

给定 $\{c(1), c(2), \dots, c(M-1)\}^{k+1}$, 求解优化问题 P3, 得到最优解 $\{\alpha_u(t)\}^{k+1}$

$$k = k + 1, \{\alpha_u(t)\}^{k+1} = \{\alpha_u(t)\}^k$$

$$\text{until} \left\| \frac{\Omega_k - \Omega_{k+1}}{\Omega_k} \right\| \leq \varepsilon_1 \text{ 或 } k \geq k_{\max}$$

输出 $c(1), c(2), \dots, c(M-1)$ 和 $\alpha_u(t)$

其中, 能耗参数 $\Omega = \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^U E_u^{\text{up}}(t) + \sum_{t=1}^T E^{\text{fly}}(t)$ 。

4 仿真结果与分析

本文考虑一架 UAV 与 U 个用户设备的 UAV 辅助 MEC 网络, 其中 U 个用户设备在 $D \times D \times D$ 的空间内随机分布, UAV 的起始位置为 $(0, 0, 0)$, 飞行一个时间周期 T_f 后回到起点 $(0, 0, 0)$ 。根据文献[20]中典型的设置, 本文仿真参数见表 1, 使用 MATLAB 中 CVX 工具对所提算法进行仿真实验。

表 1 仿真参数

参数	符号	设定值
执行任务周期	T_f	48 s
区域范围	D	80 m
带宽	B	30 MHz
UAV 的有效载荷	M	6 kg
UAV 的最大飞行速度	V_{\max}	20 m/s
UAV 的最大加速度	θ_{\max}	5 m/s ²
固定时间步长	δ_t	1
UAV 的最大计算能力	f_u^c	1 GHz
计算 1bit 输入数据需要的 CPU 周期	β_u	[5,25]
高斯白噪声功率	σ^2	-174 dBm/Hz
平均信道功率增益 (距离为 1 m)	ζ_0	-60 dB
完成所有任务需要的时间	$T_u(t)$	[5,20] s
用户设备的最大发送功率	$p_u^{\max}(t)$	100 mW
用户设备的最大数据量	$a_u(t)$	$[0.4,1] \times 10^5$ bit
路径衰减系数	θ	2

4.1 三维飞行轨迹分析

不同最大飞行速度下的 UAV 三维飞行轨迹及平面图如图 2 所示, 在用户设备位置相同的情况下, 对比不同最大飞行速度约束条件下的最优轨迹, 可以看出, 最大飞行速度的约束值越大, UAV 单步飞行的距离越远, UAV 与用户设备之间的距离也就越近。

不同数量用户设备的 UAV 三维飞行轨迹及平面图如图 3 所示, 可以看出, 用户设备的数量越多, 其对应的地理位置越分散的情况下, UAV 需要飞行更大的区域范围来接收用户设备的卸载任务。

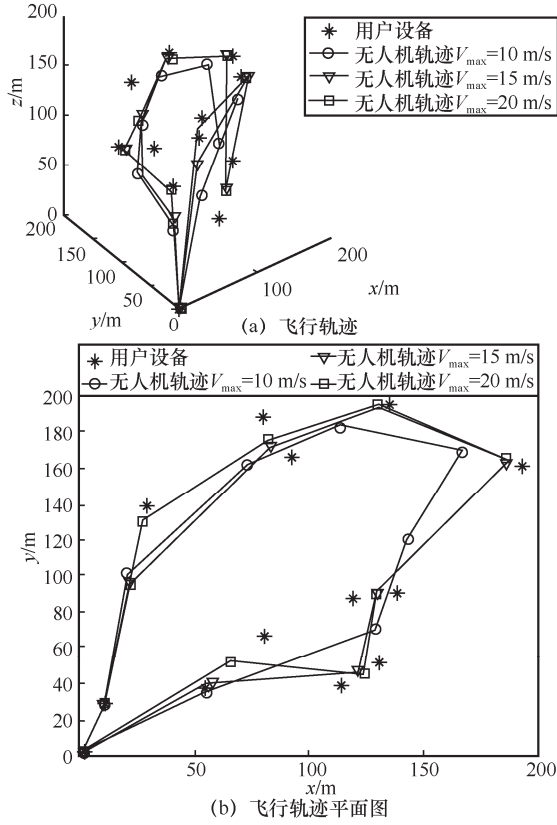


图 2 不同最大飞行速度下的 UAV 三维飞行轨迹及平面图

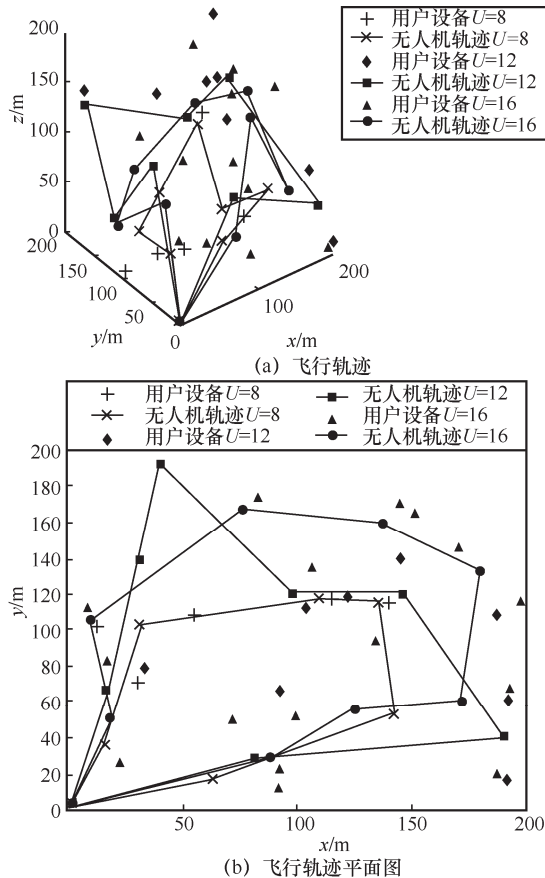


图 3 不同数量用户设备的 UAV 三维飞行轨迹及平面图

不同飞行时隙的 UAV 三维飞行轨迹及平面图如图 4 所示,可以看出,UAV 飞行的时隙数量越大,UAV 的飞行轨迹越接近所有的用户设备的位置。

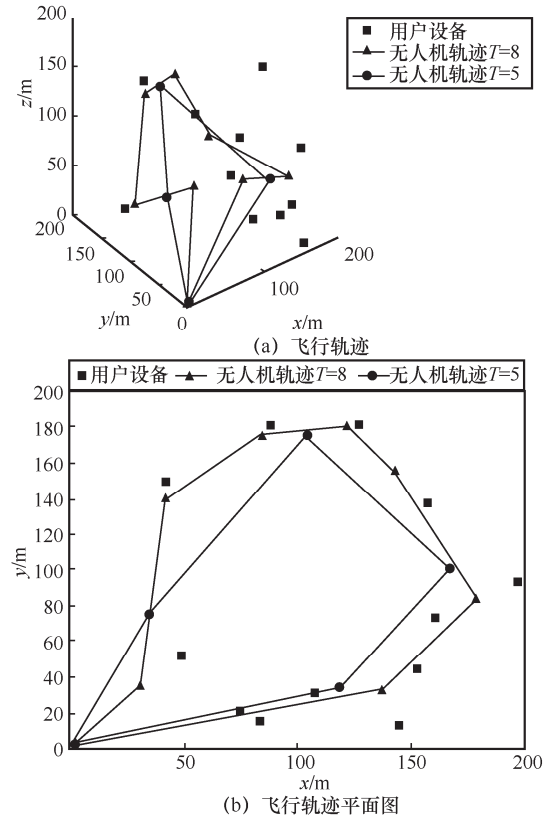


图 4 不同飞行时隙的 UAV 三维飞行轨迹及平面图

4.2 能耗分析

为了验证所提算法能耗性能的优越性,本节将所提算法与另外两种带宽分配算法相比较,方案 1 是给每个用户设备平均分配固定带宽,即 $\alpha_u(t)=1/U$,方案 2 是在满足优化问题 P1 的约束条件 C2 的条件下,每个用户设备随机分配带宽。

不同数量用户设备与总能耗的关系如图 5 所示,可以看出,所提算法能耗最低,带宽平均分配算法的能耗最大,带宽随机分配算法能耗居中。

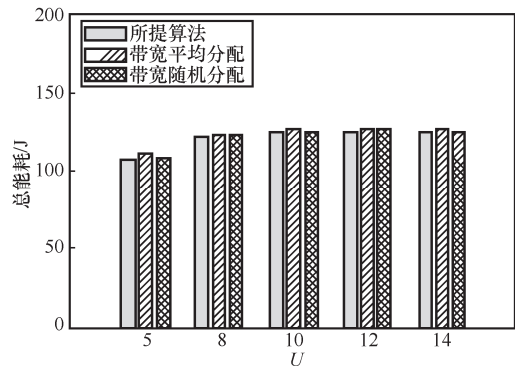


图 5 不同数量用户设备与总能耗的关系

不同最大飞行速度与总能耗的关系如图 6 所示,可以看出,所提算法能耗最低,带宽平均分配算法能耗最大,带宽随机分配算法能耗居中。在用户设备数量相同的条件下,系统总能耗随着 UAV 飞行最大速度约束值的增加而增加,这是由于随着 UAV 飞行速度最大值的增加, UAV 单步飞行距离在增大,总飞行路程在变长,会增加其飞行能耗。

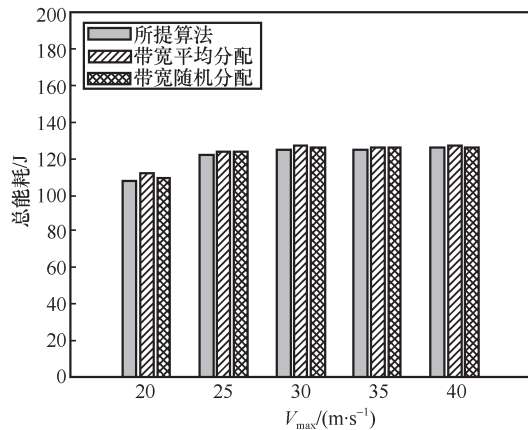


图 6 不同最大飞行速度与总能耗的关系

5 结束语

针对当前 UAV 辅助 MEC 网络应用场景的局限性,本文主要研究在满足时延和 UAV 飞行速度的约束条件下,以最小化 UAV 总能耗为目标,设计优化 UAV 三维飞行轨迹和用户设备带宽分配方案。仿真结果验证了所提算法在不同参数设置下均能获得较好的三维飞行轨迹最优解和最低能耗。下一步研究将在本文的基础上研究网络中多架 UAV 协同的场景,考虑多架 UAV 之间避免碰撞等更复杂情况下,进一步优化 UAV 的飞行轨迹。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张开元, 桂小林, 任德旺, 等. 移动边缘网络中计算迁移与内容缓存研究综述[J]. *软件学报*, 2019, 30(8): 2491-2516.
ZHANG K Y, GUI X L, REN D W, et al. Survey on computation offloading and content caching in mobile edge networks[J]. *Journal of Software*, 2019, 30(8): 2491-2516.
- [3] SHI W S, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646.
- [4] LI P M, XU J. Fundamental rate limits of UAV-enabled multiple access channel with trajectory optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(1): 458-474.
- [5] XIE L F, XU J, ZHANG R. Throughput maximization for UAV-enabled wireless powered communication networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 1690-1703.
- [6] 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.
- [7] LIU X, LAI B J, LIN B, et al. Joint communication and trajectory optimization for multi-UAV enabled mobile Internet of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 15354-15366.
- [8] 冯建新, 栾帅帅, 刘俊梅, 等. 一种高吞吐量的 UAV 轨迹规划方法[J]. *计算机工程*, 2021, 47(1): 172-181.
FENG J X, LUAN S S, LIU J M, et al. An unmanned aerial vehicle trajectory planning method with high throughput[J]. *Computer Engineering*, 2021, 47(1): 172-181.
- [9] 罗佳, 陈前斌, 唐伦, 等. 考虑能耗中断的 UAV 通信中基于深度强化学习的资源管理[J]. *电子与信息学报*, 2022(45):1-8.
LUO J, CHEN Q B, TANG L, et al. Deep reinforcement learning based resource management for UAV communication considering power-consumption outage[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022(45): 1-8.
- [10] LEE J H, PARK K H, KO Y C, et al. A UAV-mounted free space optical communication: trajectory optimization for flight time[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(3): 1610-1621.
- [11] XU S, ZHANG X Y, LI C G, et al. Deep reinforcement learning approach for joint trajectory design in multi-UAV IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3): 3389-3394.
- [12] SAMIR M, SHARAFEDDINE S, ASSI C, et al. Trajectory planning and resource allocation of multiple UAVs for data delivery in vehicular networks[J]. *IEEE Networking Letters*, 2019, 1(3): 107-110.
- [13] 周理辉, 肖霖, 吴法辉, 等. UAV 全双工双向中继的资源及轨迹优化设计[J]. *北京邮电大学学报*, 2023, 46(1): 77-83.
ZHOU L H, XIAO L, WU F H, et al. Resource and trajectory optimal design for unmanned aerial vehicles full duplex two-way relay[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2023, 46(1): 77-83.
- [14] 廖乃稳, 何攀峰, 张余, 等. UAV 中继通信的轨迹与资源分配优化方法[J]. *移动通信*, 2023, 47(2): 92-98.
LIAO N W, HE P F, ZHANG Y, et al. Trajectory and resource allocation optimization method for UAV-relaying communication[J]. *Mobile Communications*, 2023, 47(2): 92-98.
- [15] 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*, 2019, 6(2): 1879-1892.
- [16] 郑鸿强, 张建山, 陈星. 空-天-地一体化移动边缘计算系统的部署优化和计算卸载[J]. *计算机科学*, 2023, 50(2): 69-79.
ZHENG H Q, ZHANG J S, CHEN X. Deployment optimization and computing offloading of space-air-ground integrated mobile edge computing system[J]. *Computer Science*, 2023, 50(2): 69-79.
- [17] 李安, 戴龙斌, 余礼芬, 等. 加权能耗最小化的 UAV 辅助移动边缘计算资源分配策略[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(11): 3858-3865.
LI A, DAI L B, YU L S, et al. Resource allocation for unmanned aerial vehicle-assisted mobile edge computing to minimize weighted energy

- consumption[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3858-3865.
- [18] 崔高峰, 徐媛媛, 张尚宏, 等. 基于最小能耗的多 UAV 无线网络安全数据卸载策略[J]. 通信学报, 2021, 42(5): 51-62.
CUI G F, XU Y Y, ZHANG S H, et al. Secure data offloading strategy for multi-UAV wireless networks based on minimum energy consumption[J]. Journal on Communications, 2021, 42(5): 51-62.
- [19] DU Y, WANG K Z, YANG K, et al. Energy-efficient resource allocation in UAV based MEC system for IoT devices[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [20] TUN Y K, PARK Y M, TRAN N H, et al. Energy-efficient resource management in UAV-assisted mobile edge computing[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(1): 249-253.
- [21] ZHAO C X, LIU J Y, SHENG M, et al. Multi-UAV trajectory planning for energy-efficient content coverage: a decentralized learning-based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 3193-3207.
- [22] 陈阳, 皮德常, 代成龙, 等. 多 UAV 协同陆地设施辅助移动边缘计算的系统能耗最小化方法[J]. 电子学报, 2023, 51(2): 1-9.
CHEN Y, PI D C, DAI C L, et al. Energy minimization for a multi-UAVs cooperative ground access points assisted mobile edge computing[J]. ACTA Electronica Sinica, 2023, 51(2): 1-9.
- [23] 夏景明, 刘玉凤, 谈玲. 基于蜂窝网络的多 UAV 能耗最优化算法研究[J]. 通信学报, 2023, 44(2): 1-13.
XIA J M, LIU Y F, TAN L. Research on energy consumption optimization algorithm of multi-UAV based on cellular network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(2): 1-13.
- [24] 余雪勇, 朱焯, 邱礼翔, 等. 基于 UAV 辅助边缘计算系统的节能卸载策略[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 1022-1029.
YU X Y, ZHU Y, QIU L X, et al. Energy efficient offloading strategy for UAV aided edge computing systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 1022-1029.
- [25] WANG L, WANG K Z, PANC H, et al. Multi-agent deep reinforcement learning-based trajectory planning for multi-UAV assisted mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(1): 73-84.
- [26] 吴启晖, 吴伟. UAV 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 Q H, WU W. Algorithm design on energy efficiency maximization for UAV-assisted edge computing[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 15-24.
- [27] 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, 2020, 69(2): 2114-2125.
- [28] 姚维, 黄俊. 移动边缘计算中的 UAV 群协同任务卸载策略研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(3): 507-514.
YAO W, HUANG J. Research on UAVs collaborative task offloading strategy based on mobile edge computing[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022, 34(3): 507-514.
- [29] 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.

[作者简介]



江雪 (1982-), 女, 博士, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为干扰对齐、拓扑干扰管理, UAV 辅助边缘计算网络资源优化等。



赵亮 (1971-), 男, 杭州昊舜视讯科技有限公司技术总监, 主要研究方向为视频算法。