

# 智能反射面赋能无人机边缘网络计算卸载方案

李斌<sup>1</sup>, 刘文帅<sup>1</sup>, 谢万城<sup>1</sup>, 费泽松<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学计算机与软件学院, 江苏 南京 210044; 2. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对无人机辅助边缘计算城市场景, 因无人机与地面用户之间的任务卸载链路易受障碍物遮挡而造成卸载速率低的问题, 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。联合考虑任务分配、用户发射功率、智能反射面相移矩阵、无人机计算资源分配以及无人机轨迹, 建立了一个用户最小平均数据吞吐量最大化问题。由于该问题是一个随机优化问题, 且优化变量之间密切耦合, 难以直接求解。因此, 首先通过利用数学期望的性质, 将随机优化问题转换为确定性优化问题; 其次, 利用块坐标下降算法将确定性优化问题分解为 3 个子问题, 并通过引入辅助变量、利用连续凸近似和半定松弛技术将非凸问题转换为凸优化问题, 进而得到问题的近似次优解。仿真结果表明, 所提方案具有良好的收敛性能, 并有效地提高了地面用户的平均数据吞吐量。

**关键词:** 无人机通信; 移动边缘计算; 智能反射面; 计算卸载; 资源分配

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022196

## Computation offloading scheme for RIS-empowered UAV edge network

LI Bin<sup>1</sup>, LIU Wenshuai<sup>1</sup>, XIE Wancheng<sup>1</sup>, FEI Zesong<sup>2</sup>

1. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract:** In order to address the challenge of low offloading rate caused by the obstacles blocking in the links between unmanned aerial vehicle (UAV) and ground users (GU) in urban scene, a partial task offloading scheme for UAV-enabled mobile edge computing with the aid of reconfigurable intelligence surface was proposed. A nonconvex and multivariable coupling stochastic optimization problem was formulated by the joint design of the computation task allocation, the transmit power of GU, the phase shift of RIS, UAV computation resource, and UAV trajectory, aiming at maximizing the minimum average data throughput of GU. By leveraging the properties of mathematical expectation, the stochastic optimization problem was transformed into a deterministic optimization problem. Then, the deterministic optimization problem was decomposed into three subproblems by using the block coordinate descent (BCD) algorithm. By introducing auxiliary variables, the nonconvex problems were transformed into convex optimization problems via the successive convex approximation and semidefinite relaxation, and then the approximate suboptimal solution of the original problem was obtained. The simulation results show that the proposed algorithm has good convergence performance and effectively improves the average data throughput of GU.

**Keywords:** UAV communication, mobile edge computing, reconfigurable intelligent surface, computation offloading, resource allocation

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2022-09-26

通信作者: 费泽松, feizesong@139.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFB1806900); 国家自然科学基金资助项目 (No.62101277); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20200822); 江苏省研究生科研与实践创新计划基金资助项目 (No.KYCX22\_1204)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806900), The National Natural Science Foundation of China (No.62101277), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20200822), Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX22\_1204)

## 0 引言

随着移动通信网络的飞速发展,未来网络将呈现立体化、智能化和绿色等通信特征,并实现万物之间的泛在连接<sup>[1-2]</sup>。为实现这些要求,网络中的服务质量和应用体验需要显著提高,进而对物联网设备的计算资源与通信资源有了更高的要求。近年来,无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)辅助移动边缘计算(MEC, mobile edge computing)被认为是解决资源受限设备与资源匮乏应用之间的紧张关系的桥梁,并能提高通信和计算效率<sup>[3]</sup>。具体而言,地面用户(GU, ground user)可以将部分任务卸载到具有强大计算能力的MEC服务器,以保障低时延和低能耗服务。另一方面,由于UAV的高机动性、灵活部署和低成本<sup>[4-5]</sup>,作为空中MEC节点的UAV可以快速部署在需要通信的场景,为GU提供视距(LoS, line-of-sight)链路连接,并带来更高的信道增益,进而降低通信成本。

目前,关于UAV辅助MEC的研究已取得了许多有价值的成果。例如,文献[6]研究了一种UAV辅助MEC网络,该网络联合优化UAV轨迹、用户发射功率和计算资源分配以最大化MEC网络的能效。文献[7]考虑公平性任务调度条件,通过联合优化UAV轨迹和资源分配以最小化UAV能耗。文献[8]研究了UAV辅助的MEC网络安全卸载问题,使用一台UAV作为边缘服务器,另一台作为干扰器以压制恶意窃听者信号,进而提出用户最小安全计算量最大化问题。文献[9]使用多智能体深度强化学习方案研究了多UAV移动边缘计算网络中负载均衡问题。文献[10]研究了工作在全双工模式的多UAV边缘网络,通过联合优化用户关联和资源分配,构建了系统能耗最小化问题。在空地协同网络中,文献[11]研究了空地协同MEC网络中服务布置问题。针对用户移动的场景,文献[12]提出一种基于李雅普诺夫在线优化的方法以最小化系统加权总能耗。上述大部分研究工作将UAV与用户通信环境视为视距链路,然而,在复杂的通信网络环境下,如城市建筑密集区,UAV与GU的直连链路可能会受到障碍物的遮挡,从而严重影响MEC网络的性能。

电磁超导体材料的发展推动了智能反射面(RIS, reconfigurable intelligent surface)的研究。RIS的低功耗、高能效等特性以及无线通信传输环

境重构功能引起了业界的广泛关注<sup>[13-16]</sup>。为了解决在复杂通信网络环境中GU与UAV卸载链路受阻的问题,将RIS引入现有的UAV边缘网络是一种互惠共赢的解决方案<sup>[17-19]</sup>。最近,文献[20]针对RIS赋能的UAV通信网络,联合优化UAV部署位置、用户解码顺序、UAV发射功率和RIS相移矩阵以最大化网络总吞吐量,并与无RIS的方案相比,有效地提升了网络性能。文献[21]研究了RIS赋能的UAV无线供能网络,通过联合优化UAV飞行轨迹、RIS相移矩阵以及UAV悬停时间以最小化UAV总能耗。面向RIS赋能UAV边缘计算网络,文献[22]使用基于深度强化学习的方法以最小化UAV的总能耗。

上述工作展现了RIS赋能UAV通信网络的优势。然而,在更加复杂的通信环境中,RIS赋能UAV边缘计算网络尚未得到深入研究。为了进一步提高MEC网络吞吐量,考虑更加真实的无线通信环境,对RIS赋能UAV边缘计算网络资源分配和轨迹优化算法的研究具有重要的理论意义和现实价值。

本文主要的研究工作如下。

1) 基于城市复杂通信场景,提出了一种RIS赋能UAV移动边缘计算部分任务卸载方案。同时满足发射功率约束、GU平均功率约束、时延约束、UAV轨迹约束、计算资源约束和RIS相移约束,建立所有GU的最小平均吞吐量最大化问题。该问题是一个随机、非凸、非线性、多变量密切耦合的优化问题,难以求得最优解。

2) 利用数学期望的性质,将含有随机变量的约束条件和目标函数转换为确定性的形式。首先,基于交替优化算法将原问题解耦,并转化为3个子问题。其次,利用连续凸近似、一阶泰勒展开和半定松弛等方法,将非凸问题转换为凸优化问题。最后,通过块坐标下降(BCD, block coordinate descent)算法对子问题逐个求解。

3) 分析了计算复杂度和收敛性。仿真结果表明,所提BCD算法的收敛性能较好,并且有效提升了网络的吞吐量,与传统方案相比,利用RIS可以有效提升MEC网络性能。

## 1 系统模型及问题描述

考虑到城市环境,UAV与GU之间的通信链路易受障碍物的遮挡而影响GU的上行卸载速率,为此本文引入RIS技术动态调整入射信号的传输环境以缓解任务卸载速率低的问题。系统模型如图1所示。

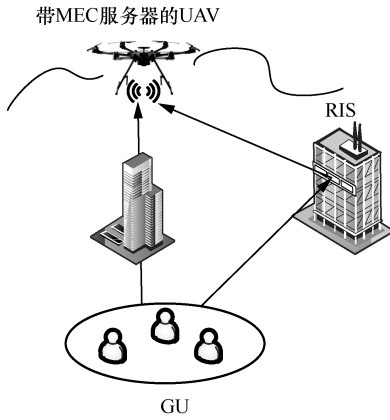


图 1 系统模型

该系统模型包括一个单天线 UAV,  $K$  个单天线 GU 以及一个含有  $M$  个反射元件的 RIS。该 UAV 搭载 MEC 服务器为 GU 提供实时计算服务。为了便于表述和分析, 定义 GU 和 RIS 反射单元的集合分别为  $\forall k \in \mathcal{K} \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$ ,  $\forall m \in \mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$ 。假设 UAV 的飞行周期为  $T$ , 飞行高度为  $H$ , 为了使 UAV 的位置相对 GU 保持近似不变, 将  $T$  分割为长度为  $\delta_t = \frac{T}{N}$  的足够小时隙, 且仅在不同时隙下 UAV 的位置发生变化, 记时隙集合为  $\mathcal{N} \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$ 。采用三维笛卡儿坐标系, UAV 在第  $n$  个时隙内的位置为  $\mathbf{q}[n] = [x[n], y[n], H]^T$ , GU  $k$  的位置固定为  $\mathbf{w}_k = [x_k, y_k, 0]^T$ , RIS 的位置固定为  $\mathbf{w}_1 = [x_1, y_1, H_1]^T$ 。UAV 在每个时隙内的位移变化与飞行速度有关, 且 UAV 在飞行周期结束后返回起点, UAV 应满足以下位移约束

$$C1: \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\| \leq V_{\max} \delta_t, \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (1)$$

$$C2: \mathbf{q}[1] = \mathbf{q}_s, \mathbf{q}[N] = \mathbf{q}_e \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{q}_s$  和  $\mathbf{q}_e$  分别为 UAV 的飞行起点和终点,  $V_{\max}$  为 UAV 最大飞行速度。为了便于分析, 本文假设 RIS 使用均匀线性阵列 (ULA, uniform linear array) 建模, 且每个反射元件能够在调整入射信号的相位后进行反射。在第  $n$  个时隙中, RIS 的相移矩阵为

$$\mathbf{\Theta}[n] = \text{diag}\{\beta_1[n]e^{j\theta_1[n]}, \beta_2[n]e^{j\theta_2[n]}, \dots, \beta_m[n]e^{j\theta_m[n]}\}$$

其中,  $\beta_m[n] \in [0, 1]$  为反射系数,  $\theta_m[n] \in [0, 2\pi)$  为反射角, 通常假设  $\beta_m[n] = 1$ 。

### 1.1 通信模型

实际通信环境中, 应根据节点间的不同信道特性分别建模。由于 UAV 飞行在低空, RIS 通常部署在建筑物上, 因此 RIS 与 UAV (用 I-U 表示) 之间

不受障碍物遮挡, I-U 链路可采用视距信道模型。由于城市通信环境较复杂, GU  $k$  与 UAV (用 GU  $k$ -U 表示) 之间的链路易受障碍物遮挡, 假设 GU  $k$ -U 之间不存在视距链路, 故 GU  $k$ -U 之间的链路可采用 Rayleigh 衰落信道模型。此外, GU  $k$  与 RIS (用 GU  $k$ -I 表示) 的周围存在局部散射, 因此 GU  $k$ -I 链路可采用 Rician 衰落信道模型。此时, 在时隙  $n$  内, I-U、GU  $k$ -U 和 GU  $k$ -I 链路之间的信道增益分别记为  $\mathbf{h}_{1,U}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ,  $\mathbf{h}_{k,U}[n] \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$  和  $\mathbf{h}_{k,I}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ , 则

$$\mathbf{h}_{1,U}[n] = \sqrt{\frac{\beta_0}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_1\|^2}} \bar{\mathbf{h}}[n], \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (3)$$

$$h_{k,U}[n] = \sqrt{\frac{\beta_0}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_k\|^\alpha}} \tilde{h}[n], \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (4)$$

$$h_{k,I}[n] = \sqrt{\frac{\beta_0}{\|\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_k\|^\gamma}} \left( \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \mathbf{h}_{k,I}^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{\kappa+1}} \mathbf{h}_{k,I}^{\text{NLoS}} \right) \quad (5)$$

其中,  $\beta_0$  为单位距离下信道功率增益;  $\alpha$  和  $\gamma$  为路径损耗指数, 且  $\alpha \geq 2, \gamma \geq 2$ ;

$$\bar{\mathbf{h}}[n] = \left[ 1, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos \phi[n]}, \dots, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} (M-1) \cos \phi[n]} \right]^T;$$

$$\mathbf{h}_{k,I}^{\text{LoS}} = \left[ 1, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos \phi_k}, \dots, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} (M-1) \cos \phi_k} \right]^T, \quad \lambda \text{ 为载波波}$$

长,  $d$  为 RIS 反射元件间距离,  $\cos \phi[n] = \frac{x[n] - x_R}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_R\|}$

为时隙  $n$  中 I-U 链路信号偏离角的余弦值,

$\cos \phi_k = \frac{x_1 - x_k}{\|\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_k\|}$  为时隙  $n$  中 GU  $k$ -I 链路信号到达

角的余弦值;  $\tilde{h}[n]$  服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布;  $\mathbf{h}_{k,I}^{\text{NLoS}}$  服从均值为 1、协方差矩阵为单位矩阵的复高斯分布。

为了避免用户间的干扰, 本文采用频分多址技术进行通信, 假设网络总带宽为  $B_t$ , 用户采取等分带宽的方式, 则单个用户的带宽为  $B = \frac{B_t}{K}$ 。因此,

在时隙  $n$  内 GU  $k$  实现的卸载速率为

$$R_k[n] = B \text{lb} \left( 1 + \frac{h_k[n] p_k[n]}{\sigma^2} \right) \quad (6)$$

其中,  $\sigma^2$  为高斯白噪声功率,  $p_k[n]$  为 GU  $k$  的发射功率,  $h_k[n] = |h_{k,U}[n] + \mathbf{h}_{1,U}^H[n] \mathbf{\Theta}[n] \mathbf{h}_{k,I}[n]|^2$ 。

### 1.2 计算模型

假设 GU 在每个时隙内产生一个计算密集型任务，且该任务可以划分为独立执行的两部分，然而 GU 的计算能力和电池容量有限，GU 需在  $\delta_i$  内完成计算，所以需要将部分任务卸载至边缘服务器上处理。定义 GU  $k$  在时隙  $n$  中产生的任务量为  $L_k[n]$ ，划分后的本地任务量为  $l_k^{\text{loc}}[n]$ ，卸载至边缘服务器的任务量为  $L_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n]$ 。

定义 GU  $k$  的最大计算频率为  $F_k^{\text{max}}$ ，CPU 计算每比特数所需的周期数为  $c_k$ ， $\varepsilon$  为 CPU 的有效电容系数， $f_k$  为 UAV 为 GU  $k$  提供的计算频率资源，并满足  $\sum_{k=1}^K f_k[n] \leq F_s^{\text{max}}$ ， $F_s^{\text{max}}$  为 UAV 上 CPU 最大计算频率。由于计算出来的结果通常很小，因此回传给用户的时延可以忽略。因此，上述计算方式需要满足如下约束

$$\text{C3: } c_k l_k^{\text{loc}}[n] \leq \delta_i F_k^{\text{max}}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (7)$$

$$\text{C4: } \sum_{k=1}^K f_k[n] \leq F_s^{\text{max}}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (8)$$

$$\text{C5: } 0 \leq f_k[n] \leq F_s^{\text{max}}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (9)$$

$$\text{C6: } c_k \delta_i R_k[n] \leq \delta_i f_k[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (10)$$

$$\text{C7: } \delta_i R_k[n] \geq L_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (11)$$

考虑本地计算采用动态电压频率缩放技术，GU 可以自适应地调整其计算频率，以减少能耗或缩短计算时延，则 GU  $k$  的计算能耗可表示为  $\frac{\varepsilon(c_k l_k^{\text{loc}}[n])^3}{\delta_i^2}$ 。

因此，GU  $k$  的平均吞吐量可以定义为

$$\bar{R}_k = \frac{1}{T} \left\{ \delta_i \sum_{n=1}^N R_k[n] + \sum_{n=1}^N l_k^{\text{loc}}[n] \right\}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (12)$$

### 1.3 问题描述

假设 UAV 可以获得完美的信道状态信息，通过联合优化本地处理任务量  $\mathbf{l} \triangleq \{l_k[n], \forall k, n\}$ 、发射功率  $\mathbf{p} \triangleq \{p_k[n], \forall k, n\}$ 、RIS 相移矩阵  $\boldsymbol{\Theta} \triangleq \{\boldsymbol{\Theta}_m[n], \forall m, n\}$ 、UAV 计算资源分配  $\mathbf{f} \triangleq \{f_k[n], \forall k, n\}$  以及 UAV 飞行轨迹  $\mathbf{q} \triangleq \{q[n], \forall n\}$ ，在时延和能耗的约束下最大化所有 GU 间最小平均吞吐量，其优化问题表述如下

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mathbf{p}, \mathbf{l}, \mathbf{f}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\Theta}\}} \min_{\forall k} \bar{R}_k \\ & \text{s.t. C1} \sim \text{C7} \end{aligned}$$

$$\text{C8: } 0 \leq p_k[n] \leq P_k^{\text{max}}$$

$$\begin{aligned} \text{C9: } & \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N \left( \frac{\varepsilon(c_k l_k^{\text{loc}}[n])^3}{\delta_i^2} + \delta_i p_k[n] \right) \leq \bar{P}_k \\ \text{C10: } & 0 \leq \theta_m[n] < 2\pi \end{aligned} \quad (13)$$

其中， $P_k^{\text{max}}$  是 GU  $k$  的最大发射功率， $\bar{P}_k$  是 GU  $k$  的平均总功率。约束条件 C1 和 C2 是 UAV 位移约束，约束条件 C3~C7 是 MEC 网络完成计算需要满足的约束，约束条件 C8 和 C9 为 GU  $k$  功率约束，约束条件 C10 为 RIS 相移调节范围。由于信道建模具有随机变量，故式(13)是一类具有随机性的非凸优化问题，难以直接求解。

## 2 优化问题转换及求解

### 2.1 优化问题转换

由于式(12)中  $R_k[n]$  为随机变量，本节采取使用数学期望  $\mathbb{E}\{R_k[n]\}$  对其进行分析。由于  $R_k[n]$  的概率分布难以得到闭式解析式，因此难以找到  $\mathbb{E}\{R_k[n]\}$  闭式解，故使用引理 1 中的推论 1 近似  $R_k[n]$ 。

**引理 1** 如果  $X$  是非负随机变量， $Y$  是正随机变量，且  $X$  和  $Y$  独立，对于任意  $a > 0$  且  $b > 0$ ，以下近似结果成立<sup>[20]</sup>。

$$\mathbb{E} \left\{ \text{lb} \left( 1 + \frac{aX}{bY} \right) \right\} \approx \mathbb{E} \left\{ \text{lb} \left( 1 + \frac{a\mathbb{E}\{X\}}{b\mathbb{E}\{Y\}} \right) \right\} \quad (14)$$

**推论 1** 如果  $X$  是非负随机变量，对于任意  $a > 0$  且  $b > 0$ ，以下近似结果成立。

$$\mathbb{E} \left\{ \text{lb} \left( 1 + \frac{aX}{b} \right) \right\} \approx \mathbb{E} \left\{ \text{lb} \left( 1 + \frac{a\mathbb{E}\{X\}}{b} \right) \right\} \quad (15)$$

**证明** 由于常数是随机变量，而满足均值为其自身，方差为 0。同时，常数与任意随机变量独立。因此，不妨选取  $Y$  就是常数 1。将其代入引理 1，推论 1 得证。

首先，计算  $h_k[n]$  的数学期望。

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{h_k[n]\} &= \mathbb{E} \left\{ \left| h_{k,U}[n] + \mathbf{h}_{1,U}^H[n] \boldsymbol{\Theta}[n] \mathbf{h}_{k,I} \right|^2 \right\} = \\ &= \mathbb{E} \left\{ \left| h_{k,U}[n] + \mathbf{h}_{1,U}^H[n] \boldsymbol{\Theta}[n] (\hat{\mathbf{h}}_{k,I} + \check{\mathbf{h}}_{k,I}) \right|^2 \right\} = \\ &= \mathbb{E} \left\{ |h_{k,U}[n]|^2 \right\} + \mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{h}_{1,U}^H[n] \boldsymbol{\Theta}[n] \hat{\mathbf{h}}_{k,I} \right|^2 \right\} + \\ &= \mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{h}_{1,U}^H[n] \boldsymbol{\Theta}[n] \check{\mathbf{h}}_{k,I} \right|^2 \right\} = \\ &= \frac{\beta_0}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_k\|^\alpha} + \frac{M \beta_0 (\beta_0 - \vartheta)}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_1\|^2 \|\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_k\|^\gamma} + \\ &= \left| \mathbf{h}_{1,U}^H[n] \boldsymbol{\Theta}[n] \check{\mathbf{h}}_{k,I} \right|^2 \triangleq \xi_k[n] \end{aligned} \quad (16)$$

其中,  $\hat{\mathbf{h}}_{k,1} = \sqrt{\frac{\mathcal{G}}{\|\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_k\|^\gamma}} \mathbf{h}_{k,1}^{\text{LoS}}$ ,  $\tilde{\mathbf{h}}_{k,1} = \sqrt{\frac{\beta_0 - \mathcal{G}}{\|\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_k\|^\gamma}} \mathbf{h}_{k,1}^{\text{NLoS}}$ ,  $\mathcal{G} = \frac{\beta_0 \mathcal{K}}{\mathcal{K} + 1}$ 。则有

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{R_k[n]\} &\approx B \mathbb{E}\left\{\text{lb}\left(1 + \frac{p_k[n] \mathbb{E}\{h_k[n]\}}{\sigma^2}\right)\right\} = \\ &B \text{lb}\left(1 + \frac{p_k[n] \xi_k[n]}{\sigma^2}\right) \triangleq \tilde{R}_k[n] \end{aligned} \quad (17)$$

根据上述分析, 式(13)的目标函数可以描述为

$$\hat{R}_k = \frac{1}{T} \left\{ \delta_i \sum_{n=1}^N \tilde{R}_k[n] + \sum_{n=1}^N l_k^{\text{loc}}[n] \right\}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (18)$$

因此, 式(13)可以转换为

$$\begin{aligned} &\max_{\{p,l,f,q,\theta\}} \min_{\forall k} \hat{R}_k \\ &\text{s.t. C1} \sim \text{C5, C8, C9, C10,} \\ &\text{C6'}: c_k \delta_i \tilde{R}_k[n] \leq \delta_i f_k[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}, \\ &\text{C7'}: \delta_i \tilde{R}_k[n] \geq L_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (19)$$

进一步地, 式(19)等价于

$$\begin{aligned} &\max_{\{p,l,f,q,\theta\}} s \\ &\text{s.t. C11}: s \leq \hat{R}_k, \forall k \in \mathcal{K} \\ &\text{C1} \sim \text{C5, C8, C9, C10} \\ &\text{C6'}: c_k \delta_i \tilde{R}_k[n] \leq \delta_i f_k[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \\ &\text{C7'}: \delta_i \tilde{R}_k[n] \geq L_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (20)$$

易知, 式(20)依旧为非凸问题。为了有效求解该问题, 本文通过 BCD 算法将问题解耦为 3 个子问题, 然后分别进行求解。3 个子问题具体如下:

1) 固定 UAV 飞行轨迹和 RIS 相移矩阵, 通过连续凸近似方法求解 GU 发射功率、本地处理任务量和计算资源分配; 2) 固定 GU 发射功率、本地处理任务量、计算资源分配和 RIS 相移矩阵, 通过松弛操作以及连续凸近似求解 UAV 飞行轨迹; 3) 固定 GU 发射功率、本地任务量、计算资源分配和 UAV 飞行轨迹, 利用半定松弛技术以及罚函数法求解 RIS 相移矩阵。最后, 对所有变量进行交替优化直至收敛。

## 2.2 求解发射功率、本地处理任务量及计算资源分配

当固定 UAV 飞行轨迹和 RIS 相移矩阵时, 问题描述如下

$$\begin{aligned} &\max_{\{p,l,f\}} s \\ &\text{s.t. C3, C4, C5, C6', C7', C8} \sim \text{C11} \end{aligned} \quad (21)$$

其中, C6' 左边是关于  $p_i[n]$  的凹函数, 因此 C6' 是非凸约束, 对 C6' 进行一阶泰勒展开, 则有

$$\begin{aligned} c_k \delta_i \tilde{R}_k[n] &\leq c_k \delta_i B \text{lb}\left(1 + \frac{p_k^{(l)}[n] \xi_k[n]}{\sigma^2}\right) + \\ &c_k \delta_i B \frac{\xi_k[n] \sigma^2}{(\sigma^2 + p_k^{(l)}[n] \xi_k[n]) \ln 2} (p_k[n] - p_k^{(l)}[n]) \triangleq \\ &F_k^{\text{ub}}(p_k[n]) \end{aligned} \quad (22)$$

其中,  $p_k^{(l)}$  为在第  $l$  次迭代产生的局部点, 将 C6' 改写为如下形式

$$\text{C6''}: F_k^{\text{ub}}(p_k[n]) \leq \delta_i f_k[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (23)$$

将变换后的式(23)替换式(21)中的 C6' 后, 所得到的问题为

$$\begin{aligned} &\max_{\{p,l,f\}} s \\ &\text{s.t. C3, C4, C5, C6'', C7', C8} \sim \text{C11} \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)为标准凸优化问题, 可以借助 CVX 工具进行求解<sup>[23]</sup>。为了保证问题式(24)对子问题式(21)有较好近似效果, 此处采取连续凸近似在每次迭代中多次逼近原问题。

## 2.3 求解 UAV 飞行轨迹

当固定 GU 发射功率、本地处理任务量、计算资源分配和 RIS 相移矩阵时, 问题描述如下

$$\begin{aligned} &\max_{\{q\}} s \\ &\text{s.t. C1, C2, C6', C7', C11} \end{aligned} \quad (25)$$

由于约束 C6'、C7' 和 C11 的非凸性, 子问题式(25)难以求解。为了便于求解, 本节引入 2 个松弛变量:  $\mathbf{u}_k \triangleq \{u_k[n] > 0, \forall k, n\}$  作为  $\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_k\|$  的上界和  $\mathbf{u} \triangleq \{u[n] > 0, \forall n\}$  作为  $\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_1\|$  的上界, 则有

$$\text{C12}: (u_k[n])^2 \geq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_k\|^2, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (26)$$

$$\text{C13}: (u[n])^2 \geq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_1\|^2, \forall n \in \mathcal{N} \quad (27)$$

因此,  $\xi_k[n]$  下界可表示为

$$\begin{aligned} \text{C14}: \xi_k[n] &\leq \beta_0 (u_k[n])^{-\alpha} + \tau_k (u[n])^{-2} + A_k[n] \\ &\forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (28)$$

其中,  $\tau_k = \frac{M \beta_0 (\beta_0 - \mathcal{G})}{\|\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_k\|^\gamma}$ ,  $A_k[n] = \left| \mathbf{h}_{1,U}^H[n] \boldsymbol{\Theta}[n] \hat{\mathbf{h}}_{k,1} \right|^2$ 。

进一步引入变量  $\mathbf{B} = \{B_k[n], \forall k, n\}$ , 记  $B_k[n] = \frac{\sigma^2}{\xi_k[n]}$ 。则有

$$C15: B_k[n] \geq \frac{\sigma^2}{\xi_k[n]}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (29)$$

式(26)和式(27)是非凸约束, 对其等号左边进行一阶泰勒展开, 可得

$$C12': (u_k^{(l)}[n])^2 + 2u_k^{(l)}[n](u_k[n] - u_k^{(l)}[n]) \geq \|q[n] - w_k\|^2, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (30)$$

$$C13': (u^{(l)}[n])^2 + 2u^{(l)}[n](u_k[n] - u^{(l)}[n]) \geq \|q[n] - w_1\|^2, \forall n \in \mathcal{N} \quad (31)$$

式(28)中,  $A_k[n]$  包括偏离角, 难以直接进行处理, 因此引入式(32)所示约束。

$$\|q[n] - q^{(l)}[n]\|^2 \leq \delta_{\max}^2 \quad (32)$$

其中,  $q^{(l)}[n]$  为第  $l$  次连续凸近似的值,  $\delta_{\max}$  为 UAV 最大允许位移。当  $\delta_{\max}$  足够小时, 可近似认为每次迭代后信号偏离角保持不变。第  $(l+1)$  次迭代基于在第  $l$  次迭代中的信号偏离角。因此, 式(28)仅取决于  $u_k[n]$  和  $u[n]$ 。因此, 使用下述引理来处理该式。

**引理 2** 对于任意  $a_1 \geq 0$  且  $a_2 \geq 0$ , 当  $x_1, x_2 \geq 0$  时,  $g(x_1, x_2) = a_1(x_1)^{-\alpha} + a_2(x_2)^{-2}$  是联合凸的。

令  $\tilde{g}(u_k[n], u[n]) = \beta_0(u_k[n])^{-\alpha} + \tau_k(u[n])^{-2}$ , 因为  $\beta_0 \geq 0$ ,  $\tau_k \geq 0$ , 由引理 2 可知,  $\tilde{g}(u_k[n], u[n])$  关于  $u_k[n]$  和  $u[n]$  是联合凸的。因此式(28)是非凸约束, 对其约束右边使用一阶泰勒展开, 可得

$$\tilde{g}(u_k[n], u[n]) \geq \beta_0(u_k^{(l)}[n])^{-\alpha} + \tau_k(u^{(l)}[n])^{-2} - \alpha\beta_0(u_k^{(l)}[n])^{-\alpha-1}(u_k[n] - u_k^{(l)}[n]) - 2\tau_k(u^{(l)}[n])^{-3} \cdot (u[n] - u^{(l)}[n]) \triangleq \tilde{g}(u_k[n], u[n])^{\text{lb}} \quad (33)$$

其中,  $u_k^{(l)}[n]$  和  $u^{(l)}[n]$  是第  $l$  次迭代的值。因此, 式(28)可转换为

$$C14': \xi_k[n] \leq \tilde{g}(u_k[n], u[n])^{\text{lb}}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (34)$$

由上述分析, 约束 C7' 可改写为

$$C7'': \delta_l \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_k[n]}{B_k[n]} \right) \geq L_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (35)$$

由于  $\text{lb} \left( 1 + \frac{P_k[n]}{B_k[n]} \right)$  关于  $B_k[n]$  为凸函数, 因此松弛后约束 C6' 和 C11 依旧为非凸约束, 故对

$\text{lb} \left( 1 + \frac{P_k[n]}{B_k[n]} \right)$  进行一阶泰勒展开, 则有

$$\begin{aligned} \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_k[n]}{B_k[n]} \right) &\geq \text{Blb} \left( 1 + \frac{P_k[n]}{B_k^{(l)}[n]} \right) - \\ &B \frac{P_k[n](B_k[n] - B_k^{(l)}[n])}{B_k^{(l)}[n](B_k^{(l)}[n] + 1) \ln 2} \triangleq \\ &\psi^{\text{lb}}(B_k[n]), \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (36)$$

则约束 C6' 和约束 C11 可分别表示为

$$C6''': \delta_l \psi^{\text{lb}}(B_k[n]) \geq L_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n] \quad \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \quad (37)$$

$$C11': \sum_{n=1}^N \psi^{\text{lb}}(B_k[n]) \geq \frac{TS}{\delta_l} - \delta_l \sum_{n=1}^N l_k^{\text{loc}}[n] \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (38)$$

则子问题式(25)可重构为

$$\begin{aligned} &\max_{\{q\}} s \\ &\text{s.t. } C1, C2, C6''', C7'', C11' \\ &\quad C12', C13', C14', C15 \end{aligned} \quad (39)$$

式(39)是标准凸问题, 可以使用 CVX 工具包进行求解。

## 2.4 求解 RIS 相移矩阵

当固定 GU 发射功率、本地处理任务量、计算资源分配和 UAV 飞行轨迹时, 优化问题为

$$\begin{aligned} &\max_{\{\theta\}} s \\ &\text{s.t. } C6', C7', C10, C11 \end{aligned} \quad (40)$$

由于约束的非凸性, 式(40)是非凸的。为了处理问题式(40), 引入辅助变量  $\mathbf{a}_k^{\text{H}}[n] = \mathbf{h}_{\text{LU}}^{\text{H}}[n] \cdot \text{diag}(\hat{\mathbf{h}}_{k,1}) \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ ,  $\forall k, n$  和  $\mathbf{v}[n] = [e^{j\theta_1[n]}, e^{j\theta_2[n]}, \dots, e^{j\theta_M[n]}]^{\text{T}} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 。因此, 式(16)可写为

$$\xi_k[n] = \varpi_k[n] + \left| \mathbf{a}_k^{\text{H}}[n] \mathbf{v}[n] \right|^2 \quad (41)$$

其中,  $\varpi_k[n] = \frac{\beta_0}{\|q[n] - w_k\|^{\alpha}} + \frac{M\beta_0(\beta_0 - 9)}{\|q[n] - w_1\|^2 \|w_1 - w_k\|^{\gamma}}$ 。

记  $A_k[n] = \mathbf{a}_k[n] \mathbf{a}_k^{\text{H}}[n] \in \mathbb{C}^{M \times M}$ ,  $\forall k, n$ ,  $\mathbf{V}[n] = \mathbf{v}[n] \mathbf{v}^{\text{H}}[n] \in \mathbb{C}^{M \times M}$ ,  $\forall n$ , 则有  $\text{rank}(A_k[n]) = 1$ ,  $\text{rank}(\mathbf{V}[n]) = 1$ 。式(41)可转换为

$$\xi_k[n] = \varpi_k[n] + \text{tr}(A_k[n] \mathbf{V}[n]) \quad (42)$$

应用引理 3, 可以将  $\text{rank}(\mathbf{V}[n]) = 1$  等价于 2 个凸函数之差的形式。

**引理 3** 对半正定矩阵  $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$ , 且  $\text{tr}(\Phi) > 0$ , 则  $\text{rank}(\Phi) = 1$  等价于  $\text{tr}(\Phi) - \|\Phi\|_2 = 0$ 。

其中,  $\text{tr}(\Phi) = \sum_{n=1}^N \sigma_n(\Phi)$ ,  $\|\Phi\|_2 = \sigma_1(\Phi)$ ,  $\sigma_n(\Phi)$  为

矩阵  $\Phi$  第  $n$  大奇异值<sup>[20]</sup>。

根据引理 3，将  $\text{rank}(\mathbf{V}[n])=1$  转换形式，并将转换后的结果作为罚项添加在式(40)的目标函数中。则式(40)可重构为

$$\begin{aligned} & \max_{\theta} s - \lambda(\text{tr}(\mathbf{V}[n]) - \|\mathbf{V}[n]\|_2) \\ \text{s.t. } & \widetilde{\text{C6}}: \text{tr}(\mathbf{A}_k[n]\mathbf{V}[n]) \leq \frac{\sigma^2}{p_k[n]} \left( 2^{\frac{\delta_i f_k[n]}{\delta_i B}} - 1 \right) \\ & \widetilde{\text{C7}}: \text{tr}(\mathbf{A}_k[n]\mathbf{V}[n]) \geq \frac{\sigma^2}{p_k[n]} \left( 2^{\frac{L_k[n] - l_k^{\text{loc}}[n]}{\delta_i B}} - 1 \right) \\ & \widetilde{\text{C11}}: \sum_{n=1}^N B \text{lb} \left( 1 + \frac{p_k[n] \xi_k[n]}{\sigma^2} \right) \geq \frac{T_s}{\delta_i} + \frac{\sum_{n=1}^N l_k^{\text{loc}}[n]}{\delta_i} \\ & \text{C16}: \mathbf{V}_{m,m}[n]=1 \\ & \text{C17}: \mathbf{V}[n] \geq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

其中， $\lambda > 0$  为罚因子。式(43)目标函数是凸函数之差，故问题依旧非凸。接下来，对目标函数利用连续凸近似方法，将目标函数转换为凸函数。

对  $\|\mathbf{V}[n]\|_2$  进行一阶泰勒展开为

$$\begin{aligned} \|\mathbf{V}[n]\|_2 & \geq \|\mathbf{V}^{(l)}[n]\|_2 + \\ & \text{tr} \left( u_{\max}(\mathbf{V}^{(l)}[n]) u_{\max}(\mathbf{V}^{(l)}[n])^H (\mathbf{V}[n] - \mathbf{V}^{(l)}[n]) \right) \triangleq \\ & \left( \|\mathbf{V}[n]\|_2 \right)^{\text{lb}} \end{aligned} \quad (44)$$

其中， $u_{\max}(\mathbf{V}^{(l)}[n])$  为  $\mathbf{V}^{(l)}[n]$  最大特征值。因式(43)可转换为

$$\begin{aligned} & \max_{\theta} s - \lambda \left( \text{tr}(\mathbf{V}[n]) - \left( \|\mathbf{V}[n]\|_2 \right)^{\text{lb}} \right) \\ \text{s.t. } & \widetilde{\text{C6}}, \widetilde{\text{C7}}, \widetilde{\text{C11}}, \text{C16}, \text{C17} \end{aligned} \quad (45)$$

故式(45)是标准凸优化问题，可以使用 CVX 工具包进行求解。

### 2.5 BCD 算法设计

BCD 算法如算法 1 所示，算法具体流程如图 2 所示。

#### 算法 1 BCD 算法

初始化  $p^{(0)}, \theta^{(0)}, l^{(0)}, q^{(0)}, f^{(0)}$ ，迭代

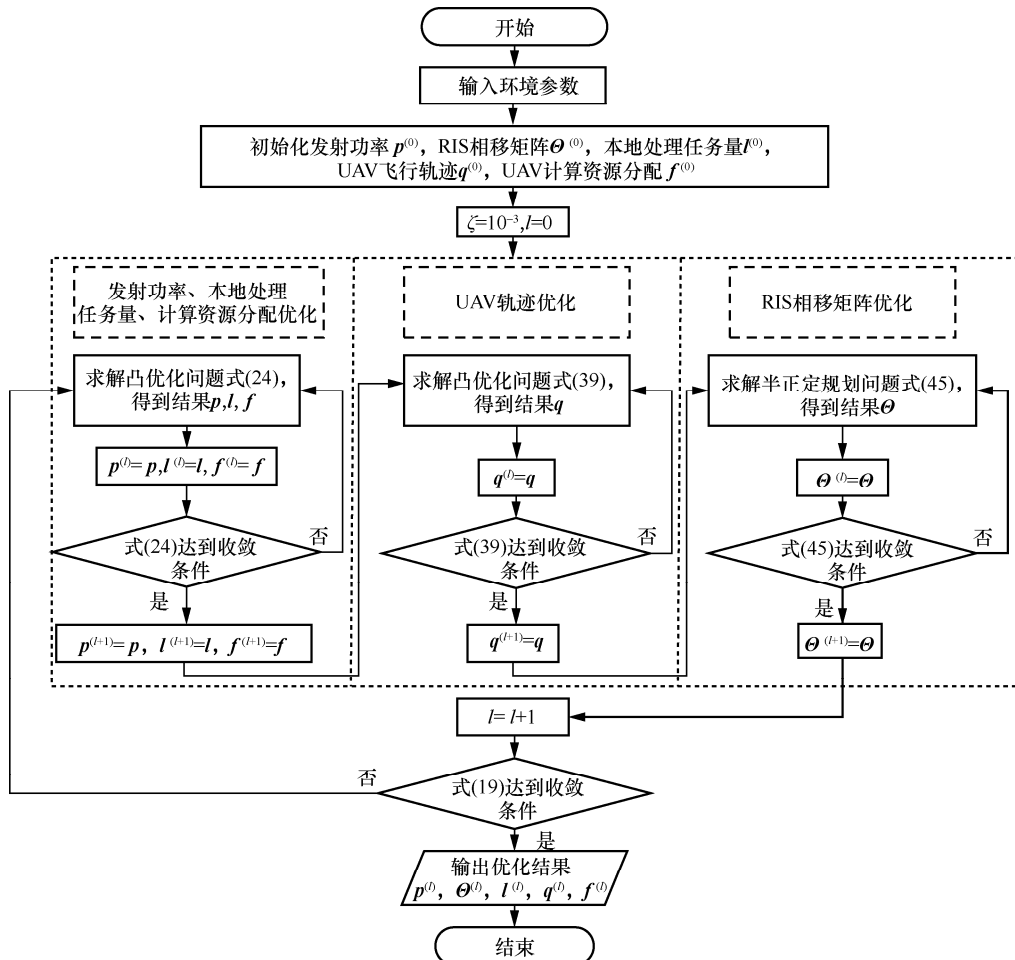


图 2 算法具体流程

精度参数  $\zeta = 10^{-3}$ ，迭代次数  $l = 0$

1) 循环

2) 给定 UAV 飞行轨迹  $\mathbf{q}^{(l)}$  和 RIS 相移矩阵  $\boldsymbol{\Theta}^{(l)}$ ，使用连续凸近似方法求解问题式(24)，得到  $\mathbf{p}^{(l+1)}$ ， $\mathbf{l}^{(l+1)}$ ， $\mathbf{f}^{(l+1)}$

3) 给定 GU 发射功率  $\mathbf{p}^{(l+1)}$ 、本地处理任务量  $\mathbf{l}^{(l+1)}$ 、计算资源分配  $\mathbf{f}^{(l+1)}$  和 RIS 相移矩阵  $\boldsymbol{\Theta}^{(l)}$  时，使用连续凸近似方法求解问题式(39)，得到  $\mathbf{q}^{(l+1)}$

4) 给定 GU 发射功率  $\mathbf{p}^{(l+1)}$ 、本地处理任务量  $\mathbf{l}^{(l+1)}$ 、计算资源分配  $\mathbf{f}^{(l+1)}$  和 UAV 飞行轨迹  $\mathbf{q}^{(l+1)}$ ，求解问题式(43)，得到  $\boldsymbol{\Theta}^{(l+1)}$

5)  $l = l + 1$

6) 直至  $\left| \min_{\forall k} \hat{R}_k^{(l)} - \min_{\forall k} \hat{R}_k^{(l-1)} \right| < \zeta$

### 3 计算复杂度与收敛性分析

#### 3.1 计算复杂度分析

优化问题式(24)包含  $3KN$  个优化变量，因此使用连续凸近似方法求解的复杂度为  $\mathcal{O}\left(\text{lb}\left(\frac{1}{\zeta}\right)(3KN)^{3.5}\right)$ 。优化问题式(39)使用连续凸近似方法求解，每次求解包括  $2N$  个变量，因此复杂度为  $\mathcal{O}\left(\text{lb}\left(\frac{1}{\zeta}\right)(2N)^{3.5}\right)$ 。优化问题式(45)由半正定规划方法求解，其复杂度为  $\mathcal{O}\left(\text{lb}\left(\frac{1}{\zeta}\right)(MN + 4)^{3.5}\right)$ 。

对于交替优化算法 1，每次迭代需要求解 3 个问题，故算法 1 的总复杂度为

$$\mathcal{O}\left(\text{lb}\left(\frac{1}{\epsilon}\right)\text{lb}\left(\frac{1}{\zeta}\right)\left((3KN)^{3.5} + (2N)^{3.5} + (M + 4)^{3.5}\right)\right) \quad (46)$$

#### 3.2 收敛性分析

设算法 1 中第  $l$  次迭代所得优化问题式(20)目标函数值为  $R(\mathbf{p}^{(l)}, \mathbf{l}^{(l)}, \mathbf{f}^{(l)}, \mathbf{q}^{(l)}, \boldsymbol{\Theta}^{(l)})$ ，因此有

$$\begin{aligned} R(\mathbf{p}^{(l)}, \mathbf{l}^{(l)}, \mathbf{f}^{(l)}, \mathbf{q}^{(l)}, \boldsymbol{\Theta}^{(l)}) &\stackrel{(a)}{\leq} \\ R(\mathbf{p}^{(l+1)}, \mathbf{l}^{(l+1)}, \mathbf{f}^{(l+1)}, \mathbf{q}^{(l)}, \boldsymbol{\Theta}^{(l)}) &\stackrel{(b)}{\leq} \\ R(\mathbf{p}^{(l+1)}, \mathbf{l}^{(l+1)}, \mathbf{f}^{(l+1)}, \mathbf{q}^{(l+1)}, \boldsymbol{\Theta}^{(l)}) &\stackrel{(c)}{\leq} \\ R(\mathbf{p}^{(l+1)}, \mathbf{l}^{(l+1)}, \mathbf{f}^{(l+1)}, \mathbf{q}^{(l+1)}, \boldsymbol{\Theta}^{(l+1)}) &\quad (47) \end{aligned}$$

其中，不等号(a)、(b)、(c)成立的条件在于每个子问题都能得到最优解，从而确保目标函数值在迭代过

程中单调非减，且优化变量有界，因此所提 BCD 算法能够保证收敛。

## 4 仿真分析

为了验证本文方案的有效性，本节进行了仿真验证。考虑用户所在区域半径为 120 m，其中心位于 (120 m, 120 m)，RIS 位于(120 m, 0 m, 50 m)，UAV 飞行起始位置为(-30 m, 0 m, 100 m)，UAV 飞行终点位置为(-30 m, 240 m, 100 m)，用户与 UAV 直接链路的路径损耗指数为  $\alpha = 3.6$ ，间接链路的路径损耗指数为  $\gamma = 2.2$ 。噪声功率为  $\sigma^2 = -110$  dBm，用户最大发射功率为  $p_{\max} = 0.5$  W，用户与 UAV 的可用计算资源分别为  $F_k^{\max} = 1$  GHz 和  $F_s^{\max} = 15$  GHz，CPU 电容系数  $\kappa = 10^{-28}$ ，平均总功率  $\bar{P}_k = 20$  W，任务数据量  $L_k[n] \in [0.5 \text{ Mbit}, 1.0 \text{ Mbit}]$ ，网络总带宽  $B_l$  为 1 MHz，参考距离为 1 m 处的信道功率增益为  $\beta_0 = -30$  dB，时隙数  $N = 25$ ，飞行周期  $T = 25$  s。为简化计算，将 25 个 RIS 反射元件作为一个 RIS 子表面，将每个子表面中反射元件的相移设置为相同值<sup>[20]</sup>。

用户数量  $K = 14$  时，所提 BCD 算法收敛性如图 3 所示。从图 3 中可以看出，当固定用户数量，RIS 子表面数量分别为 50 和 70 时，随着迭代次数的增加，BCD 算法在 4 次呈现收敛，收敛较快，用户最小平均吞吐量提升约 0.3 Mbit/s。这验证了所提 BCD 算法在提升最小平均吞吐量的有效性，并能在较少的迭代次数内得到较满意的优化结果。

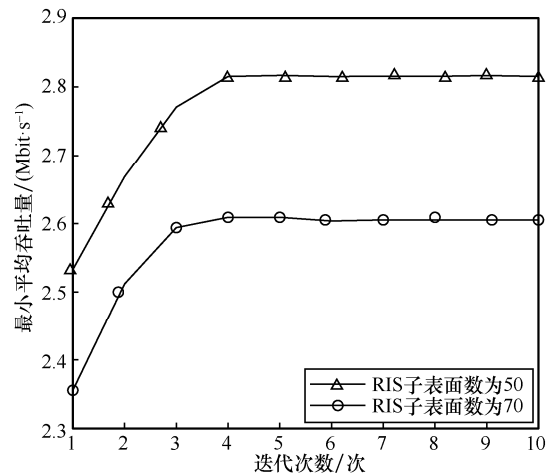


图 3 BCD 算法收敛性

最小平均吞吐量与用户数量的关系如图 4 所示。从图 4 可以看出，在 RIS 子表面数量为 30~60 时，最小平均吞吐量随用户数量增加而逐渐降低，

且最小平均吞吐量随着 RIS 子表面数量增加而提升。随着用户数量增加，每个用户所分得的带宽资源和 UAV 计算资源减少，进而限制了用户的任务卸载能力，由于本地计算频率和平均功率预算受限，故本地和边缘的任务处理能力降低，进而使吞吐量降低。进一步从图 4 中可以发现，最小平均吞吐量下降幅度逐渐减缓，这是由于随着用户数量增加，用户平均带宽资源减少的幅度不断减慢，进而导致最小平均吞吐量降低幅度减小。

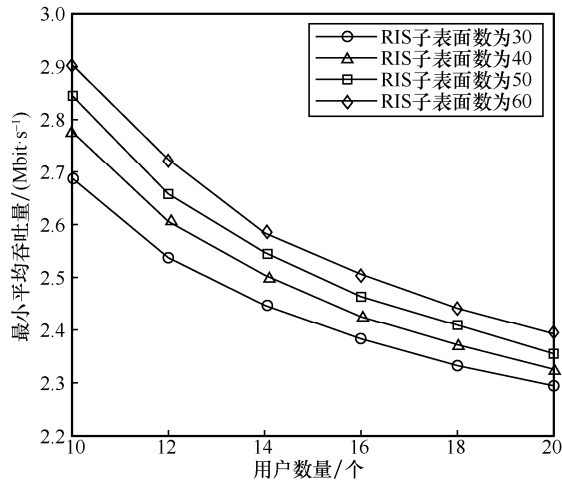


图 4 最小平均吞吐量与用户数量的关系

最小平均吞吐量与 RIS 子表面数量的关系如图 5 所示。仿真结果表明，随着 RIS 子表面数量的不断增加，用户的吞吐量逐渐提升。这是由于在本地计算能力与功耗约束下，RIS 反射元件经过相移优化后，RIS 子表面数量的增加会进一步增强通信链路，进而增大信噪比与卸载速率，使 MEC 网络任务卸载能力增强，进而使网络吞吐量提升。因此可以得出，增加 RIS 反射元件数能有效地提升用户体验。

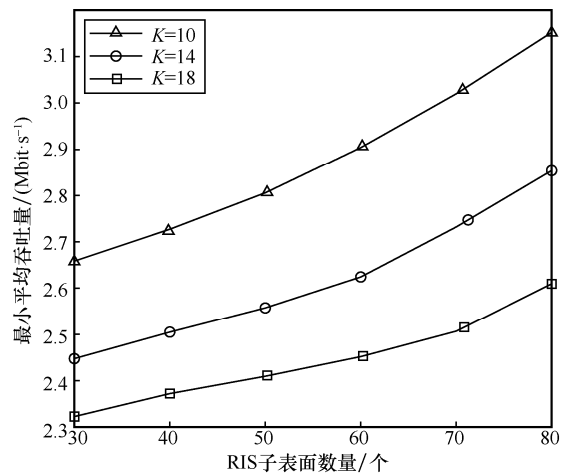
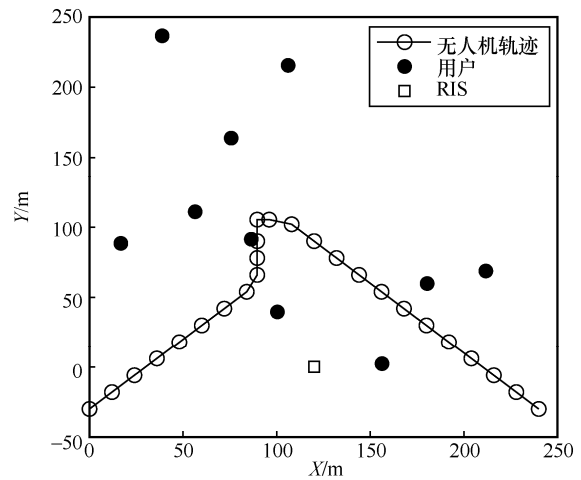
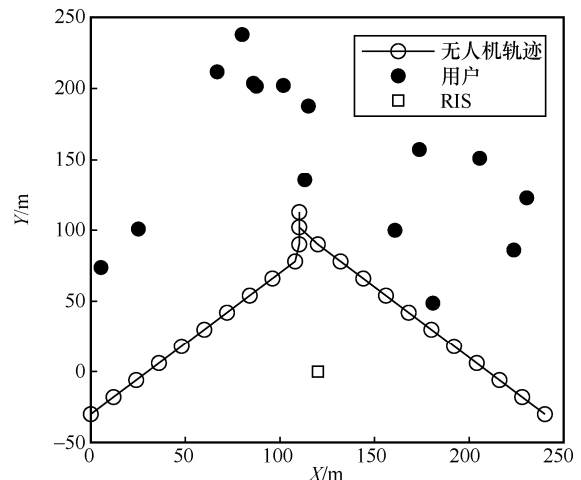


图 5 最小平均吞吐量与 RIS 子表面数量的关系

不同用户数量下优化得到的 UAV 轨迹如图 6 所示。从图 6 可以看出，在用户数量  $K$  分别为 10 和 16 时，UAV 能够接近用户与 RIS，并为用户提供更强的卸载链路，从而提高吞吐量，改善用户体验。这验证了本文方案对于 UAV 轨迹优化的有效性，能够通过优化轨迹以协同 RIS 提供更好的 MEC 卸载服务。



(a) 10个用户下的UAV轨迹



(b) 16个用户下的UAV轨迹

图 6 不同用户数量下优化得到的 UAV 轨迹

不同优化方案的性能对比如图 7 所示。其中，固定相移方案将 RIS 反射元件的相移设置为固定值，随机相移方案将相移设置为随机值而不优化，固定 UAV 轨迹方案令 UAV 由起点匀速直线飞行至终点。从图 7 可以看出，随着 RIS 子表面数的增加，使用 RIS 辅助方案的吞吐量逐渐增加，并且高于无 RIS 辅助方案。其中，本文方案的最小平均吞吐量最大，固定 UAV 轨迹方案次之，固定相移方案与随机相移方案的最小平均吞吐量较小，同时，对于

随机相移方案与固定相移方案，RIS 反射元件数增加所带来的性能增益较弱。这是由于经过优化 UAV 轨迹能够顾及用户体验，从空间上改善链路质量，而 RIS 相移的优化能够改善信号的传输环境，进而提升卸载速率以更好地提升吞吐量。

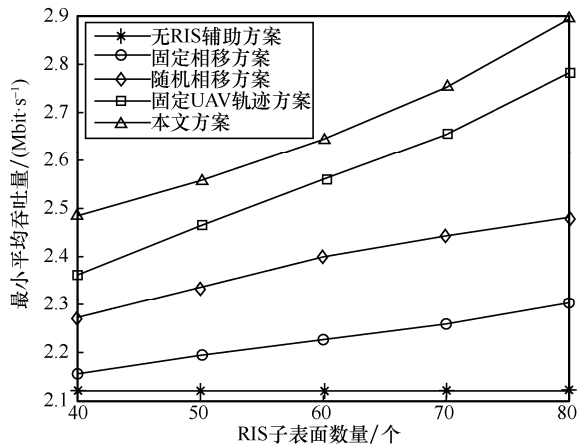


图7 不同优化方案的性能对比

在实际应用中，由于 RIS 反射元件的相位调节是离散的，且离散的分辨率取决于量化的比特数。连续相移和不同比特位数相移下的最小平均吞吐量如图 8 所示。在迭代停止时，将优化后的连续相移量化为离其最近的离散值，其中  $b$  bit 量化下的离散值集合为  $\{0, 2\pi \times 2^{-b}, \dots, 2\pi \times (1 - 2^{-b})\}$ 。从图 8 可以看出，离散相移方案的平均最小吞吐量低于连续相移方案，并且随着量化比特数的增加，性能差距逐渐缩小，4 bit 相移方案与连续相移方案性能相近。

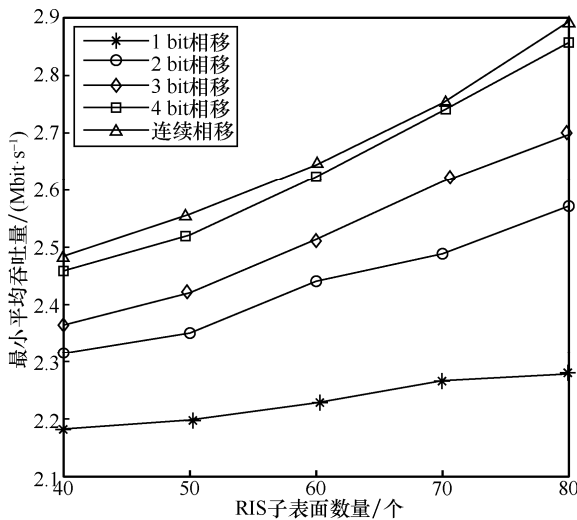


图8 连续相移和不同比特位数相移下的最小平均吞吐量

## 5 结束语

本文研究了一种智能反射面赋能的无人机边缘计算任务卸载方案。旨在通过联合考虑任务分配、用户发射功率、智能反射面相移矩阵、无人机计算资源分配以及无人机轨迹，建立一个最大化用户的最小平均数据吞吐量问题。该问题是一个随机优化问题，且优化变量之间密切耦合。首先，通过利用数学期望的性质，将随机优化问题转换为确定性优化问题。其次，利用块坐标下降算法将确定性优化问题分解为 3 个子问题，并通过引入辅助变量、利用连续凸近似和半定松弛方法将非凸问题转换为凸优化问题，进而得到问题的近似次优解。仿真结果表明，所提方案具有良好的收敛性能，并有效地提高了用户的平均数据吞吐量。

## 参考文献:

- [1] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G 移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148.  
ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 141-148.
- [2] LETAIEF K B, SHI Y M, LU J M, et al. Edge artificial intelligence for 6G: vision, enabling technologies, and applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(1): 5-36.
- [3] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向 6G 的无人机通信综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781-789.  
CHEN X Y, SHENG M, LI B, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 781-789.
- [4] WANG J, NA Z Y, LIU X. Collaborative design of multi-UAV trajectory and resource scheduling for 6G-enabled Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(20): 15096-15106.
- [5] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China Information Sciences, 2020, 64(1): 1-74.
- [6] LI M S, CHENG N, GAO J, et al. Energy-efficient UAV-assisted mobile edge computing: resource allocation and trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 3424-3438.
- [7] ZHAO M X, LI W T, BAO L Y, et al. Fairness-aware task scheduling and resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(4): 2174-2187.
- [8] XU Y, ZHANG T K, YANG D C, et al. Joint resource and trajectory optimization for security in UAV-assisted MEC systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(1): 573-588.
- [9] WANG L, WANG K Z, PAN C H, et al. Multi-agent deep reinforce-

- ment learning-based trajectory planning for multi-UAV assisted mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(1): 73-84.
- [10] 崔高峰, 徐媛媛, 张尚宏, 等. 基于最小能耗的多无人机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.
- [11] 屈毓铄, 秦葵, 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.
- [12] 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.
- [13] CAO X L, YANG B, HUANG C W, et al. Converged reconfigurable intelligent surface and mobile edge computing for space information networks[J]. IEEE Network, 2021, 35(4): 42-48.
- [14] HUANG C W, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4157-4170.
- [15] JI B F, WANG Y N, SONG K, et al. A survey of computational intelligence for 6G: key technologies, applications and trends[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(10): 7145-7154.
- [16] BAI T, PAN C H, DENG Y S, et al. Latency minimization for intelligent reflecting surface aided mobile edge computing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2666-2682.
- [17] DAI Y Y, GUAN Y L, LEUNG K K, et al. Reconfigurable intelligent surface for low-latency edge computing in 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 72-79.
- [18] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [19] LIU X, LIU Y W, CHEN Y. Machine learning empowered trajectory and passive beamforming design in UAV-RIS wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(7): 2042-2055.
- [20] MU X D, LIU Y W, GUO L, et al. Intelligent reflecting surface enhanced multi-UAV NOMA networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 3051-3066.
- [21] REN H, ZHANG Z K, PENG Z J, et al. Energy minimization in RIS-assisted UAV-enabled wireless power transfer systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022 : doi.org/10.1109/IJOT.2022.3150178.
- [22] 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.
- [23] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

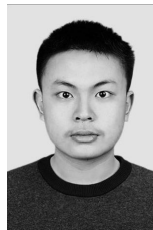
## [作者简介]



李斌(1987-), 男, 山东济宁人, 博士, 南京信息工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无人机通信、移动边缘计算等。



刘文帅(1996-), 男, 河北保定人, 南京信息工程大学硕士生, 主要研究方向为移动边缘计算、智能反射面等。



谢万城(2001-), 男, 湖北宜昌人, 南京信息工程大学硕士生, 主要研究方向为移动边缘计算、智能反射面等。



费泽松(1977-), 男, 安徽合肥人, 博士, 北京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、多媒体信号处理等。

# 《通信学报》第十届编辑委员会

顾 问： 邬江兴 刘韵洁 方滨兴 于 全 郑建华 费爱国  
何 友 尹 浩 陆建华 陆 军 姚富强 沈学民  
王怀民 王金龙 崔铁军

主任委员：张 平

副主任委员：张延川 马建峰 杨 震  
沈连丰 陶小峰 刘华鲁

委 员：

丁 群	王汝言	王良民	龙 军	卢建民	田 辉	田有亮
田俊峰	朱洪波	仲 红	任保全	刘西蒙	许文俊	李 伊
李少谦	李凤华	李玉峰	李建东	李陶深	杨 亮	吴 怡
吴 巍	吴启晖	吴晓平	沙学军	沈玉龙	宋令阳	宋铁成
张士兵	张云勇	张玉清	张钦宇	张朝阳	陈 巍	陈山枝
陈后金	范九伦	林金朝	欧阳缮	易东山	金 石	周一青
周武旻	周 亮	桂 冠	贾 焰	夏银水	袁东风	钱志鸿
倪国新	徐立中	郭 庆	郭 磊	郭渊博	黄 韬	黄建伟
黄梦醒	崔琪楣	梁永生	隆克平	普园媛	裴庆祺	谭晓衡

Shuguang Cui (美国) Yi Qian (美国) Shiping He (美国)

Jiangzhou Wang (英国) Wen Tong (加拿大)

## 收录声明

本刊对发表的文章,拥有出版电子版、网络版版权,并拥有和其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬中已经包含上述费用。

*Journal on Communications* has the copyright to publish electronic edition, online edition of the published articles, and has the right to exchange information with other sites. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

## 道德声明

本刊发表的论文是作者独立取得的原创性研究成果,无一稿多投;论文内容不涉及国家机密;未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过;论文内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题,论文作者将承担全部责任。

The authors of *Journal on Communications* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Journal on Communications*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

# 通信学报

Journal on Communications



发行代号：  
国内2-676  
国外M395

2022年10月25日出版 定价：98.00元

ISSN 1000-436X

