

基于李雅普诺夫的RIS辅助无人机边缘计算网络中 任务卸载与资源分配研究

邝祝芳¹, 郭宇敬¹, 邓晓衡²

(1. 中南林业科技大学计算机与数学学院, 湖南长沙 410004; 2. 中南大学电子信息学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 针对无人机 (UAV) 面对复杂时变的衰落信道对无线传输造成不利影响这一问题, 构建了可重构智能表面 (RIS) 辅助 UAV 边缘计算网络中 UAV 轨迹、RIS 相移、卸载时隙分配、CPU 频率分配和用户设备 (UE) 传输功率的联合优化问题。为了求解构建的问题, 对 UE 和 UAV 的任务队列稳定性约束进行转化, 将多时隙随机性优化问题转化为每个时隙的确定性优化问题, 提出了基于李雅普诺夫优化和块坐标下降 (BCD) 法的任务卸载与资源分配 (JORL) 方法。首先基于三角不等式求解 RIS 相移并求得闭合表达式; 然后使用非凸转凸问题的技术求解卸载时隙分配、CPU 频率分配和 UE 传输功率; 最后基于连续凸近似方法求解 UAV 轨迹。仿真结果表明, JORL 在保证任务队列稳定性和降低能耗方面有较优越的性能。

关键词: 无人机; 边缘计算; 可重构智能表面; 任务队列; 李雅普诺夫优化

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024155

Research on task offloading and resource allocation in edge computing network of RIS assisted UAV based on Lyapunov

KUANG Zhufang¹, GUO Yujing¹, DENG Xiaoheng²

1. School of Computer and Mathematics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2. School of Electronic Information, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: To address the problem that unmanned aerial vehicle (UAV) face complex time-varying fading channels, which could affect wireless transmission, a joint optimization problem of UAV's trajectory, reconfigurable intelligent surface (RIS) phase shift, offloading slot allocation, CPU frequency allocation, and user equipment transmission power was constructed. In order to solve the constructed problem, the stability constraints of UE and UAV task queues were transformed, and the multi-timeslot stochastic optimization problem was transformed into a deterministic optimization problem for each time slot. A JORL optimization method based on Lyapunov optimization and block coordinate descent (BCD) method was proposed. Firstly, the phase shift of RIS was solved based on the triangle inequality and the closure expression was obtained. Then the technology of transforming the non-convex into the convex problem was used to solve the offloading slot allocation, CPU frequency allocation and user equipment transmission power. Finally, the trajectory of UAV was solved based on successive convex approximation (SCA) method. Simulation results show that JORL has better performance in ensuring queue stability and reducing energy consumption.

Keywords: unmanned aerial vehicle, edge computing, reconfigurable intelligent surface, task queue, Lyapunov optimization

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-07-01

通信作者: 邝祝芳, zfkuan@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62072477); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2023YFD2201703); 湖南省自然科学基金资助项目 (No.2024JJ5648); 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目 (No.22C0132)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62072477), The National Key Research and Development Program of China (No.2023YFD2201703), The Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (No.2024JJ5648), The Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (No.22C0132)

0 引言

随着智能化时代的到来,在超5G(B5G)或6G中,增强现实、3D游戏、智能工厂^[1]等具有密集和复杂计算能力的高度智能应用获得了巨大发展。这对计算能力受限的用户设备(UE, user equipment)带来了重大挑战。在此背景下,边缘计算(EC, edge computing)通过将计算资源和缓存资源部署在靠近用户设备的网络边缘,使UE能够通过任务卸载极大地减轻计算压力,从而获得高可靠性和低时延的结果^[2-5]。同时,无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)因其部署灵活、机动性强、视距通信等特殊优势,在EC网络中得到了广泛的应用^[6]。例如,文献[7]利用UAV的悬停和机动能力为网络中的UE提供任务卸载服务。尽管UAV-EC相比于传统的EC更具优势,但仍然面临着任务卸载与资源分配等诸多挑战。因此,很多研究构建了不同的优化问题致力于解决上述挑战。

当UE产生大规模数据时,给UAV-EC网络带来了巨大的能耗负担,严重影响了网络的服务质量。因此,降低UAV-EC网络的能耗已经得到广泛研究。文献[8]研究了由高空平台(HAP, high altitude platform)和UAV支持的EC系统中的任务卸载和资源分配问题,通过凸优化和博弈论求解该问题,最大限度地降低了地面用户的能耗。文献[9]研究了多天线UAV辅助EC网络中鲁棒、安全的任务传输和计算方案,通过联合优化CPU频率、卸载时间、波束成形矢量、UAV轨迹和CPU频率最小化系统能耗。文献[10]研究了在不同任务之间存在依赖性的前提下UAV-EC网络能耗最小问题。

同时,UE的任务大多是时延敏感的,减少UAV-EC网络的时延也可以为UE提供更好的服务。文献[11]研究了一种无线充电的EC框架,该框架由UAV和中心云进行协作,在可控能耗的情况下最小化UE的等待时延。文献[12]提出了太赫兹(THz, Terahertz)波段UAV辅助计算卸载架构,通过优化无人机部署、资源分配和任务卸载最小化系统时延。文献[13]考虑了EC排队时延,通过联合优化用户关联和UAV部署来最小化系统平均任务时延。

近年来,一些研究逐渐开始关注UAV-EC网络的效用。如文献[14]研究了一个多UAV的EC

网络,目标是通过联合优化任务卸载和EC服务器选择决策、传输功率、UAV轨迹和CPU频率分配,使基于能量和时延的成本函数最小化。文献[15]研究了一种存在窃听者的UAV-EC网络,通过优化计算通信资源分配提高卸载的能效。文献[16]设计了一种多领导者多跟随者的Stackelberg博弈,以最小化网络成本为目标,共同优化任务卸载和UAV部署问题。文献[17]提出了一种节能UAV-EC网络和GreenUAV-CoCaCo算法,共同优化通信、缓存和计算资源分配,实现UAV能效最大化。

如果只考虑UAV辅助EC网络难以充分发挥整体网络的潜能,空地协同的UAV-EC网络也是研究的重点。如文献[18]研究了空地集成无线网络中的EC,目标是通过联合优化用户的关联、上行链路功率控制、信道分配、计算容量分配和无人机3D布局,最大限度地减少UE的总能耗。文献[19]通过联合优化卸载时隙分配、资源分配和无人机3D轨迹来研究空中和地面的能耗最小化问题。文献[20]研究了一种多UAV多地面BS的空地协同EC网络。文献[21]研究了无人机移动边缘计算中任务卸载、任务调度、传输功率、计算资源分配以及无人机部署位置的联合优化问题,考虑并强调了不同任务的执行顺序和传输顺序。尽管上述工作对UAV-EC网络在各种应用中做了深入的研究,但大部分工作只考虑了UAV与UE在具有完美视距链路的无线环境中工作。而在大多数情况下,UAV的高机动性使得UAV与UE之间可能被建筑物等地面障碍物阻碍,从而导致恶劣的无线传输环境。针对这一问题,可重构智能表面(RIS, reconfigurable intelligent surface)可以很好地改善各种无线网络中的传输环境^[22]。例如,在自然灾害或其他紧急情况下,传统的通信基础设施可能会遭到破坏,这时UAV和RIS可以快速部署到受灾区域,建立起临时的通信桥梁,保证关键通信的畅通,如救援队伍之间的协调通信、向外界传递灾情信息等。又或者是在智慧城市建设中,可以部署无人机和RIS,其中无人机可以执行城市监控、交通管理等任务,RIS可以提高无人机在城市环境中的信号覆盖能力,尤其是在高楼大厦密集的区域,确保视频监控数据的实时传输和处理,提升城市管理的效率和安全水平。因此,如何将

RIS 与 UAV-EC 网络相结合是新兴的研究热点。文献[23]提出了一种智能反射面赋能的无人机边缘计算部分任务卸载方案。文献[24]研究了系统中 RIS 相移、无人机轨迹和功率分配的联合优化问题,旨在最大限度地提高能源效率,并提出了一种基于凸优化和深度强化学习的迭代方法框架。文献[25]研究了采用非正交多址方案下的 RIS 辅助 UAV-EC 网络的任务卸载与资源分配问题。文献[26]提出了一种新的 EC 框架,该框架中 UAV 充当移动中继作用,为了充分发挥 UAV 与 RIS 联合设计带来的计算潜力,通过优化上行信号检测、UAV 主动波束形成、RIS 相移、时隙划分、UAV 计算比特数、UAV 轨迹等,制定了最大最小计算能力问题。本文与文献[26]的主要区别如下。1) 本文中的 UAV 既充当移动中继又充当移动边缘服务器,充分发挥了 UAV 的优势。2) 本文解决的是最小系统能耗问题,同时考虑了 UE 任务产生的实时性、随机性以及任务的积压问题,涉及任务的计算和计算资源的分配,而文献[26]解决的是最大系统吞吐量问题,不涉及任务的计算。因此,本文所构建的模型和问题更符合实际应用场景。

在实际应用场景中,大量的计算密集型任务是在每个时隙内随机产生的,往往在一个时隙内难以计算全部的任务,因此如何保持网络中任务队列的长期稳定是一个新的挑战。文献[27]首次研究了一种具有随机计算任务的 UAV 辅助 EC 系统中任务队列长期稳定性问题。文献[28]研究了一个具有 UAV 的 EC 系统,该系统为随机移动和随机任务到达的多个移动地面用户提供服务,并提出了在 UAV 平均能耗和任务队列稳定性约束下最小化所有用户的平均加权能耗优化问题。

然而上述研究没有同时考虑 RIS 辅助 UAV-EC 网络中空地协同和任务队列稳定的问题,为此,本文提出了一种 RIS 辅助 UAV-EC 网络中的空地协同方案。本文考虑城市场景,其中附近的 BS 损坏或过载。因此,UE 的卸载信号很难通过直接链路或绕过高密度障碍物到达远程 BS,需要 UAV 充当移动边缘服务器以及 UE 和远程 BS 之间的移动中继,将来自 UE 的任务转发至远程 BS。在 UAV 转发过程中,RIS 会辅助传输。本文主要的研究工作如下。

1) 建立了一种 RIS 辅助的 UAV-EC 网络,其中

UAV 和地面 BS 协同为 UE 提供计算服务,UAV 和 RIS 合作进行任务传输,其中 RIS 可以通过改变其反射元件的电平达到控制入射电磁波的幅度和相位的目的,从而改变无线信号的传播路径,增强信号覆盖范围,改善传输信道条件,提高 UAV 的传输速率。同时基于 UE 任务随机到达的情况,考虑了 UE 和 UAV 任务队列的长期稳定性。为此,构建了一个任务卸载、资源分配、RIS 相移、UE 传输功率和 UAV 轨迹的联合优化问题,目标是在保证任务队列稳定性约束的情况下,最小化网络的平均能耗。

2) 为了求解构建的问题,提出了一种基于李雅普诺夫优化和块坐标下降 (BCD, block coordinate descent) 法的任务卸载与资源分配 (JORL, joint optimization of task offloading and resource allocation based on Lyapunov) 优化方法。首先利用李雅普诺夫优化将多时隙随机性优化问题转化为每个时隙的确定性优化问题;其次基于三角不等式求解 RIS 相移及其闭合表达式;然后使用非凸问题转化凸问题的技术求解卸载时隙分配、CPU 频率分配和 UE 传输功率;最后基于连续凸近似 (SCA, successive convex approximation) 方法求解无人机轨迹。

3) 本文通过仿真实验对所提方法的有效性进行了验证。仿真结果表明,与随机 RIS 相移、Only-UAV 等基准方案相比,本文所提 JORL 优化方法在保证任务队列稳定性和降低能耗方面都有较优越的性能。

1 网络模型及问题描述

UAV-EC 网络模型如图 1 所示,包含一个具有 EC 服务器的 UAV、 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 个 UE、一个具有 EC 服务器的地面 BS 和一个附着在建筑物表面的 RIS,其中,RIS 包含 $M_y \times M_z$ 个反射元件, M_y 和 M_z 分别表示沿 y 轴和 z 轴的反射元件数。时隙 n 内 RIS 的反射系数矩阵表示为 $\Theta[n] = \text{diag}(e^{j\theta_1[n]}, \dots, e^{j\theta_M[n]})$ 。其中相位满足 $0 \leq \theta_m[n] \leq 2\pi$ 。由于 UE 的计算能力有限,每个 UE 采用部分卸载方案,即可将部分任务卸载到 UAV 上,而剩余部分在本地执行。但是考虑到 UAV 的计算能力有限,即使 UAV 辅助也可能无法满足具有繁重计算应用 UE 的服务质量 (QoS, quality of service) 要求,所有 UAV 可进一步

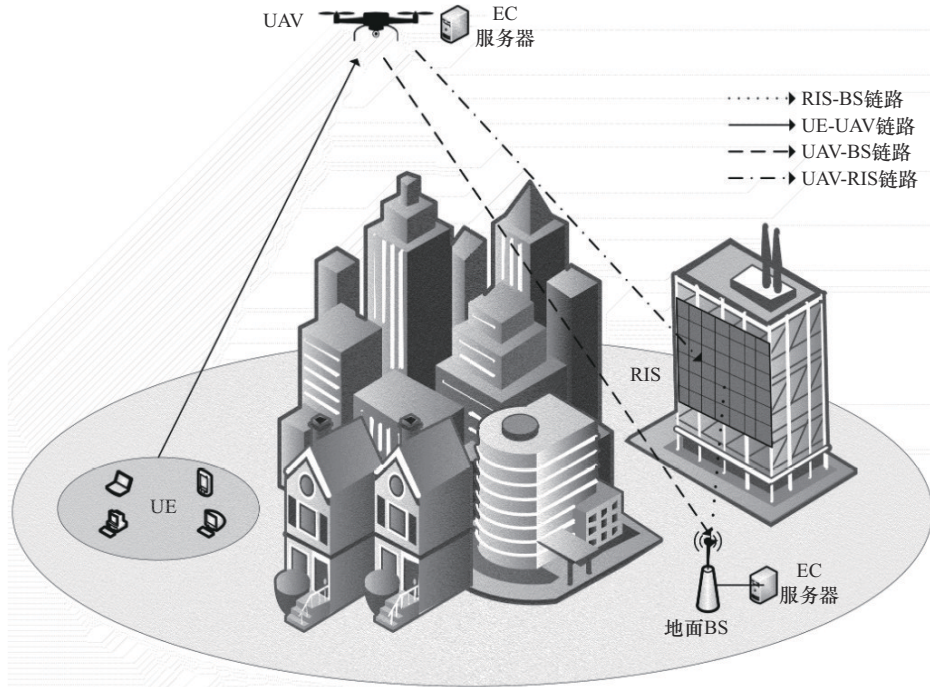


图1 UAV-EC网络模型

将UE的任务通过RIS的辅助卸载到地面BS。

将总执行时长 T 平均分为 N 个等长时隙, 该时隙的集合表示为 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$, 每个时隙长度为 δ , 即 $T = N\delta$ 。在时隙 $n \in \mathcal{N}$, UE _{k} 、UAV、RIS 和地面 BS 的 3D 笛卡儿坐标系分别表示为 $(W_k, 0)$ 、 $(q[n], H)$ 、 (W_r, h_r) 和 $(W_s, 0)$ 。其中 $W_k = (x_k, y_k)$, $q[n] = (x_u[n], y_u[n])$, $W_r = (x_r, y_r)$ 。

令 $\Gamma_k[n] = \{A_k[n], C_n\}$ 表示 UE _{k} 在时隙 n 内随机到达的计算任务。假设任务 $A_k[n]$ 在所有时隙内是独立的, 则 $A_k[n]$ 在 $[A_{k,\min}[n], A_{k,\max}[n]]$ 内随机分布。其中 $A_{k,\min}[n]$ 和 $A_{k,\max}[n]$ 分别表示最小到达任务量和最大到达任务量, 单位为 Mbit, 本文中设置 $A_{k,\min}[n] = 1$ Mbit, $A_{k,\max}[n] = 2$ Mbit。 C_n 为计算 1 bit 任务数据所需的 CPU 周期数, 设置为 1 000 cycle/bit。

1.1 信道模型

在时隙 n 内, 从 UE _{k} ($k \in \mathcal{K}$) 到 UAV 的信道增益表示为 $h_{u,k}[n]$, 从 UAV 到 RIS 的信道增益表示为 $h_{u,r}[n]$, 从 RIS 到地面 BS 的信道增益表示为 $h_{r,s}^H[n]$, 以及从 UAV 到地面 BS 的信道增益表示为 $h_{u,s}[n]$ 。由于 UAV 和 RIS 距离地面有一定的高度, 故 UAV 到 RIS 链路为 LoS 链路, 信道增益表示为

$$h_{u,r}[n] = \sqrt{\frac{\beta_0}{(d_{u,r}[n])^2}} \bar{h}_{u,r}^{\text{LoS}}[n] \quad (1)$$

$$\bar{h}_{u,r}^{\text{LoS}}[n] = \left[1, e^{-j \frac{2\pi d \cos \theta_{u,r}[n]}{\lambda_c}}, \dots, e^{-j \frac{2\pi (M-1) d \cos \theta_{u,r}[n]}{\lambda_c}} \right] \quad (2)$$

其中, β_0 表示参考距离为 1 m 时的平均信道增益, d 表示 RIS 反射元件之间的距离, λ_c 表示载波波长, $\cos \theta_{u,r}[n] = \frac{x_u[n] - x_r}{d_{u,r}[n]}$ 。在不失一般性的情况下,

假设 UE 到 UAV 的信道, UAV 到地面 BS 的信道和 RIS 到地面 BS 的信道为 Rician 信道, 则有

$$h_i[n] = \sqrt{\frac{\beta_0}{(d_i[n])^{\alpha_i}}} \tilde{h}_i[n] \quad (3)$$

其中, $i \in \{\{u,k\}, \{u,s\}, \{r,s\}\}$ 表示 UE 到 UAV、UAV 到地面 BS、RIS 到地面 BS 信道的索引, $\alpha_i \in (2, 4)$ 表示路径损失指数, $d_i[n]$ 表示各信道间的距离。 $\tilde{h}_i[n]$ 表示 Rician 衰落, 表示为

$$\tilde{h}_i[n] = \left(\sqrt{\frac{\beta_i}{1 + \beta_i}} \hat{h}_i^{\text{LoS}}[n] + \sqrt{\frac{1}{1 + \beta_i}} \hat{h}_i^{\text{NLoS}}[n] \right) \quad (4)$$

其中, β_i 表示 Rician 因子, $\hat{h}_i^{\text{LoS}}[n]$ 和 $\hat{h}_i^{\text{NLoS}}[n]$ 分别表示 LoS 和 NLoS 分量。其中 $\hat{h}_{u,k}^{\text{LoS}}[n] = 1$, $\hat{h}_{u,s}^{\text{LoS}}[n] = 1$ 。 $\hat{h}_{r,s}^{\text{LoS}}[n]$ 表示为

$$\hat{h}_{r,s}^{\text{LoS}}[n] = \left[1, e^{-j\frac{2\pi d \cos \theta_{r,s}[n]}{\lambda_c}}, \dots, e^{-j\frac{2\pi(M-1)d \cos \theta_{r,s}[n]}{\lambda_c}} \right] \quad (5)$$

且 $\cos \theta_{r,s}[n] = \frac{x_r - x_s}{d_{r,s}}$, $\hat{h}_{u,s}^{\text{NLoS}}[n] \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$,

$\hat{h}_{u,k}^{\text{NLoS}}[n] \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$, $\hat{h}_{r,s}^{\text{NLoS}}[n] \sim \mathcal{CN}(0, I_M)$ 。

综上可得, 在时隙 n 内 UE $_k$ 到 UAV 的传输速率表示为

$$R_k[n] = B \ln \left(1 + \frac{p_k[n] |h_{u,k}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \quad (6)$$

类似地, UAV 到地面 BS 的传输速率表示为

$$R_{u,k,s}[n] = B \ln \left(1 + \frac{p_{\text{uav}} G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

其中, $p_k[n]$ 表示 UE $_k$ 在时隙 n 内的传输速率, p_{uav} 表示 UAV 的传输速率, B 表示信道带宽, $G_{u,k,s}[n] = |h_{u,r}[n] \Theta[n] h_{r,s}^H[n] + h_{u,s}[n]|^2$ 。

1.2 基于 TDMA 的任务卸载

UE 卸载至 UAV 采用时分多址 (TDMA, time division multiple access) 协议, 如图 2 所示。 $t_k^{\text{user}}[n] \in [0, 1]$ 表示在第 n 个时隙分配给第 k 个 UE 的卸载时间比例, 因此有 $\sum_{k=1}^K t_k^{\text{user}}[n] \leq 1$ 。第 n 个时隙从第 k 个 UE 卸载至 UAV 的数据量表示为

$$l_k^{\text{off}}[n] = \delta t_k^{\text{user}}[n] R_k[n] \quad (8)$$

相应的传输能耗表示为

$$E_k^{\text{tran}}[n] = \delta p_k[n] t_k^{\text{user}}[n] \quad (9)$$

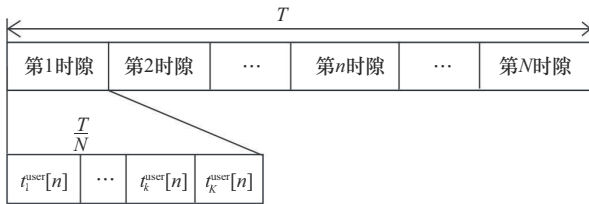


图2 UE卸载至UAV的TDMA协议

当 UAV 接收到来自 UE 的计算任务后, 可以选择将部分任务进一步卸载到地面 BS。假设 UAV 中用于接收数据和卸载数据的模块是相互独立的。类似地, TDMA 协议也用于 UAV 为 UE 进一步卸载任务, 如图 3 所示。 $t_k^{\text{uav}}[n] \in [0, 1]$ 表示 UAV 在第 n 个时隙将第 k 个 UE 任务进一步卸载至地面 BS 的时间比例, 有 $\sum_{k=1}^K t_k^{\text{uav}}[n] \leq 1$ 。因此, UAV 在第 n 个时隙

向地面 BS 卸载的 UE $_k$ 的任务数据量表示为

$$l_{u,k,s}^{\text{off}}[n] = \delta l_k^{\text{uav}}[n] R_{u,k,s}[n] \quad (10)$$

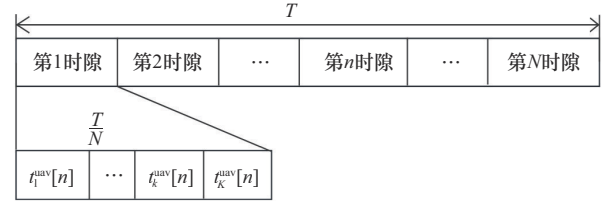


图3 UAV卸载至地面BS的TDMA协议

类似地, UAV 在第 n 个时隙相应的传输能耗表示为

$$E_{\text{uav}}^{\text{tran}}[n] = \sum_{k=1}^K \delta p_{\text{uav}} t_k^{\text{uav}}[n] \quad (11)$$

1.3 计算模型

1) UE 本地计算

$f_k[n] \in [0, F_{k,\text{max}}]$ 表示 UE $_k$ 在时隙 n 内本地计算的 CPU 频率, 其中 $F_{k,\text{max}}$ 表示 UE $_k$ 的最大 CPU 频率。 $l_k^{\text{loc}}[n]$ 为 UE $_k$ 在时隙 n 内本地计算的任务量, 表示为

$$l_k^{\text{loc}}[n] = \frac{\delta f_k[n]}{C_n} \quad (12)$$

则 UE $_k$ 在时隙 n 内本地计算的能耗表示为

$$E_k^{\text{comp}}[n] = \kappa f_k^3[n] \delta \quad (13)$$

其中, κ 表示与 CPU 频率相关的有效电容系数。

2) UAV 计算

假设 UAV 搭载的 EC 服务器的总 CPU 频率为 F_u , 且 $f_{u,k}[n]$ 是分配给 UE $_k$ 任务的 CPU 频率。因此, 在时隙 n , 来自 UE $_k$ 的卸载任务在 UAV 上的计算量为 $l_{u,k}[n]$, 表示为

$$l_{u,k}[n] = \frac{\delta f_{u,k}[n]}{C_n} \quad (14)$$

因此, 第 k 个 UE 在第 n 个时隙相应的传输能耗表示为

$$E_{\text{uav}}^{\text{comp}}[n] = \sum_{k=1}^K \kappa f_{u,k}^3[n] \delta \quad (15)$$

考虑到地面 BS 的计算能力远大于 UAV, 故所有卸载到地面 BS 的计算任务将被完全处理, 且地面 BS 有足够的能量供应。因此不考虑地面 BS 的计算能耗, 且由于计算结果中的数据量很小, UAV 与地面 BS 将结果传输回 UE 的能耗可以忽略^[29]。

1.4 能耗模型

在本文中, 考虑总能耗主要由以下 4 部分组成, 分别为 UE 本地计算能耗、UE 传输能耗、UAV

计算能耗和传输能耗。因此,整个系统每个时隙总能耗表示为

$$E_{\text{total}}[n] = \sum_{k=1}^K E_k^{\text{comp}}[n] + \sum_{k=1}^K E_k^{\text{tran}}[n] + E_{\text{uav}}^{\text{comp}}[n] + E_{\text{uav}}^{\text{tran}}[n] \quad (16)$$

本文假设UAV飞行能量足够^[30],因此只关注与计算和传输相关的能耗。

1.5 计算任务队列模型

每个UE都有一个先进先出的队列用来储存其到达的任务,其到达的任务可以在本地执行或卸载到UAV计算执行。令 $Q_k(n)$ 表示在时隙 n 内UE k 的任务队列积压,任务队列满足的更新过程如式(17)所示。

$$Q_k(n+1) = \max \{ Q_k(n) - l_k^{\text{loc}}[n] - l_k^{\text{off}}[n], 0 \} + A_k[n] \quad (17)$$

同时,UAV拥有 K 个单独的队列,以存储来自 K 个UE的卸载任务。令 $X_k(n)$ 表示在时隙 n 来自UE k 的任务在UAV处的队列长度。 $X_k(n)$ 的更新过程如式(18)所示。

$$X_k(n+1) = \max \{ X_k(n) - l_{u,k}[n] - l_{u,k,s}^{\text{off}}[n], 0 \} + l_k^{\text{off}}[n] \quad (18)$$

对于 $Q_k(n)$ 和 $X_k(n)$,需要满足

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E \{ |Q_k(N)| \}}{N} = 0$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E \{ |X_k(n)| \}}{N} = 0 \quad (19)$$

1.6 问题描述

为了最小化整个系统的总消耗,本文综合考虑了任务卸载、资源分配、RIS相移以及UAV轨迹联合优化问题。将每个时隙的传输和计算的平均能耗定义为衡量系统的性能指标。因此,该优化问题可表示为

$$\text{P1} \min_{\boldsymbol{\varepsilon}_1} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N E_{\text{total}}[n]$$

s.t. $C_1: q[1] = q_0, q[N] = q_F$

$$C_2: v_{\text{uav}}(n) \leq V_{\text{max}}, \forall n$$

$$C_3: t_k^{\text{user}}[n] \in [0, 1], t_k^{\text{uav}}[n] \in [0, 1], \forall k, n$$

$$C_4: \sum_{k=1}^K t_k^{\text{user}}[n] \leq 1, \sum_{k=1}^K t_k^{\text{uav}}[n] \leq 1$$

$$C_5: 0 \leq f_k[n] \leq F_{k,\text{max}}, \forall k, n$$

$$C_6: \sum_{k=1}^K f_{u,k}[n] \leq F_u$$

$$C_7: 0 \leq p_k[n] \leq P_{k,\text{max}}, \forall k, n$$

$$C_8: l_k^{\text{loc}}[n] + l_k^{\text{off}}[n] \leq Q_k(n), \forall k, n$$

$$C_9: l_{u,k}[n] + l_{k,s}^{\text{off}}[n] \leq X_k(n), \forall k, n$$

$$C_{10}: 0 \leq \theta_m[n] \leq 2\pi, \forall k, n, m$$

$$C_{11}: \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E \{ |Q_k(N)| \}}{N} = 0, \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E \{ |X_k(n)| \}}{N} = 0 \quad (20)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \{q[n], \boldsymbol{\theta}[n], t_k^{\text{user}}[n], t_k^{\text{uav}}[n], p_k[n], f_k[n], f_{u,k}[n]\}$ 表示优化变量集合。 C_1 表示对UAV起始位置和终点位置的约束。 C_2 表示在任意时隙UAV的飞行速度不能超过规定的最大飞行速度。 C_3 和 C_4 表示UE与UAV的传输时间比例约束。 C_5 和 C_6 表示UE与UAV的CPU频率分配约束。 C_7 表示UE的传输功率约束。 C_8 和 C_9 表示UE和UAV处理的任务量不能超过任务队列积压量加每个时隙的任务到达量。 C_{10} 表示每个RIS反射元件的相移约束。 C_{11} 保证了任务队列的长期稳定性。

2 问题求解

本节首先基于Lyapunov优化将多时隙随机性优化问题转化为每个时隙的确定性优化问题。之后,基于多目标层次优化的思想,将转化后的问题分为3个子问题并基于BCD法逐次迭代求解,各个子问题是指在确保其它2个子问题最优的条件下解决本子问题优化问题。本文将求解最优RIS相移视为子问题1,将求解最优时隙分配、UE传输功率以及CPU频率分配视为子问题2,将求解最优UAV轨迹视为子问题3。具体求解流程如图4所示。

2.1 队列分析与问题转化

为了保证系统的稳定性,首先,本文将Lyapunov函数定义为队列积压的平方和,用于评估任务队列的稳定性,表示为

$$U(\boldsymbol{\mathcal{X}}(n)) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (Q_k^2(n) + X_k^2(n)) \quad (21)$$

其中, $\boldsymbol{\mathcal{X}}(n) = [Q(n), X(n)]$ 表示时隙 n 内的任务队列状态。因此可以获得Lyapunov漂移惩罚函数,表示为

$$D(\boldsymbol{\mathcal{X}}(n)) = \Delta U(\boldsymbol{\mathcal{X}}(n)) + VE[E_{\text{total}}[n] | \boldsymbol{\mathcal{X}}(n)]$$

$$\Delta U(\boldsymbol{\mathcal{X}}(n)) = E[U(\boldsymbol{\mathcal{X}}(n+1)) - U(\boldsymbol{\mathcal{X}}(n)) | \boldsymbol{\mathcal{X}}(n)] \quad (22)$$

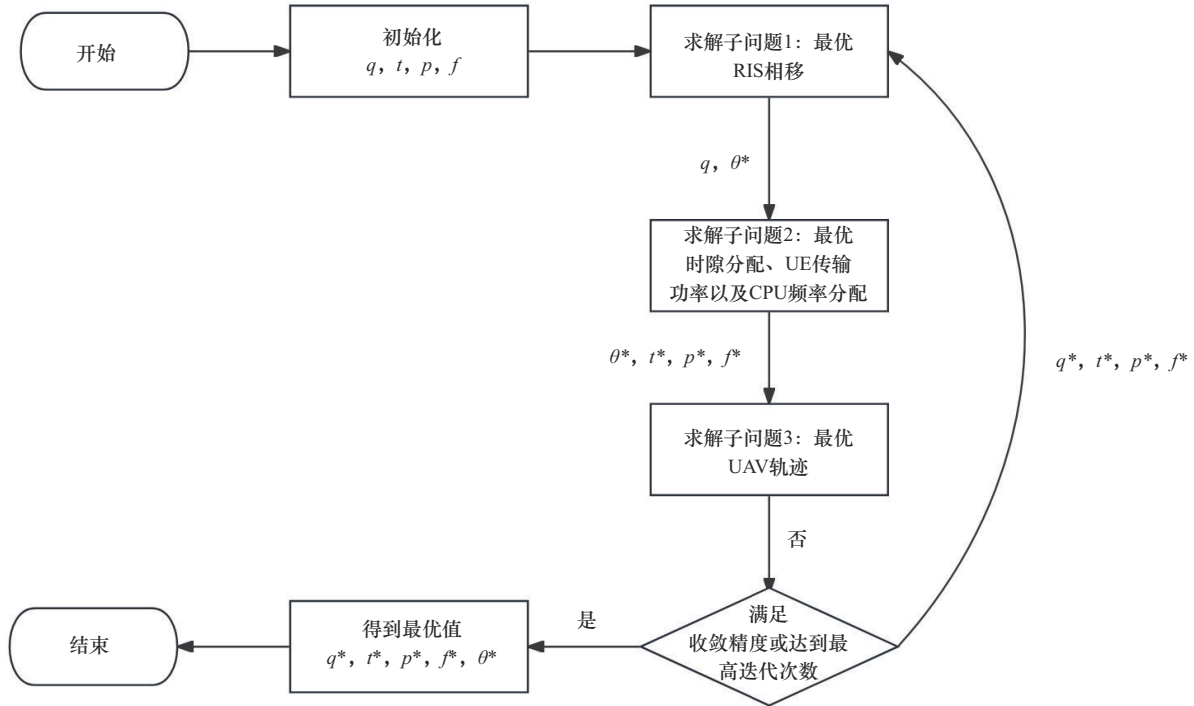


图4 求解流程

其中, $\Delta U(\mathcal{X}(n))$ 为Lyapunov漂移条件, $V \geq 0$ 为平衡系统能耗和任务队列积压的控制系数。为了最小化Lyapunov漂移惩罚函数, 需要最小化 $D(\mathcal{X}(n))$ 的上界, 由引理1给出。

引理 1 对于任意变量和队列积压, Lyapunov漂移惩罚函数的上界推导为

$$D(\mathcal{X}(n)) \leq C + E \left[\sum_{k \in K} \{Q_k(n)(A_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n] - l_k^{\text{off}}[n])\} \right] + E \left[\sum_{k \in K} \{X_k(n)(l_k^{\text{off}}[n] - l_{u,k}[n] - l_{k,s}^{\text{off}}[n])\} \right] + VE[E_{\text{total}}[n]|\mathcal{X}(n)] \quad (23)$$

其中, C 为常数。

证明 参考附录1。

基于引理1, 将原问题转换为Lyapunov最小化漂移惩罚函数的上界问题, 如式(24)所示。

$$\begin{aligned} \text{P2} \min_{\Xi_1} & - \sum_{k=1}^K \{Q_k(n)l_k^{\text{loc}}[n] + (Q_k(n) - X_k(n))l_k^{\text{off}}[n] + \\ & X_k(n)(l_{u,k}[n] + l_{k,s}^{\text{off}}[n])\} + VE_{\text{total}}[n] \\ \text{s.t.} & C_1 \sim C_{10} \end{aligned} \quad (24)$$

新的问题是与能耗和任务计算相关的实时问题, 不需要随机变量预测信息。它可以在每个时隙

内优化系统决策。

2.2 子问题1:求解最优RIS反射系数矩阵

在给定子问题2和子问题3中优化变量取值的情况下, 对最优RIS反射系数矩阵进行优化。通过调整RIS相移, 总是希望 $R_{u,k,s}[n]$ 的值最大, 目标是使 $|h_{r,s}^H[n]\Theta[n]h_{u,r}[n] + h_{u,s}^H[n]|^2$ 最大, 因此将其转化为

$$\begin{aligned} |h_{r,s}^H[n]\Theta[n]h_{u,r}[n] + h_{u,s}^H[n]| & \leq \\ |h_{r,s}^H[n]\Theta[n]h_{u,r}[n]| + |h_{u,s}^H[n]| \end{aligned} \quad (25)$$

式(25)中的变化基于三角不等式, 当且仅当 $\arg(h_{u,s}^H[n]) = \arg(h_{r,s}^H[n]\Theta[n]h_{u,r}[n]) = \varphi_{k,n}^0$ 时取等号。 $\varphi_{k,n}^0$ 是一个恒定的相移值。令 $v_k^H[n] = [e^{j\theta_1[n]}, \dots, e^{j\theta_M[n]}]$, $\Phi[n] = \text{diag}(h_{r,s}^H[n])h_{u,r}[n]$ 则可得等式 $h_{r,s}^H[n]\Theta[n]h_{u,r}[n] = v_k^H[n]\Phi[n]$ 。当式(25)取等号时, 可以得到 $v_k^H[n]$ 的最优值, 该最优值为 $v_k^H[n] = e^{j(\varphi_{k,n}^0 - \arg \Phi[n])}$ 。最终可以得出时隙 n 中RIS第 m 个反射元件的相移为

$$\begin{aligned} \theta_m[n] & = \text{mod} \left[\arg(h_{u,s}[n]) - \right. \\ & \left. \arg(\hat{h}_{rs,m}^H[n]) - \arg(\hat{h}_{ur,m}[n]), 2\pi \right] \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $\hat{h}_{rs,m}^H[n]$ 表示 $h_{r,s}^H[n]$ 的第 m 个分量, $\hat{h}_{ur,m}[n]$ 表示 $h_{u,r}[n]$ 的第 m 个分量。

2.3 子问题2:求解最优时隙分配、UE传输功率以及CPU频率分配

在求得子问题1中最优RIS反射系数矩阵,以及给定子问题3中优化变量取值的情况下,求解最优时隙分配、UE传输功率以及CPU频率分配。子问题2如下。

$$\begin{aligned}
 \text{P3} \min_{\Xi_2} & - \sum_{k=1}^K \delta \left\{ Q_k(n) \frac{f_k[n]}{C_n} + \right. \\
 & \left. t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_k[n] |h_{u,k}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \right. \\
 & \left. (Q_k(n) - X_k(n)) + X_k(n) \left(\frac{f_{u,k}[n]}{C_n} + \right. \right. \\
 & \left. \left. t_k^{\text{uav}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_{\text{uav}} G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right) \right) \right\} + \\
 & V\delta \sum_{k=1}^K (\kappa f_k^3[n] + \kappa f_{u,k}^3[n] + \\
 & p_k[n] t_k^{\text{user}}[n] + p_{\text{uav}} t_k^{\text{uav}}[n]) \\
 \text{s.t. } & C_3 \sim C_9 \tag{27}
 \end{aligned}$$

其中, $\Xi_2 = \{t_k^{\text{user}}[n], t_k^{\text{uav}}[n], p_k[n], f_k[n], f_{u,k}[n]\}$ 。为了便于进一步求解,令 $z_k^{\text{user}}[n] = t_k^{\text{user}}[n] p_k[n]$,则P3可以进一步转化为P4。

$$\begin{aligned}
 \text{P4} \min_{\Xi_2, z_k^{\text{user}}[n]} & - \sum_{k=1}^K \delta \left\{ Q_k(n) \frac{f_k[n]}{C_n} + \right. \\
 & \left. t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{z_k^{\text{user}}[n] |h_{u,k}[n]|^2}{t_k^{\text{user}}[n] \sigma^2} \right) \right. \\
 & \left. (Q_k(n) - X_k(n)) + X_k(n) \left(\frac{f_{u,k}[n]}{C_n} + \right. \right. \\
 & \left. \left. t_k^{\text{uav}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_{\text{uav}} G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right) \right) \right\} + \\
 & V\delta \sum_{k=1}^K (\kappa f_k^3[n] + \kappa f_{u,k}^3[n] + \\
 & z_k^{\text{user}}[n] + p_{\text{uav}} t_k^{\text{uav}}[n]) \\
 \text{s.t. } & C_3 \sim C_8 \\
 & C_{12}: z_k^{\text{user}}[n] \geq 0, \forall k, n \\
 & C_{13}: \delta t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{z_k^{\text{user}}[n] |h_{u,k}[n]|^2}{t_k^{\text{user}}[n] \sigma^2} \right) +
 \end{aligned}$$

$$\delta \frac{f_k[n]}{C_n} \leq Q_k(n), \forall k, n \tag{28}$$

首先通过引理2证明P4中的 $t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{z_k^{\text{user}}[n] |h_{u,k}[n]|^2}{t_k^{\text{user}}[n] \sigma^2} \right)$ 是关于 $z_k^{\text{user}}[n]$ 与 $t_k^{\text{user}}[n]$ 的凹函数。

引理2 如果存在2个函数 f 和 g 满足以下方程。

$$\begin{aligned}
 & f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, f(x) \\
 & g: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{++} \rightarrow \mathbb{R}, g(x, t) = t f\left(\frac{x}{t}\right) \tag{29}
 \end{aligned}$$

当 g 满足 $\text{dom } g = \{(x, t) | t > 0, \frac{x}{t} \in \text{dom } f\}$ 时,函数 g 为函数 f 的透视函数,且函数 g 和函数 f 拥有相同的凹凸性。令 $f(z_k^{\text{user}}[n]) = \text{Blb} \left(1 + \frac{z_k^{\text{user}}[n] |h_{u,k}[n]|^2}{\sigma^2} \right)$,显然 $f(z_k^{\text{user}}[n])$ 是凹函数。根据引理2,容易得出此时 $t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{z_k^{\text{user}}[n] |h_{u,k}[n]|^2}{t_k^{\text{user}}[n] \sigma^2} \right)$ 是 $f(z_k^{\text{user}}[n])$ 的透视函数,因此其为关于 $z_k^{\text{user}}[n]$ 与 $t_k^{\text{user}}[n]$ 的联合凹函数。然而由于 $Q_k(n) - X_k(n)$ 正负的不确定性,仍然无法判断P4的凹凸性,通过引入松弛变量 $S_k^{\text{user}}[n]$ 来解决此问题,引入后P4可转化为

$$\begin{aligned}
 \text{P5} \min_{\Xi_2, S_k^{\text{user}}[n], z_k^{\text{user}}[n]} & - \sum_{k=1}^K \delta \left\{ Q_k(n) \frac{f_k[n]}{C_n} + S_k^{\text{user}}[n] \cdot \right. \\
 & \left. (Q_k(n) - X_k(n)) + X_k(n) \left(\frac{f_{u,k}[n]}{C_n} + \right. \right. \\
 & \left. \left. t_k^{\text{uav}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_{\text{uav}} G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right) \right) \right\} + \\
 & V\delta \sum_{k=1}^K (\kappa f_k^3[n] + \kappa f_{u,k}^3[n] + \\
 & z_k^{\text{user}}[n] + p_{\text{uav}} t_k^{\text{uav}}[n]) \\
 \text{s.t. } & C_3 \sim C_8 \\
 & C_{12}: S_k^{\text{user}}[n] \geq 0, z_k^{\text{user}}[n] \geq 0, \forall k, n \\
 & C_{14}: S_k^{\text{user}}[n] \leq \\
 & t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{z_k^{\text{user}}[n] |h_{u,k}[n]|^2}{t_k^{\text{user}}[n] \sigma^2} \right), \forall k, n
 \end{aligned}$$

$$C_{15}: \frac{f_k[n]}{C_n} + S_k^{\text{user}}[n] \leq \frac{Q_k(n)}{\delta}, \forall k, n \quad (30)$$

至此, P5 为凸问题, 可以通过标准凸优化工具箱求解, 如 CVX 工具箱。

2.4 子问题 3: 求解最优 UAV 轨迹

在求得子问题 1 中最优 RIS 相移矩阵, 以及子问题 2 中最优时隙分配、UE 传输功率和 CPU 频率分配的情况下, 求解最优 UAV 轨迹。子问题 3 如式(31)所示。

$$\begin{aligned} \text{P6} \min_{q[n]} & - \sum_{k=1}^K \delta \left\{ t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_k[n] |h_{u,k}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \right. \\ & \left. (Q_k(n) - X_k(n)) + X_k(n) \right. \\ & \left. \delta t_k^{\text{uav}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_{\text{uav}}[n] G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right) \right\} \\ \text{s.t. } & C_1, C_2, C_8, C_9 \end{aligned} \quad (31)$$

由于目标函数、 C_8 和 C_9 是非凸的, 因此 P6 是非凸的, 为了解决这个问题, 引入松弛变量 $S_{u,k}[n]$ 和 $D_{u,k,s}[n]$ 分别满足以下不等式。

$$\begin{aligned} S_{u,k}[n] & \leq t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_k[n] |h_{u,k}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \\ D_{u,k,s}[n] & \leq t_k^{\text{uav}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_{\text{uav}}[n] G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

则可将 P6 转化为以下等效形式。

$$\begin{aligned} \text{P7} \min_{q[n], S_{u,k}[n], D_{u,k,s}[n]} & - \sum_{k=1}^K \delta \left\{ (Q_k(n) - X_k(n)) \right. \\ & \left. S_{u,k}[n] + X_k(n) D_{u,k,s}[n] \right\} \\ \text{s.t. } & C_1, C_2 \\ & C_{15}: S_{u,k}[n], D_{u,k,s}[n] \geq 0, \forall k, n \\ & C_{16}: S_{u,k}[n] \leq \\ & t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{\tilde{r}_k^{\text{off}}[n]}{\left(\|q[n] - W_k\|^2 + h_u^2 \right)^{\frac{\alpha_{u,k}}{2}}} \right), \forall k, n \\ & C_{17}: D_{u,k,s}[n] \leq t_k^{\text{uav}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{p_{\text{uav}} G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right), \forall k, n \\ & C_{18}: \frac{f_k[n]}{C_n} + S_{u,k}[n] \leq \frac{Q_k(n)}{\delta}, \forall k, n \\ & C_{19}: fu, kn Cn + Du, k, sn \leq Xkn\delta, \forall k, n \end{aligned} \quad (33)$$

其中, C_{16} 中 $\tilde{r}_k^{\text{off}}[n] = \frac{p_k[n] \beta_0 |\tilde{h}_{u,k}[n]|^2}{\sigma^2}$, 虽然 C_{16} 是非凸的, 但显然 C_{16} 不等式右侧对 $\|q[n] - W_k\|^2 + H^2$ 是凸的, 很容易通过计算函数 $\text{lb} \left(1 + \frac{1}{x^\alpha} \right)$ 的二阶导数来证明其凸性, 其中 $x, \alpha > 0$ 。因此, 可以使用逐次凸逼近 (SCA, successive convex approximation) 方法来处理这一约束。令 $d_{u,k,(j)}^2[n] = \|q^{(j)}[n] - W_k\|^2 + H^2$ 对于任何给定的可行轨迹 $q^{(j)}[n]$, 通过一阶泰勒展开, 可获得关于 C_{16} 中不等式右侧的下界函数 $A_k^{\text{LB}}[n]$, 表示为

$$\begin{aligned} A_k^{\text{LB}}[n] & = A_{1,k}^{(j)}[n] + \\ & A_{2,k}^{(j)}[n] \left(\|q[n] - W_k\|^2 - \|q^{(j)}[n] - W_k\|^2 \right) \end{aligned} \quad (34)$$

其中, $A_{1,k}^{(j)}[n] = t_k^{\text{user}}[n] \text{Blb} \left(1 + \tilde{r}_k^{\text{off}}[n] d_{u,k,(j)}^{-\alpha_{u,k}}[n] \right)$,

$$A_{2,k}^{(j)}[n] = - \frac{B \alpha_{u,k} t_k^{\text{user}}[n] \tilde{r}_k^{\text{off}}[n]}{2 \ln 2 d_{u,k,(j)}^2[n] \left(d_{u,k,(j)}^{\alpha_{u,k}}[n] + \tilde{r}_k^{\text{off}}[n] \right)}$$

对于 C_{17} , 可以将其右侧项, 即 $l_{u,k,s}^{\text{off}}[n]$ 转换为

$$\begin{aligned} l_{u,k,s}^{\text{off}}[n] & = t_k^{\text{uav}}[n] \text{Blb} \left(1 + \frac{\varpi_{1,k}[n]}{d_{u,s}^{\frac{\alpha_{u,s}}{2}}[n]} + \right. \\ & \left. \frac{\varpi_{2,k}[n]}{d_{u,s}^{\frac{\alpha_{u,s}}{4}}[n] d_{u,r}^{\frac{\alpha_{u,r}}{4}}[n]} + \frac{\varpi_{3,k}[n]}{d_{u,r}^{\frac{\alpha_{u,s}}{2}}[n]} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

其中, $\varpi_{1,k}[n]$ 、 $\varpi_{2,k}[n]$ 和 $\varpi_{3,k}[n]$ 是非负的, 分别表示为

$$\begin{aligned} \varpi_{1,k}[n] & = \beta_0 p_{\text{uav}} \frac{|\tilde{h}_{u,s}[n]|^2}{\sigma^2} \\ \varpi_{2,k}[n] & = 2 \beta_0^{1.5} p_{\text{uav}} \frac{|\tilde{h}_{u,s}[n]| |\tilde{h}_{r,s}[n]| \Theta[n] |\tilde{h}_{u,r}[n]|}{\sigma^2} \\ \varpi_{3,k}[n] & = \beta_0^2 p_{\text{uav}} \frac{|\tilde{h}_{r,s}[n]| \Theta[n] |\tilde{h}_{u,r}[n]|^2}{\sigma^2} \end{aligned} \quad (36)$$

进一步处理式(35), 通过引入辅助变量 $\lambda[n]$ 和 $v[n]$, 将式(35)转换为以下约束。

$$\lambda[n] \geq \|q[n] - W_s\|^2 + H^2 \quad (37)$$

$$v[n] \geq \|q[n] - W_r\|^2 + (H - h_r)^2 \quad (38)$$

$$I_{u,k,s}^{\text{off}}[n] = t_k^{\text{uav}}[n] B \text{lb} \left(1 + \frac{\varpi_{1,k}[n]}{\lambda^{\frac{\alpha_{u,s}}{2}}[n]} + \frac{\varpi_{2,k}[n]}{\lambda^{\frac{\alpha_{u,s}}{4}}[n] v^{\frac{\alpha_{u,r}}{4}}[n]} + \frac{\varpi_{3,k}[n]}{v^{\frac{\alpha_{u,r}}{2}}[n]} \right) \quad (39)$$

显然, 式(37)~式(39)等效于式(35), 即式(37)和式(38)中的不等式必须在最优解处取等号。否则, 总是可以通过减小辅助变量 $\lambda[n]$ 和 $v[n]$ 来扩大 $I_{u,k,s}^{\text{off}}[n]$ 的值, 且不会违反P7的客观值。

引理3 当 $\lambda[n] > 0$, $v[n] > 0$ 时, 式(39)中的函数是关于 $\lambda[n]$ 和 $v[n]$ 的联合凸函数。

证明 参考附录2。

基于引理3, 使用SCA方法求解式(39)。通过给定的可行点 $\lambda_{(j)}[n]$ 和 $v_{(j)}[n]$, 获得了下界函数 $\Pi_k^{\text{LB}}[n]$, 表示为

$$\Pi_k^{\text{LB}}[n] = I_{1,k}^{(j)}[n] + I_{2,k}^{(j)}[n] \left(\lambda[n] - \lambda_{(j)}[n] \right) + I_{3,k}^{(j)}[n] \left(v[n] - v_{(j)}[n] \right) \quad (40)$$

其中, $I_{2,k}^{(j)}[n] = \frac{X_{1,k}^{(j)}[n]}{Y_k^{(j)}[n]}$, $I_{3,k}^{(j)}[n] = \frac{X_{2,k}^{(j)}[n]}{Y_k^{(j)}[n]}$, $I_{1,k}^{(j)}[n] = t_k^{\text{uav}}[n] B \text{lb} \left(Y_k^{(j)}[n] \right)$ 。 $Y_k^{(j)}[n]$ 、 $X_{1,k}^{(j)}[n]$ 和 $X_{2,k}^{(j)}[n]$ 分别表示为

$$Y_k^{(j)}[n] = 1 + \varpi_{1,k}[n] \lambda_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,s}}{2}}[n] + \varpi_{2,k}[n] \lambda_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,s}}{4}}[n] v_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,r}}{4}}[n] + \varpi_{3,k}[n] v_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,r}}{2}}[n] \quad (41)$$

$$X_{1,k}^{(j)}[n] = t_k^{\text{uav}}[n] B \text{lb} \left(e \right) \left(-\frac{\alpha_{u,s}}{2} \varpi_{1,k}[n] \lambda_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,s}}{2}-1}[n] - \frac{\alpha_{u,s}}{4} \varpi_{2,k}[n] \lambda_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,s}}{2}-1}[n] v_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,r}}{4}} \right) \quad (42)$$

$$X_{2,k}^{(j)}[n] = t_k^{\text{uav}}[n] B \text{lb} \left(e \right) \left(-\frac{\alpha_{u,r}}{2} \varpi_{3,k}[n] v_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,r}}{2}-1}[n] - \frac{\alpha_{u,r}}{4} \varpi_{2,k}[n] v_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,r}}{4}-1}[n] \lambda_{(j)}^{\frac{\alpha_{u,s}}{4}} \right) \quad (43)$$

经过上述变化, P7可以转化为以下等效形式。

$$\text{P8} \quad \min_{q[n], S_{u,k}[n], D_{u,k,s}[n], \lambda[n], v[n]} - \sum_{k=1}^K \delta \left\{ \left(Q_k(n) - X_k(n) \right) S_{u,k}[n] + X_k(n) \delta D_{u,k,s}[n] \right\}$$

s.t. $C_1, C_2, C_{16}, C_{18}, C_{19}$, 式(37) ~ 式(39)

$$C_{20}: S_{u,k}[n] \leq A_k^{\text{LB}}[n] \\ C_{21}: D_{u,k,s}[n] \leq \Pi_k^{\text{LB}}[n] \quad (44)$$

至此, P8属于可以通过标准凸优化工具解决的凸问题。

根据以上的求解, 整体的JORL算法如算法1所示。

算法1 JORL算法

- 1) 初始化所有必要的优化变量和辅助变量, 设置 ϵ 为收敛精度, I_{\max} 为允许的最大迭代次数, 迭代 $j = 0$
- 2) for $n = 1$ to N do
- 3) 获得 $\mathcal{X}(n)$ 和 $\{A_k[n]\}_{k=1}^K$
- 4) repeat
- 5) 通过式(26)得到最优RIS相移
- 6) 通过求解P5获得最优卸载时隙分配、CPU频率分配和UE传输功率
- 7) 通过求解P7获得最优UAV轨迹
- 8) $j = j + 1$
- 9) until 算法达到精度或迭代超过允许的最大次数
- 10) 输出最优RIS相移、卸载时隙分配、UE传输功率、PU频率分配和最优UAV轨迹
- 11) 通过式(17)和式(18)更新任务队列 $Q_k(n+1)$ 和 $X_k(n+1)$

12)end for

算法1中的精度是通过相邻迭代之间子问题3的目标值之差来衡量的, 即当 $\Delta j < \epsilon$ 时, 算法收敛, 其中 $\Delta j = |\xi_{j+1} - \xi_j|$, ξ_{j+1} 和 ξ_j 分别表示子问题3在第 $(j+1)$ 次和第 j 次迭代中的目标值。

3 仿真分析

本节通过给出数值结果来证明本文所提算法的有效性。考虑一个所有网络节点位于RIS反射侧的区域。具体来说, RIS位于(0,300,20) m的 yo z平面内, 地面BS位于(300,600,0) m, UE分布在 xoy 平面内。设置UAV高度 $H=100$ m, 从初始位置(0,0) m飞行到最终位置(600,600) m的最大飞行速度 $V_{\max} = 25$ m/s。如果无特别说明, 其余仿真参数设置如表1所示。

本文与以下4种基准方案进行对比分析。

- 1) Random RIS phase: 随机的RIS相移。

表 1 仿真参数设置

参数	值
网络总执行时长 T/s	60
时隙数 N	60
用户设备数 K	8
载波波长 λ_c/MHz	750
单位信道增益 β_0/dB	$\left(\frac{\lambda_c}{4\pi}\right)^2$
RIS 反射单元间隔 (d_y, d_z)	$\frac{\lambda_c}{4}$
信道带宽 B/MHz	1
噪声功率 σ^2/dBm	-90
RIS 反射元件数 (M_y, M_z)	10
Rician 因子 $(\beta_{u,k}, \beta_{u,s}, \beta_{r,s})/dB$	10
损失指数 $(\alpha_{u,k}, \alpha_{u,s}, \alpha_{r,s})$	2.5, 3, 2.3
UAV 传输功率 p_{uav}/W	0.5
UE 最大传输功率 $P_{k,max}/W$	0.2
UAV 最大 CPU 频率 F_u/GHz	8
UE 最大 CPU 频率 $F_{k,max}/GHz$	1
算法收敛精度 ϵ	0.001
算法最大迭代次数 I_{max}	50
有效电容系数 κ	10^{-28}

2) Without RIS: 网络中不考虑 RIS。

3) Only-UAV: 在本文所提网络的基础上不考虑地面 BS。

4) JSORT: 文献[27]中模型所提算法。

图 5 为在某一时隙内默认参数以及在用户数为 10、RIS 反射元件数为 36 时本文所提算法的收敛性能，可以看出，在不同参数的情况下，本文算法都能在几次迭代中获得稳定的值，表示本文算法的有效性和扩展性。

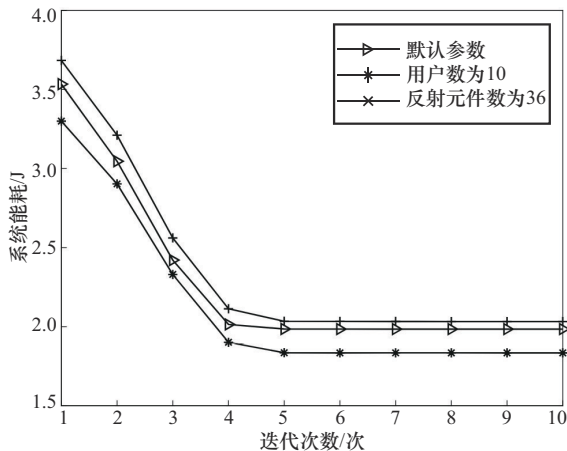


图 5 本文算法的收敛性能

图 6 为在不同方案下的 UAV 轨迹俯视图，可以看出，在不同方案下的 UAV 轨迹是不同的。由于本文模型考虑地面 BS 协助计算，因此 UAV 可以将任务卸载至地面 BS 从而减少在 UAV 上的计算，可以很大程度地减少系统计算能耗，因此 UAV 会以最大速度飞向地面 BS。Only-UAV 与 JSROT 方案因为没有地面 BS 的协助，会依次飞向各 UE 为其更好地提供卸载服务。并且由于 Only-UAV 方案采用 TDMA 协议，因此轨迹会更靠近每个 UE。而 JSROT 方案采用正交频分多址（OFDMA, orthogonal frequency division multiple access）协议，因此可以更平均地为 UE 提供卸载服务。并且这 2 种方案 UAV 都会在 UE 较少的区域高速飞行，而在 UE 较密集的区域低速飞行。

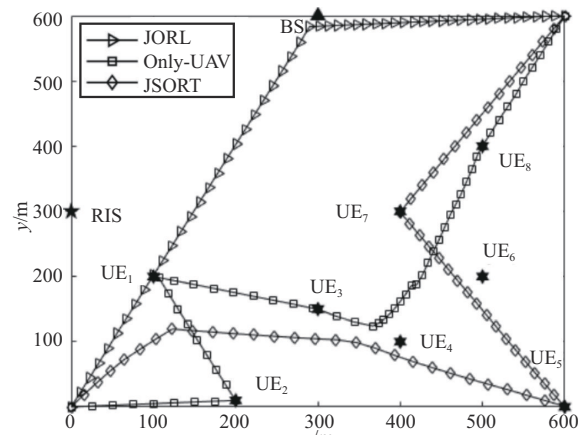


图 6 UAV 轨迹俯视图

图 7 和图 8 显示了每个时隙的系统平均能耗和平均队列长度，可以看出，所有方案能保持队列的长期稳定，表明了 Lyapunov 优化在保持数据队列稳定性的重要性。此外还可以看出，本文算法在平均队列长度和系统平均能耗上都取得了最好的表现，这是因为此时 UAV 既充当 EC 服务器又充当移动中继，UAV 可以将部分任务进一步卸载到地面 BS 以减小其计算能耗。Random RIS phase 方案相比 Without RIS 方案几乎没有提高性能，这说明了 RIS 反射系数的设计在实际场景中的重要性，因为没有反射系数设计的 RIS 几乎无法改善传输环境。Only-UAV 相比于 JSROT 系统平均能耗更高，这是因为 JSROT 采用 OFDMA 协议，每个 UE 相比于 Only-UAV 方案有更多的传输时间，相应的传输功率就会更低。

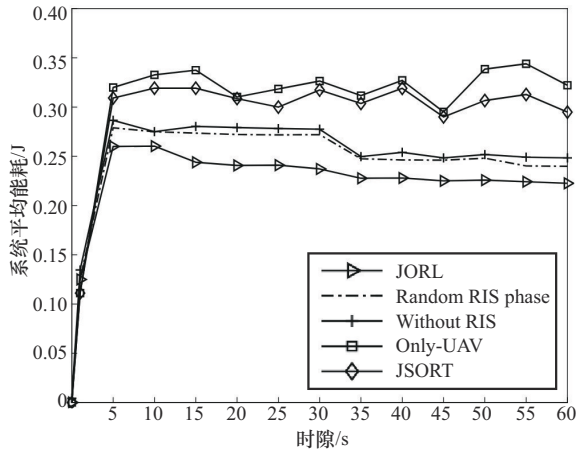


图7 每个时隙的系统平均能耗

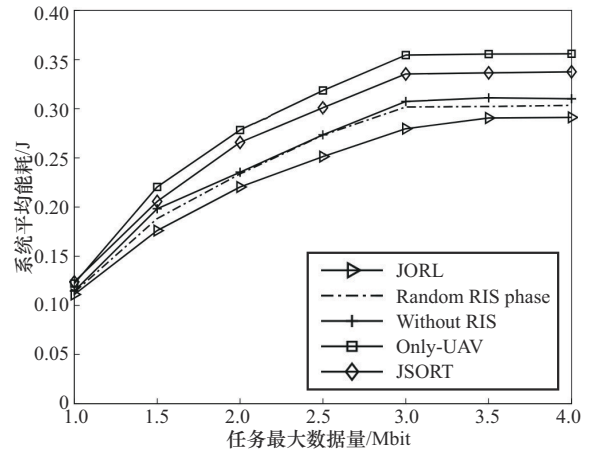


图9 系统平均能耗与 $A_{k,max}$ 的关系

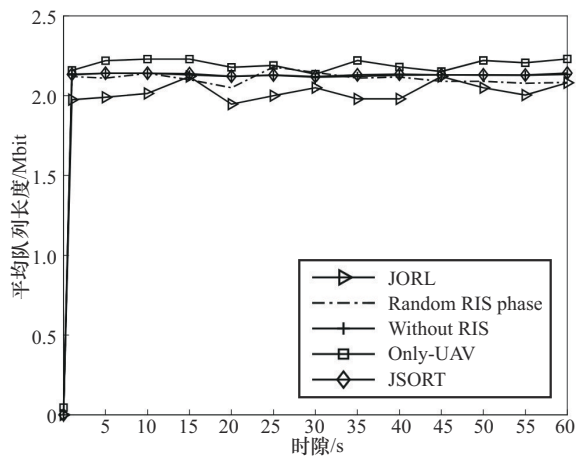


图8 每个时隙的平均队列长度

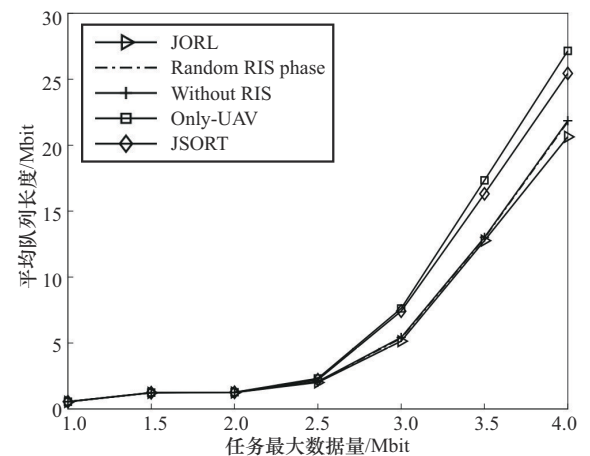


图10 平均队列长度与 $A_{k,max}$ 的关系

图 9 和图 10 分别为系统平均能耗和平均队列长度与不同 $A_{k,max}$ 的关系。此时，平均队列长度定义为 $\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{(Q_k(n) + X_k(n))}{(KN)}$ 。可以看出，本文算法都优于基准方案，这验证了本文算法的有效性。从图 9 中可以看到，当 $A_{k,max} > 3$ Mbit 后，系统平均能耗基本没有变化，这是因为此时已经达到了系统资源的上限，即使任务大小继续增大，系统也无法继续处理更多的任务。同理图 10 中平均队列长度也在 3 Mbit 后激增，但是明显本文算法以及 Random RIS phase 与 Without RIS 方案的表现都优于 Only-UAV 与 JSORT 方案，这是因为这 3 种方案 UAV 可以将部分任务卸载到地面 BS，相比于后两者可以处理更多的任务，而且本文算法又优于 Random RIS phase 与 Without RIS 的方案，也进一步表明了 RIS 反射系数优化的重要性。

图 11 和图 12 分别为系统平均能耗和平均队列长度与不同控制因子 V 的关系。在 Lyapunov 优化中， V 的值用于平衡系统能耗和队列稳定性。可以看出，随着 V 的增大，系统平均能耗逐渐减小并趋于稳定，平均队列长度则会增加。当 $V \leq 1 \times 10^{10}$ 和 $V \geq 1 \times 10^{14}$ 时，2 种情况的变化趋势不明显。原因是当 V 的值太小时，无法实现系统能耗与队列稳定性的平衡，而当 V 的值足够大时，系统主要考虑最小化能耗，任务被限制执行和卸载，因此队列任务的积压开始累积。显然，更小或更大的 V 值对系统来说都是不利的。

图 13 和图 14 分别为前 30 个时隙 UE 卸载到 UAV 的时间比例以及 UAV 卸载各 UE 任务的时间比例。从图 13 和图 14 中可以看出，每个时隙分配给各 UE 任务的时间比例都有较大不同，甚至有时隙比例之和小于 1，一方面是因为任务大小的随机性；另一方面是因为无论是 UE 还是 UAV 既可以

本地计算也可以进一步卸载任务，在有些时隙不需要使用一个完整的时隙，也说明了时隙分配优化的重要性。

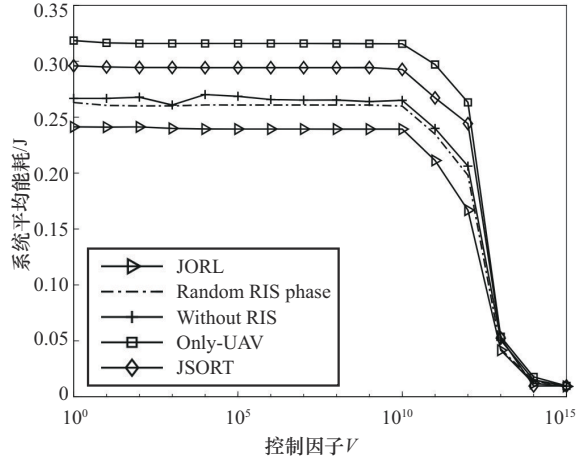


图 11 系统平均能耗与 V 的关系

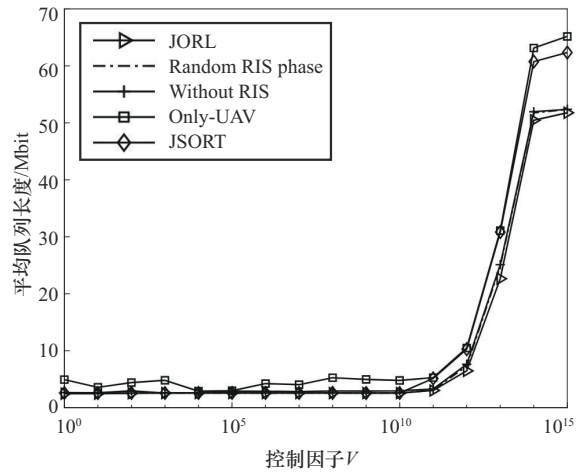


图 12 平均队列长度与 V 的关系

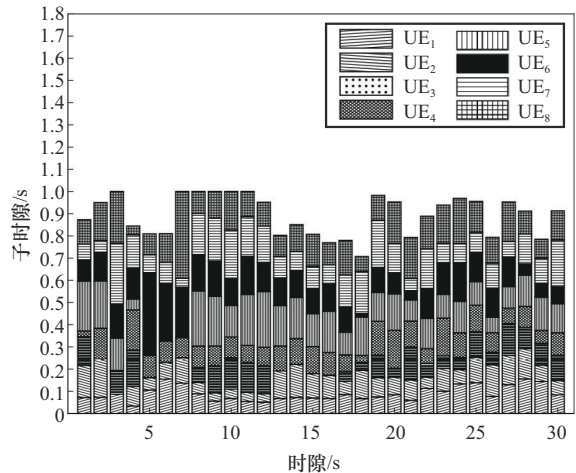


图 13 UE 卸载到 UAV 的时间比例

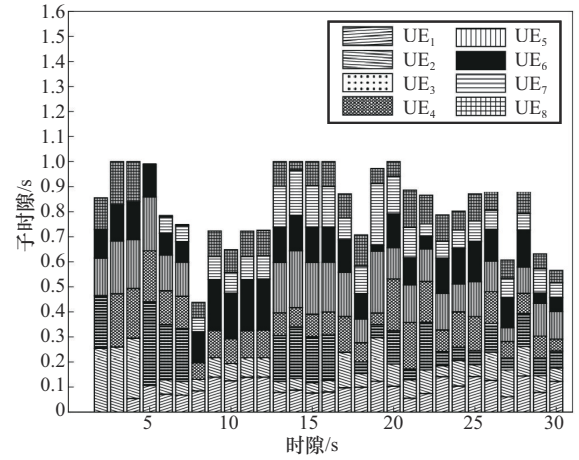


图 14 UE 卸载到 UAV 的时间比例

4 结束语

本文研究了一种新的 RIS 辅助 UAV-EC 网络。具体而言，由 UAV 与 RIS 协同进行任务卸载、UAV 与地面 BS 协同进行任务计算。并构建了一个 UAV 轨迹、卸载时隙分配、RIS 相移、UE 传输功率以及 CPU 频率分配的联合优化问题，目标是在保证任务队列稳定性约束下最小化网络平均能耗。提出了一种基于 Lyapunov 优化和 BCD 法的算法对所构建问题进行求解。实验结果表明，相比其他基准方案，本文方法在降低能耗上有更好的性能。同时也表明了 RIS 相移优化和 UAV-BS 协同的重要性。

附录 1 引理 1 的证明

根据 $Q_k(n)$ 和 $X_k(n)$ 的更新规则，结合 $([a - b]^+ + c)^2 \leq a^2 + b^2 + c^2 + 2a(c - b)$, $a, b, c > 0$, 可以得到

$$Q_{k+1}^2(n) = (\max\{Q_k(n) - l_k^{\text{loc}}[n] - l_k^{\text{off}}[n], 0\} + A_k[n])^2 \leq Q_k^2(n) + A_k^2(n) + (l_k^{\text{loc}}[n] + l_k^{\text{off}}[n])^2 + 2Q_k(n)(A_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n] - l_k^{\text{off}}[n]) \quad (45)$$

$$X_{k+1}^2(n) = (\max\{X_k(n) - l_{u,k}[n] - l_{u,k,s}^{\text{off}}[n], 0\} + l_k^{\text{off}}[n])^2 \leq X_k^2(n) + (l_k^{\text{off}}[n])^2 + (l_{u,k}[n] + l_{u,k,s}^{\text{off}}[n])^2 + 2Q_k(n)(l_k^{\text{off}}[n] - l_{u,k}[n] - l_{u,k,s}^{\text{off}}[n]) \quad (46)$$

因此，当前时隙与过去时隙之间的 Lyapunov 函数之差可以计算为

$$U(\mathcal{X}(n+1)) - U(\mathcal{X}(n)) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathcal{K}} \{Q_k^2(n+1) - Q_k^2(n)\} + \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathcal{K}} \{X_k^2(n+1) - X_k^2(n)\} \leq C + \sum_{k \in \mathcal{K}} \{Q_k(n)(A_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n] - l_k^{\text{off}}[n])\} +$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \left\{ X_k(n) \left(l_k^{\text{off}}[n] - l_{u,k}[n] - l_{u,k,s}^{\text{off}}[n] \right) \right\} \quad (47)$$

其中, C 是一个常数, 它有上界并且满足式(48).

$$C = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathcal{K}} \left\{ A_{k,\max}^2(n) + (l_{k,\max}^{\text{loc}}[n] + l_{k,\max}^{\text{off}}[n])^2 + (l_{k,\max}^{\text{off}}[n])^2 + (l_{u,k,\max}[n] + l_{u,k,s,\max}^{\text{off}}[n])^2 \right\} \quad (48)$$

其中, $l_{k,\max}^{\text{off}}[n] = \delta \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{k,\max}[n] |h_{u,k}[n]|^2}{\sigma^2} \right)$, $l_{u,k,s,\max}^{\text{off}}[n] =$

$$\delta \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{k,\max}[n] G_{u,k,s}[n]}{\sigma^2} \right), \quad l_{k,\max}^{\text{loc}}[n] = \frac{\delta f_{k,\max}[n]}{C_n}.$$

将式(43)和式(44)代入 Lyapunov 漂移惩罚函数得到上界, 表示为

$$\begin{aligned} D(\mathcal{X}(n)) &= \Delta U(\mathcal{X}(n)) + VE[E_{\text{total}}[n] | \mathcal{X}(n)] \leq \\ &C + E \left[\sum_{k \in \mathcal{K}} \left\{ Q_k(n) (A_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n] - l_k^{\text{off}}[n]) \right\} \right] + \\ &E \left[\sum_{k \in \mathcal{K}} \left\{ X_k(n) (l_k^{\text{off}}[n] - l_{u,k}[n] - l_{u,k,s}^{\text{off}}[n]) \right\} \right] + \\ &VE[E_{\text{total}}[n] | \mathcal{X}(n)] \end{aligned} \quad (49)$$

证毕。

附录2 引理3的证明

为了便于讨论, 定义一个函数 $f(x,y) = \text{lb} \left[1 + \frac{A}{x^2} + \frac{B}{x^{\frac{a_1}{4}} y^{\frac{a_2}{2}}} \right]$, $x,y > 0, a_1, a_2 > 1$, 为了证明函数 $f(x,y)$ 的凸

性, 首先推导出它的 Hessian 矩阵为

$$\nabla^2 f(x,y) = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} \\ f_{yx} & f_{yy} \end{bmatrix} \quad (50)$$

f_{xx} 、 f_{xy} 、 f_{yx} 和 f_{yy} 分别为

$$\begin{aligned} f_{xx} &= \frac{\alpha_1 y^{\frac{\alpha_2}{4}}}{16x^2 L^2} \left(8A^2 y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + 4B^2 x^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\frac{\alpha_2}{4}} + \right. \\ &4BCx^{\frac{3\alpha_1}{4}} + 8Ax^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + 4Bx^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + 12Ax^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{2}} \\ &8ACx^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\frac{\alpha_2}{4}} + 4Ax^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + Ba_1 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + \\ &\left. BCa_1 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} + ABa_1 x^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + 4ACa_1 x^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\frac{\alpha_2}{4}} \right) \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} f_{xy} = f_{yx} &= \frac{Ba_1}{16 \left(Ax^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{8}} + Cx^{\frac{3\alpha_1}{8}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} \right) + \frac{B}{x^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}}} + 1} \\ &\left(\frac{Aa_1}{2x^{\frac{\alpha_1}{2}+1}} + \frac{Ba_1}{4x^{\frac{\alpha_1}{4}+1} y^{\frac{\alpha_2}{4}}} \right) \left(\frac{Ca_2}{2L^2 y^{\frac{\alpha_1}{2}+1}} + \frac{Ba_2}{4L^2 x^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}+1}} \right) \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} f_{yy} &= \left(Ca_2 \frac{\alpha_1 + 2}{2Ly^{\frac{\alpha_2}{2}+2}} + \frac{Ba_2 \left(\frac{\alpha_2}{4} + 1 \right)}{4Lx^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}+2}} \right) - \\ &\left(\frac{Ca_2}{2Ly^{\frac{\alpha_2}{2}+1}} + \frac{Ba_2}{4Lx^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}+1}} \right)^2 \end{aligned} \quad (53)$$

其中, $L = \frac{A}{x^{\frac{\alpha_1}{2}}} + \frac{C}{y^{\frac{\alpha_2}{2}}} + \frac{B}{x^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}}} + 1$. 然后判断 Hessian 矩阵

$\nabla^2 f(x,y)$ 是否为正半定. 因此, 依次计算 $\nabla^2 f(x,y)$ 的顺序主子式, 如式(54)和式(55)所示.

$$D_1 = f_{xx} > 0 \quad (54)$$

$$\begin{aligned} D_2 &= f_{xx} f_{yy} - f_{xy} f_{yx} = \\ &(4B^2 a_1 a_2 2x^{\alpha_1} y^{\alpha_2} + B^2 a_1 a_2^2 x^{\alpha_1} y^{\alpha_2} + \\ &B^2 a_1^2 a_2 x^{\alpha_1} y^{\alpha_2} + 4B^3 a_1 a_2 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + \\ &16ACA_1 a_2 x^{\alpha_1} y^{\alpha_2} + 8A^2 Ba_1 a_2 x^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{5\alpha_2}{4}} + \\ &2ABa_1 a_2^2 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{5\alpha_2}{4}} + 4ABa_1^2 a_2 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{5\alpha_2}{4}} + \\ &AB^2 a_1^2 a_2 x^{\alpha_1} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + AB^2 a_1^2 a_2 x^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\alpha_2} + \\ &8AC^2 a_1^2 a_2 x^{\alpha_1} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + 8A^2 Ca_1 a_2^2 a_2 x^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\alpha_2} + \\ &8B^2 Ca_1 a_2 x^{\frac{5\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}} + 4BCa_1 a_2^2 x^{\frac{5\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + \\ &2BCa_1^2 a_2 x^{\frac{5\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + B^2 Ca_1 a_2^2 x^{\alpha_1} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + \\ &B^2 Ca_1^2 a_2 x^{\alpha_1} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + 8ACA_1 a_2^2 x^{\alpha_1} y^{\alpha_2} + \\ &8ACA_1^2 a_2 x^{\alpha_1} y^{\alpha_2} + 2A^2 Ba_1 a_2^2 x^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{5\alpha_2}{4}} + \\ &ABa_1^2 a_2^2 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{5\alpha_2}{4}} + 2BC^2 a_1^2 a_2 x^{\frac{5\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}} + \\ &BCa_1^2 a_2^2 x^{\frac{5\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + 8ABa_1 a_2 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{5\alpha_2}{4}} + \\ &12AB^2 a_1 a_2 x^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\alpha_2} + 16AC^2 a_1 a_2 x^{\alpha_1} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + \\ &16A^2 Ca_1 a_2 x^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\alpha_2} + 4ACa_1^2 a_2^2 x^{\alpha_1} y^{\alpha_2} + \\ &8BCa_1 a_2 x^{\frac{5\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + 12B^2 Ca_1 a_2 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}} + \\ &6ABCa_1^2 a_2 x^{\frac{3\alpha_1}{4}} y^{\frac{3\alpha_2}{4}}) \end{aligned} \quad (55)$$

$$\left(64x^2 y^2 \left(Ay^{\frac{\alpha_2}{2}} + Cx^{\frac{\alpha_1}{2}} + x^{\frac{\alpha_1}{2}} y^{\frac{\alpha_2}{2}} + Bx^{\frac{\alpha_1}{4}} y^{\frac{\alpha_2}{4}} \right)^3 \right) > 0$$

可以看出, $\nabla^2 f(x,y)$ 的顺序主子式都为正半定, 这表明函数 $f(x,y)$ 是凸的. 因此可得, 式(39)中的 $l_{u,k,s}^{\text{off}}[n]$ 是关于 $\lambda[n]$ 和 $v[n]$ 的联合凸函数. 证毕。

参考文献:

[1] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading[J]. IEEE Communications Surveys &

- Tutorials, 2017, 19(3): 1628-1656.
- [2] TAN L, KUANG Z F, ZHAO L, et al. Energy-efficient joint task offloading and resource allocation in OFDMA-based collaborative edge computing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(3): 1960-1972.
- [3] 屈毓铤, 秦秦, 马靖豪, 等. 面向空地协同移动边缘计算的服务布置策略[J]. *计算机学报*, 2022, 45(4): 781-797.
- QU Y B, QIN Z, MA J H, et al. Service provisioning for air-ground collaborative mobile edge computing[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2022, 45(4): 781-797.
- [4] 张斐斐, 葛季栋, 李忠金, 等. 边缘计算中协作计算卸载与动态任务调度度[J]. *软件学报*, 2023, 34(12): 5737-5756.
- ZHANG F F, GE J D, LI Z J, et al. Cooperative computation offloading and dynamic task scheduling in edge computing[J]. *Journal of Software*, 2023, 34(12): 5737-5756.
- [5] 邝祝芳, 陈清林, 李林峰, 等. 基于深度强化学习的多用户边缘计算任务卸载调度与资源分配算法[J]. *计算机学报*, 2022, 45(4): 812-824.
- KUANG Z F, CHEN Q L, LI L F, et al. Multi-user edge computing task offloading scheduling and resource allocation based on deep reinforcement learning[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2022, 45(4): 812-824.
- [6] 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.
- [7] WANG D, TIAN J, ZHANG H X, et al. Task offloading and trajectory scheduling for UAV-enabled MEC networks: an optimal transport theory perspective[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(1): 150-154.
- [8] CHEN Y, LI K X, WU Y, et al. Energy efficient task offloading and resource allocation in air-ground integrated MEC systems: a distributed online approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024, 23(8): 8129-8142.
- [9] MAO W H, XIONG K, LU Y, et al. Energy consumption minimization in secure multi-antenna UAV-assisted MEC networks with channel uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 7185-7200.
- [10] XU B, KUANG Z F, GAO J, et al. Joint offloading decision and trajectory design for UAV-enabled edge computing with task dependency[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(8): 5043-5055.
- [11] ZENG Y P, CHEN S S, CUI Y P, et al. Joint resource allocation and trajectory optimization in UAV-enabled wirelessly powered MEC for large area[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(17): 15705-15722.
- [12] WANG H, ZHANG H J, LIU X N, et al. Joint UAV placement optimization, resource allocation, and computation offloading for THz band: a DRL approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(7): 4890-4900.
- [13] HAN Z H, ZHOU T, XU T H, et al. Joint user association and deployment optimization for delay-minimized UAV-aided MEC networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(10): 1791-1795.
- [14] PERVEZ F, SULTANA A, YANG C G, et al. Energy and latency efficient joint communication and computation optimization in a multi-UAV-assisted MEC network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(3): 1728-1741.
- [15] GU X H, ZHANG G A, WANG M X, et al. UAV-aided energy-efficient edge computing networks: security offloading optimization[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(6): 4245-4258.
- [16] WU Q H, CHEN J X, XU Y H, et al. Joint computation offloading, role, and location selection in hierarchical multicoalition UAV MEC networks: a stackelberg game learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(19): 18293-18304.
- [17] WU G X, LIU Q, XU J F, et al. Energy efficient task caching and offloading in UAV-enabled crowd management[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(18): 17565-17572.
- [18] SHANG B D, LIU L J. Mobile-edge computing in the sky: energy optimization for air-ground integrated networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(8): 7443-7456.
- [19] XU C Y, ZHAN C, YANG H L, et al. Pareto-optimal aerial-ground energy minimization for aerial 3D mobile edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(5): 7218-7233.
- [20] XU Y, ZHANG T K, LIU Y W, et al. Cellular-connected multi-UAV MEC networks: an online stochastic optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(10): 6630-6647.
- [21] KUANG Z F, PAN Y H, YANG F, et al. Joint task offloading scheduling and resource allocation in air-ground cooperation UAV-enabled mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(4): 5796-5807.
- [22] RENZO M D, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2450-2525.
- [23] MEI H B, YANG K, LIU Q, et al. 3D-trajectory and phase-shift design for RIS-assisted UAV systems using deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3): 3020-3029.
- [24] HUANG Z Q, KUANG Z F, LIN S Y, et al. Energy-efficient joint trajectory and reflecting design in IRS-enabled UAV edge computing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(12): 21872-21884.
- [25] 李斌, 刘文帅, 谢万城, 等. 智能反射面赋能无人机边缘网络计算卸载方案[J]. *通信学报*, 2022, 43(10): 223-233.

- LI B, LIU W S, XIE W C, et al. Computation offloading scheme for RIS-empowered UAV edge network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(10): 223-233.
- [26] 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, 9(20): 20590-20603.
- [27] ZHANG J, ZHOU L, TANG Q, et al. Stochastic computation offloading and trajectory scheduling for UAV-assisted mobile edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3688-3699.
- [28] YANG Z Y, BI S Z, ZHANG Y J A. Online trajectory and resource optimization for stochastic UAV-enabled MEC systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(7): 5629-5643.
- [29] HU H, CHEN Z, ZHOU F H, et al. Joint resource and trajectory optimization for heterogeneous-UAVs enabled aerial-ground cooperative computing networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 8812-8826.
- [30] CHEN J X, XU Y H, WU Q H, 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.

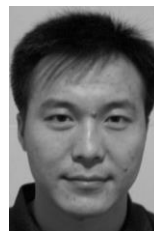
[作者简介]



邝祝芳 (1982-), 男, 湖南耒阳人, 博士, 中南林业科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网、边缘计算、大数据分析、人工智能。



郭宇敬 (1998-), 男, 湖南邵阳人, 中南林业科技大学硕士生, 主要研究方向为物联网、边缘计算。



邓晓衡 (1974-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网、边缘计算。