

RIS辅助下支持无线供能的无人机边缘计算网络的能效优化机制

余雪勇^{1,2}, 宋家宁^{1,2}, 朱洪波^{1,2}, 张露丹^{1,2}, 王大刚^{1,2}

(1. 江苏省无线通信与物联网省高校重点实验室, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学教育部泛在网络健康服务系统工程研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要: 在终端将任务卸载至无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 的过程中, 密集建筑物可能导致信号衰减、多径传播和信号阻塞等问题, 从而影响终端的卸载速率。为了应对这一挑战, 引入智能反射面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 以改善信道质量并提高任务卸载速率。首先, 考虑 RIS 是无源器件且终端能量有限, 创新性地提出无人机基于射频 (RF, radio frequency) 信号的能量波束为终端和 RIS 充电; 其次, 通过联合优化上下行波束成形矩阵、UAV 轨迹以及任务卸载速率, 研究 RIS 辅助 UAV 无线供电的边缘计算网络的能效问题。在此基础上, 基于半正定松弛法 (SDR, semi-definite relaxation) 和逐次凸逼近 (SCA, successive convex approximation) 的块坐标下降算法求解该优化问题。仿真结果表明, 所提优化策略在满足地面终端卸载需求的同时, 有效平衡了能耗供给与任务卸载能耗之间的关系, 提高了终端设备的能量效率。

关键词: 移动边缘运算; 无人机通信; 智能反射面; 能量收集

中图分类号: TP929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00394

RIS assisted energy efficiency optimization mechanism in UAV edge computing system supporting wireless energy supply

YU Xueyong^{1,2}, SONG Jianing^{1,2}, ZHU Hongbo^{1,2}, ZHANG Ludan^{1,2}, WANG Dagang^{1,2}

1. Jiangsu Province Key Lab of Wireless Communications and Internet of Things, Nanjing 210003, China

2. Engineering Research Center of Health Service System Based on Ubiquitous Wireless Networks, Ministry of Education, Nanjing University of Posts Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: During the process of offloading tasks from devices to the UAVs, tall buildings can cause issues such as signal attenuation, multipath propagation, and signal blockage, thereby impacting the task offloading rate of devices. To address this challenge, the RIS was introduced to improve channel quality and enhance task offloading rates. It is worth noting that RIS operates without its own energy source and user energy resources are limited. To overcome this energy constraint, UAV employing RF signal-based energy transmission beams to recharge both devices and RIS was proposed. Secondly, an energy-efficient optimization strategy for RIS-enhanced wireless powered MEC network was proposed by jointly optimizing downlink and uplink phase beamforming, UAV trajectories, and task offloading rates. Building upon this foundation, a block coordinate descent (BCD) algorithm that combines semi-definite relaxation (SDR) and successive convex approximation (SCA) techniques was introduced. The extensive simulation results validate the effectiveness of the proposed optimization strategy in achieving a great balance between energy supply and task offloading energy consumption while meeting the task offloading requirements of ground terminals, thus enhancing the overall energy efficiency of the network.

Key words: MEC, UAV communication, RIS, energy harvesting

收稿日期: 2023-12-19; 修回日期: 2025-04-23

通信作者: 余雪勇, yuxy@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 92067201); 江苏省重点研发计划项目 (No. BE2020084-4)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 92067201), The Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (No. BE2020084-4)

0 引言

尽管搭载边缘服务器的无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 提高了数据处理能力并降低了通信时延, 使其能够更有效地应对各类复杂任务需求, 但随着现代社会的发展, 密集建筑中的通信场景日益复杂, 对信号传输提出了更高的要求。而现阶段的 UAV 辅助移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing) 虽然能够满足如虚拟现实、增强现实、自动驾驶等新应用的计算需求, 但仍受限于终端与服务器之间的信号衰减、多径传播和信号阻塞^[1]等不利现象, 进而导致终端的能量浪费。然而, 智能反射面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 的出现为解决这一问题提供了有效可行方案。

RIS 是由大量无源反射元件构成的二维平面。每个元件独立对入射信号产生可控振幅及相位, 此过程称为无源波束成形^[2-3], 从而提高系统的频谱效率和任务卸载速率。RIS 可引入边缘计算网络中辅助传输, 在终端和服务器之间建立瑞利信道及莱斯信道, 以改善信道质量。鉴于 RIS 是无源器件, 并且终端缺乏维持长时间任务卸载过程的能量, UAV 采用基于射频信号的能量传输波束为 RIS 和终端补能。本文致力于研究上述场景下, 引入 RIS 辅助 UAV 无线供电 MEC 的可靠方案及能效优化问题。

目前的研究主要聚焦在 3 个方面: 提升任务卸载速率、降低系统能耗以及增强系统可靠性。

在提升任务卸载速率方面, 文献[4]定义了能量采集传输 (HTT, harvest-then-transmit) 协议, 该协议详细规定了终端与服务器之间的通信, 实现了可持续通信。另外, 文献[5]提出了一种方案, 通过动态调整每个相干信道不同时隙的反射相位, 以提高信道增益, 从而提升任务卸载速率。

终端能耗是另一个关键因素。任务调度到边缘服务器的过程中, 采用基于动态规划的投标优化方法可以更有效地降低设备的能耗^[6]。此外, UAV 还可以作为中继器。终端可采用不同的计算策略, 选择通过 UAV 中继将一些任务卸载到静态接入点^[7]。在这一研究领域, 文献[8]在传输过程中利用正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 进行资源分配, 成功解耦了网络能耗的强耦合组件, 并确定了两组局部最优解。

通过优化信道质量可以实现系统的可靠性。文

献[9]采用 RIS 增强信道质量的方法, 从 RIS 提供的间接链路的延迟和可靠性的角度解决了这一问题。而文献[10]的目标是通过改善两种类型链路的信道条件, 以最大化用户在无线系统中接收的信号强度。此外, 文献[11]使用随机几何理论对信号进行建模, 进而分析了 RIS 单元片数量对窃听信道模型的影响。最后, 文献[12]将任务卸载过程转化为马尔科夫决策过程, 并应用随机过程理论提升了可靠性。在上述研究中, 存在以下几点问题。

(1) 在提升任务吞吐量的过程中, 忽视了计算和传输过程中终端设备能量受限以及 RIS 的能量供给问题。一方面, 当下用户需求激增, 终端设备在能量受限时对时延敏感性任务处理效果不佳; 另一方面, 若将 RIS 纳入优化方案还必须考虑对供能的影响。

(2) 单纯研究用户将任务卸载给 RIS 中继, 后者再通过自适应调整合适的相位矩阵将任务卸载给 UAV 的情况, 而忽视用户通过直接链路将任务卸载给 UAV 的可能性。这样不仅会导致 RIS 自身能量和带宽的浪费, 还忽视了与传统模型的共性。

(3) RIS 辅助场景下考虑了固定基站提供通信服务, 而忽视搭载小基站的 UAV。若只考虑固定基站, 不仅基站的服务范围受到限制, 影响服务质量, 还会浪费传输能量, 增大系统能耗。

故本文提出 UAV 基于射频信号为 RIS 和终端提供无线能量的方案, 切实解决了能源问题。具体来说, 本文探讨了 RIS 在提升任务卸载和无线能量传输链路质量方面的应用, 并提出最小化终端传输能耗和 UAV 计算能耗的优化策略。本文通过联合优化延迟、能量供应和卸载速率使能耗最小化。该研究的主要贡献总结如下。

(1) 根据终端的任务卸载率和时隙, 推导出了传输能耗。此外, 本文提出了一种以最小化终端和 UAV 能耗为目标的能效优化策略。

(2) 将 RIS 增强的链路质量和 MEC 相结合。UAV 首先为 RIS 提供能量, 然后同时执行上行任务卸载和下行能量传输。此外, RIS 会自适应地调整其相位, 以最小化终端的传输能耗, 并确保 UAV 为每个终端提供足够的能量供应。

(3) 提出了一种基于逐次凸逼近 (SCA, successive convex approximation) 的联合优化策略。具体而言, 本文将能耗最小化分解为 3 个子问题, 然后

利用半正定松弛法 (SDR, semi-definite relaxation) 和高斯随机化求得波束成形矩阵的秩一解。

1 系统模型

相较于成本昂贵且覆盖范围有限的固定基站, 携带边缘服务器的 UAV 能够更灵活地响应用户需求, 展现出良好的发展前景。RIS 增强支持无线供能 UAV 边缘计算的系统模型如图 1 所示, RIS 辅助下的 UAV 边缘计算网络由 K 个设备、一个包含 S 个单元的 RIS 以及搭载边缘服务器的 UAV 组成。假设 UAV 通过射频能量发射器为终端和 RIS 提供能量, 为了避免终端的相互干扰, 采用时分多址 (TDMA, time division multiple access) 协议, 将时间 T 等分为 N 个时长为 Δ 的时隙后, 将每个时隙再划分为 $K+1$ 份, 时隙分配如图 2 所示。RIS 固定在高层建筑物表面, 假设反射振幅均为 1 的情况下, S 个反射相位组成的对角相位矩阵是连续可控的, 即 $\theta[n] = \text{diag}\{e^{-j\theta_1[n]}, e^{-j\theta_2[n]}, \dots, e^{-j\theta_S[n]}\}$ 。每个终端在规定时间内有指定数量的任务需要完成, 而其计算能力是有限的。当终端的自身能量不足以完成本地计算时, 可选择部分卸载或者全卸载到边缘服务器进行处理。考虑在复杂的环境中, 建筑物会阻挡数据传输, 致使任务无法在规定时间内完成或者耗费大量能量, UAV 通过下行能量传输链路依次为 RIS 和终端提供能量后, 终端将任务首先上行卸载到 RIS, RIS 利用收集的能量将任务卸载到边缘服务器。

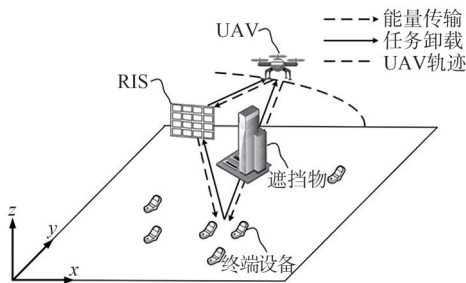


图1 RIS增强支持无线供能UAV边缘计算的系统模型

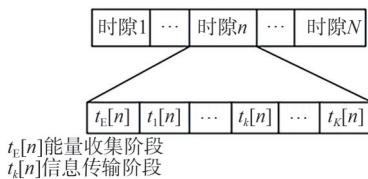


图2 时隙分配

1.1 能量收集模型

上述前提下, 第 k 个终端的位置表示为 $\mathbf{z}_k = (x_k, y_k) \in \mathbf{R}^{1 \times 2}, \forall k \in K$ 。假设 UAV 飞行在固定的高度, 由 \mathbf{z}_U 表示。UAV 的水平位置为 $\mathbf{q}[n] = [x[n], y[n]] \in \mathbf{R}^{1 \times 2}, \forall n \in \mathbf{N}$ 。RIS 的高度和水平坐标分别由 \mathbf{z}_R 和 $\mathbf{w}_R = [x_R, y_R]^T$ 表示。另外, UAV 与 RIS、RIS 和终端以及 UAV 与终端之间的信道增益^[13-17]分别表示为 \mathbf{h}_{UR} 、 $\mathbf{h}_{RG,k}$ 以及 $\mathbf{h}_{UG,k}$ 。

整个网络采用先收集能量后传输信息的策略。RIS 首先在 $t_E[n]$ 时隙采用线性能量收集模型从 UAV 的射频信号中收集的能量为

$$E_R[n] = \sum_{n=1}^N \eta P_0 t_E[n] \|\mathbf{h}_{UR}[n]\|^2 \quad (1)$$

其中, $0 \leq \eta \leq 1$ 代表能量转换效率。假设 UAV 采用恒定的传输功率 P_0 , 并且在 $t_E[n]$ 中 UAV 只负责向 RIS 传输能量。

一般来说, RIS 的电路能耗远小于终端通信能耗, 因此在本文中忽略不计。RIS 的功耗可以用 $S\mu$ 表示^[18], 其中 μ 是单元片的功耗。与此同时, RIS 只能利用收集的能量来满足其电路功耗, 因此应满足以下约束

$$S\mu \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K t_k[n] \leq \sum_{n=1}^N E_R[n] \quad (2)$$

UAV 通过下行传输信道分别为 K 个终端设备提供能量。下行传输信道包括直接信道以及间接信道, 因此, 第 k 个终端收集的能量^[19]为

$$E_{G,k} = \eta \sum_{n=1}^N t_k[n] P_0 \|\mathbf{h}_{RG,k}^H \mathbf{\Gamma}_d[n] \mathbf{h}_{UR} + \mathbf{h}_{UG,k}\|^2 \quad (3)$$

其中, $t_k[n]$ 表示 UAV 为第 k 个终端设备提供能量的时间段, $\mathbf{\Gamma}_d[n] = \text{diag}\{e^{-j\theta_{d,1}[n]}, e^{-j\theta_{d,2}[n]}, \dots, e^{-j\theta_{d,S}[n]}\}$ 即下行能量传输过程中 RIS 的相位偏移矩阵, 上标 H 表示共轭转置。

1.2 计算卸载模型

任务传输阶段, 终端在接受 UAV 能量的同时, 需要完成两个任务: 本地计算和卸载到边缘服务器。定义第 k 个终端所需要执行的任务数据量为 $l_k[n]$ 。 ζ_k 为二元变量, 表示终端是否卸载, 取值为 $\{0, 1\}$ 。因此, 终端卸载到服务器的数据量为 $\zeta_k l_k[n]$ 。第 k 个终端利用收集的能量在 RIS 辅助下以时间 $t_k[n]$ 上行任务卸载。实际任务卸载量应小于理论值, 卸载量要满足

$$\zeta_k l_k[n] \leq t_k[n] r_k[n] \quad (4)$$

在第 n 时隙下第 k 个终端的信息卸载速率表示为

$$r_k[n] = B \ln \left(1 + \frac{P_k[n] |\mathbf{h}_{UR}^H[n] \mathbf{\Gamma}_{UL} \mathbf{h}_{RG,k}[n] + \mathbf{h}_{UG,k}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

其中, σ^2 表示噪声方差, 终端设备所占信道的传输带宽为 B , $\mathbf{\Gamma}_{UL}[n] = \text{diag} \{ e^{-j\theta_{ul,1}[n]}, e^{-j\theta_{ul,2}[n]}, \dots, e^{-j\theta_{ul,L}[n]} \}$ 即上行任务卸载过程中的 RIS 相位偏移矩阵。根据标准信息理论, 第 n 个时隙第 k 个终端的任务卸载能耗 $E_k^{\text{ul}}[n]$ 可以表示为

$$E_k^{\text{ul}}[n] = \frac{\sigma^2 B \Delta}{|\mathbf{h}[n]|^2 (K+1)} \left(2^{\frac{\xi_k l_k[n] (K+1)}{B \Delta}} - 1 \right) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{h}[n] = \mathbf{h}_{UR}^H[n] \mathbf{\Gamma}_{UL} \mathbf{h}_{RG,k}[n] + \mathbf{h}_{UG,k}[n]$ 。

UAV 不仅为终端提供能量, 还提供边缘计算服务。UAV 的计算能耗与计算资源 $f_{u,k}$ 有关, 故 UAV 处理终端 k 的任务产生的能耗 E_u^{comp} 为

$$E_u^{\text{comp}} = \sum_{k=1}^K \varepsilon_k f_{u,k} C_k \quad (7)$$

其中, C_k 表示任务复杂度, 即执行每位数据所需 CPU 周期频率^[20]。

1.3 目标问题

基于上述的模型, 通过联合优化终端的卸载率 $\{\varepsilon_k\}$ 、RIS 上下行波束成形矩阵 $\{\mathbf{\Gamma}_d, \mathbf{\Gamma}_{UL}\}$ 以及 UAV 轨迹 $\{\mathbf{q}[n]\}$ ^[21], 将最小化系统能耗描述为

$$\begin{aligned} \min_{\varepsilon, \theta, \mathbf{q}[n]} & \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E_k^{\text{ul}}[n] + \sum_{k=1}^K E_u^{\text{comp}} \\ \text{s.t. C1:} & \varepsilon_k = \{0, 1\}, \forall k \in K \\ \text{C2:} & \frac{(1 - \varepsilon_k) l_k[n] C_k}{f_k} + \frac{\varepsilon_k l_k[n]}{r_k} + \frac{\varepsilon_k l_k[n] C_k}{f_{u,k}} \leq T \\ \text{C3:} & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K E_k^{\text{ul}} \leq \eta \sum_{n=1}^N t_k[n] P_0 |\mathbf{h}[n]|^2 \\ \text{C4:} & \sum_{k=1}^K \varepsilon_k f_{u,k} \chi_{u,k} C_k + \sum_{n=1}^N m \|\mathbf{v}[n]\|^2 \leq E_0 \\ \text{C5:} & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K t_k \leq \sum_{n=1}^N \eta P_0 t_E[n] \|\mathbf{h}_{UR}[n]\|^2 \\ \text{C6:} & 0 \leq \theta_{m,k}[n] < 2\pi, \forall m, n, k \\ \text{C7:} & \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\| \leq v_{\max} \Delta, n = 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, C1 表示卸载率的取值范围; C2 指终端需要在任务延迟需求内完成自身任务; C3 表示在部分计算卸载模式下, 终端卸载未完成的数据所需能耗要小于收集的能量; C4 保证 UAV 完成数据处理以及保持飞行, 其中, κ 是 UAV 的质量 (包括其载

重); C5 左端是 RIS 所耗费的能耗必须满足 UAV 提供的能量; C6 是相位波束成型约束; C7 表示 UAV 飞行过程中的位置变化要小于最大速度下的位移矢量。

2 优化过程

由于式(8)的目标函数存在 3 个优化变量的耦合并且约束 C3、C7 非凸, 因此该问题是非凸的。非凸问题复杂度较高, 往往难以利用传统的凸优化技术直接求解。为了解决该问题, 本文提出了三阶段交替优化算法, 将非凸非线性问题解耦为 3 个子问题, 包括终端的卸载率 $\{\varepsilon_k\}$ 、RIS 上下行波束成形矩阵 $\{\mathbf{\Gamma}_d, \mathbf{\Gamma}_{UL}\}$ 、UAV 轨迹 $\{\mathbf{q}[n]\}$: 首先, 求 $\{\varepsilon_k\}$ 的闭式解; 其次, 对于 $\{\mathbf{\Gamma}_d, \mathbf{\Gamma}_{UL}\}$, 利用半正定松弛法和高斯随机化求解最优矩阵; 最后, 采用 SCA 算法, 求得 $\{\mathbf{q}[n]\}$ 最优值。

2.1 卸载率优化

终端的卸载率直接影响系统能耗^[22]。当终端收集的能量无法满足自身任务的能耗需求时, 终端将任务卸载到边缘服务器。随着任务卸载量累增, 传输能耗增加, 边缘服务器处理任务的能耗也同步提高。

当给定其他变量 $\{\mathbf{\Gamma}_d, \mathbf{\Gamma}_{UL}\}$ 和 $\{\mathbf{q}[n]\}$ 时, 目标函数是关于 $\{\varepsilon_k\}$ 的凸函数与线性函数和的形式, 总之相当于求解卸载率 $\{\varepsilon_k\}$ 的最小值问题。将式(8)转化为

$$\begin{aligned} \min_{\xi_k} & \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E_k^{\text{ul}}[n] + \sum_{k=1}^K \varepsilon_k f_{u,k} C_k \\ \text{s.t.} & \varepsilon_k = \{0, 1\}, \forall k \in K \\ & \frac{(1 - \varepsilon_k) l_k[n] C_k}{f_k} + \frac{\varepsilon_k l_k[n]}{r_k} + \frac{\varepsilon_k l_k[n] C_k}{f_{u,k}} \leq T \quad (9) \\ & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K E_k^{\text{ul}} \leq \eta \sum_{n=1}^N t_k[n] P_0 |\mathbf{h}[n]|^2 \end{aligned}$$

根据延迟敏感性任务的时间约束可知, $\{\varepsilon_k\}$ 的闭式解为

$$\xi_k = \min \left\{ \frac{r_k f_{u,k} (T f_k - l_k[n] C_k)}{l_k[n] (C_k r_k f_k + f_{u,k} f_k l_k[n] - f_{u,k} r_k C_k)}, 1 \right\} \quad (10)$$

2.2 波束成形矩阵优化

式(9)的目标函数中未包含 $\mathbf{\Gamma}_d[n]$, 但是含该变量的表达式仍对目标函数存在影响。由此, 固定 ε_k 和 $\{\mathbf{q}[n]\}$, 则下行波束成形矩阵优化可以表示为

$$\begin{aligned}
& \text{Find } \boldsymbol{\Gamma}_d[n] \\
& \text{s.t. } \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K E_k^{\text{ul}} \leq \eta \sum_{n=1}^N t_k[n] P_0 |\mathbf{h}[n]|^2 \\
& \quad S\mu \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K t_k \leq \sum_{n=1}^N \eta P_0 t_E[n] \|\mathbf{h}_{\text{UR}}[n]\|^2 \\
& \quad 0 \leq \theta_{m,k}[n] < 2\pi, \forall m, n, k
\end{aligned} \quad (11)$$

对于相位矩阵的优化, 本文采用SDR方法进行求解。假定 $\mathbf{v}_d = (e^{j\theta_{d,1}[n]}, e^{j\theta_{d,2}[n]}, \dots, e^{j\theta_{d,s}[n]})^\top$, $\hat{\mathbf{v}}_d = [\mathbf{v}_d, 1]^\top$, $\mathbf{h}_k^H = [\mathbf{h}_{\text{RG},k}^H \text{diag}(\mathbf{h}_{\text{UR}}), \mathbf{h}_{\text{UG},k}]^\circ$ 。由于 $|\mathbf{h}_{\text{RG},k}^H \boldsymbol{\Gamma}_d[n] \mathbf{h}_{\text{UR}} + \mathbf{h}_{\text{UG},k}| = [\mathbf{h}_{\text{RG},k}^H \text{diag}(\mathbf{h}_{\text{UR}}), \mathbf{h}_{\text{UG},k}] \hat{\mathbf{v}}_d = \mathbf{h}_k^H \hat{\mathbf{v}}_d$, 则式(11)可以重写为

$$\begin{aligned}
& \text{Find } \hat{\mathbf{v}}_d \\
& \text{s.t. } \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K E_k^{\text{ul}} \leq \eta \sum_{n=1}^N t_k[n] P_0 |\mathbf{h}_k^H \hat{\mathbf{v}}_d|^2 \\
& \quad [\hat{\mathbf{v}}_d \hat{\mathbf{v}}_d^H]_{ss} = 1, \forall s \in S
\end{aligned} \quad (12)$$

为解决该非凸非线性问题, 将约束改写为 $[\hat{\mathbf{V}}_d]_{ss} = 1$, $\text{Rank}(\hat{\mathbf{V}}_d) = 1$ 。根据文献[23-24], 秩一约束松弛后, 凸问题迎刃而解, 可以利用CVX工具箱进行求解, 对求解结果进一步筛选, 即可恢复秩一解。

对于任意给定的 ε_k 和 $\mathbf{q}[n]$, 目标函数中含有上行波束成形矩阵, 最小化终端能耗等同于最大化上行波束成形矩阵, 式(8)可以转化为以下形式

$$\begin{aligned}
& \max_{\boldsymbol{\Gamma}_{\text{UL}}} |\mathbf{h}_{\text{UR}}^H[n] \boldsymbol{\Gamma}_{\text{UL}} \mathbf{h}_{\text{RG},k}[n] + \mathbf{h}_{\text{UG},k}[n]|^2 \\
& \text{s.t. } \mathbf{0} \leq \boldsymbol{\Gamma}_{\text{UL}} < 2\pi
\end{aligned} \quad (13)$$

用户发送的不同路径的信号进行相干组合, 只有相位对齐, 才能使发射信号功率最大化^[25], 从而可达速率最大化。因此, 通过控制RIS相移矩阵可得到最优反射相移。

$$\boldsymbol{\Gamma}_{\text{UL}}[n] = \arg(\tilde{\mathbf{h}}) - w_s - \frac{2\pi}{\lambda} d(s-1)\varphi_{\text{UR}}[n] \quad (14)$$

其中, $\arg(\tilde{\mathbf{h}})$ 为U-G信道的相位, $\frac{2\pi}{\lambda} d(s-1)\varphi_{\text{UR}}[n]$ 为U-R信道的第 s 个单元片相移, w_s 为R-G, k 信道的第 s 个单元片相移。因此, 对于任意给定UAV轨迹, $\mathbf{h}_{\text{UR}}^H[n] \boldsymbol{\Gamma}_{\text{UL}} \mathbf{h}_{\text{RG},k}[n]$ 可以改写为

$$\mathbf{h}_{\text{UR}}^H[n] \boldsymbol{\Gamma}_{\text{UL}} \mathbf{h}_{\text{RG},k}[n] = \frac{\sqrt{\beta_0} \sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_{\text{RG},k}| e^{j \arg(\tilde{\mathbf{h}})}}{D_{\text{UR}}[n]} \quad (15)$$

因此式(8)可以改写为

$$\max_{\mathbf{q}[n]} \text{lb} \left[1 + \left| \frac{\sqrt{\beta_0} \tilde{\mathbf{h}}}{D_{\text{UG},k}^{\beta/2}[n]} + \frac{\sqrt{\beta_0} \sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_{\text{RG},k}|}{D_{\text{UR}}[n]} \right|^2 \right] \quad (16)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\| \leq v_{\max} \Delta, n = 1, 2, \dots, N-1$$

2.3 UAV轨迹优化

本文由卸载功率和时间的乘积推导得到终端的上行卸载能耗作为目标函数, 考虑时隙足够小时, UAV的位移可忽略不计。此外, 通过推导可知卸载功率与卸载量呈负相关, 与传输速率呈正相关。此时最大化传输速率等效于最小化卸载能耗。对于UAV轨迹变量 $\{\mathbf{q}[n]\}$, 由于目标函数中存在 $\mathbf{h}_{\text{UR}}^H[n] \boldsymbol{\Gamma}_{\text{UL}} \mathbf{h}_{\text{RG},k}[n] + \mathbf{h}_{\text{UG},k}[n]$, 问题仍然是非凹的。根据SCA, 引入两个松弛变量 $u[n]$ 和 $v[n]$, 此问题可等效为

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{q}[n], u, v} \sum_{n=1}^N \text{lb} \left(1 + \gamma_0 \left| \frac{A}{u[n]} + \frac{B}{v[n]} \right|^2 \right) \\
& \text{s.t. } D_{\text{UG},k}[n] \leq u[n] \\
& \quad D_{\text{UR}}[n] \leq v[n]
\end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\gamma_0 = \frac{P_k}{\sigma^2}$, $A = \sqrt{\beta_0} \tilde{\mathbf{h}}$, $B = \sqrt{\beta_0} \sum_{s=1}^S |\mathbf{h}_{\text{RG},k}|^\circ$ 。式(17)的目标函数仍是一个关于 $u[n]$ 和 $v[n]$ 的凸函数。对于凸函数求解最大值只能采用一阶泰勒展开式, 求该目标函数的下界。目标函数转换为

$$\max_{\mathbf{q}[n], u, v} \sum_{n=1}^N \frac{B_0[n]}{A_0[n] \ln 2} u[n] + \frac{C_0[n]}{A_0[n] \ln 2} v[n] \quad (18)$$

其中, $A_0[n] = 1 + \gamma_0 \left[\frac{A^2}{(u_0[n])^k} + \frac{B^2}{(v_0[n])^2} + \frac{2AB}{(u_0[n])^{k/2} (v_0[n])} \right]$, $B_0[n] = -\gamma_0 \left[\frac{kA^2}{(u_0[n])^{(k+1)}} + \frac{kAB}{(u_0[n])^{(k/2+1)} (v_0[n])} \right]$, $C_0[n] = -\gamma_0 \left[\frac{2B^2}{(v_0[n])^3} + \frac{2AB}{(u_0[n])^{k/2} (v_0[n])^2} \right]^\circ$

式(18)仍需要将一侧的凸函数经过一阶泰勒公式展开为线性变量, 故

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{q}[n], u, v} \sum_{n=1}^N \frac{B_0[n]}{A_0[n] \ln 2} u[n] + \frac{C_0[n]}{A_0[n] \ln 2} v[n] \\
& \text{s.t. } (D_{\text{UG},k}[n])^2 + u_0^2[n] - 2u_0[n]u[n] \leq 0, \forall n \\
& \quad (D_{\text{UR}}[n])^2 + v_0^2[n] - 2v_0[n]v[n] \leq 0, \forall n
\end{aligned} \quad (19)$$

对于该标准凸问题, 再利用CVX工具箱, 得到第 m 次迭代时UAV轨迹的局部最优解。

2.4 算法复杂度分析

算法 1 代表全局优化算法，其通过迭代单调递减以及下界确保收敛。该模型的求解过程由 3 个子问题构成，而算法复杂度是指子问题内部迭代次数，以及迭代 3 个子问题使目标函数收敛的次数。具体来说，求解下行波束成形矩阵是具有 S^2 个变量和 $S+K+1$ 个约束，因此求解第二个子问题的最坏计算复杂度是 $O((S^2 + S + K + 1)S^4\sqrt{S + K + 1} \log(\frac{1}{\epsilon_1}))$ ，其中 ϵ_1 指公差系数。对于 UAV 轨迹求解，SCA 迭代次数为 K ，式(19)的算法复杂度为 $O(KN^{3.5})$ 。因此，算法的复杂度可以表示为 $O(L((S^2 + S + K + 1)S^4\sqrt{S + K + 1} \log(\frac{1}{\epsilon_1}) + KN^{3.5}))^{[26]}$ 。

算法 1 基于块坐标下降法的 3 层迭代优化算法^[27]

初始化: $(\epsilon^0, \theta^0, q^0)$ ，当前迭代次数 $m = 0$

开始迭代:

1) 给定第 m 次迭代优化变量初始值 $\theta[m]$, $q[m]$ ，根据闭式解得到优化的卸载率和资源分配 $\epsilon[m + 1]$;

2) 给定迭代优化变量初始值 $\epsilon[m + 1], q[m]$ ，根据半定松弛法、SCA 以及相位对齐准则得到优化的 RIS 上下行波束成形矩阵 $\theta[m + 1]$;

3) 给定 $\epsilon[m + 1], \theta[m + 1]$ ，通过引入松弛变量，一阶泰勒公式展开得到优化的 UAV 飞行轨迹 $q[m + 1]$;

4) 将 $\epsilon[m + 1], \theta[m + 1], q[m + 1]$ 代入目标函数，得到 $E[m + 1]$;

5) 更新 $m = m + 1$ ，返回步骤 1);

6) 直至收敛条件满足 $\|E[m + 1] - E[m]\| < \kappa$ 目标函数 $E[m]$ 收敛。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真环境及参数设置

本文将所提出的方案与其他基准方案进行了性能比较，基准方案主要包括以下两种。

(1) 初始 RIS 相位矩阵下联合优化卸载策略和 UAV 轨迹;

(2) 初始轨迹下联合优化卸载策略和 RIS 相位矩阵。

本实验设置了 3 个用户终端，其坐标分别为 $[(0, 10, 0), (5, -10, 0), (10, -10, 0)]$ m。而 UAV 的

起始和终点位置为 $[(0, 0, 10), (7, 1.8, 10)]$ m，始终在同一水平高度 10 m 飞行。RIS 的位置为 $(6, 4, 5)$ m。假设各终端的任务量均为 8 Mbit/s 且任务复杂度依次为 $[2\ 000, 1\ 500, 1\ 000]$ cycles/bit。假设 $T = 5$ s，时隙数 $N = 50$ 。通信链路模型表示为 $h = \sqrt{\beta_0} D^{-\alpha}$ ，其中 $\beta_0 = 30$ dB 表示单位距离的路径损耗， D 表示无线发射机到相应接收机的距离， α 表示通信链路的路径损耗因子。假设从 UAV 到 RIS、RIS 到终端和 UAV 到终端的路径损耗因子分别为 2.0、2.8 和 3.5^[29]。其他仿真参数见表 1。本文利用 MATLAB R2016a 进行仿真实验。

表 1 仿真参数

| 参数 | 数值 |
|---|---------------------|
| P/W | 0.01 |
| $N_0/(\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1})$ | 3×10^{-12} |
| S | 3 |
| F_k/Hz | 10^9 |
| E_0/J | 13×10^6 |
| F_s/Hz | 8×10^9 |
| r | 10^{-16} |
| κ | 9.65 |
| ρ | 0.01 |
| B_n/Hz | 10^4 |
| k | 3.5 |
| a | 2.0, 2.8 或 3.5 |

3.2 结果分析

UAV 飞行轨迹如图 3 所示，展示了当 $T = 5$ s 时，联合优化算法和基准方案在单位时间内对 UAV 轨迹采样得到的轨迹。根据本文提出的方案，UAV 采用了一种渐进的飞行策略接近 RIS。首先，UAV 利用其机动性靠近 RIS，然后考虑终端 1 和终端 2，并最终到达终端 1、终端 2 以及 RIS 的质心位置。这种逐步靠近 RIS 的飞行方式有利于接收更强的反射信号，同时缩短了信号传输距离从而节省了能量消耗。此外，这种飞行策略还有助于能量收集过程。当 UAV 到达三者的质心位置时，它可以获得更高的直接链路信道增益，从而进一步提高系统性能。接着 UAV 以曲线形式飞行到最终位置。这是由于终端 2 的任务复杂度高于终端 1 和 3，为了降低整体传输能耗，飞行轨迹被调整为更靠近终端 2。

图 4 展示了系统能耗与用户数量的关系。可以看出，3 种方案的系统能耗随着用户数量上升同步增加，而增长速率则逐渐放缓。这是由于用户数量的变化会牵动任务量的增加，任务量的细微变动会导致能耗指数级的增长。然而，无论用户数量增加

多少, 任务量总值是固定不变的, 因此增长速率逐渐变小。此外, 在任意用户数量场景下, 本文所提出的方案相较于初始相位矩阵的基准方案, 实现了波束成形矩阵的对齐优化, 相较于初始轨迹的基准方案实现了对 UAV 轨迹的 SCA 优化, 使得平均系统能耗分别降低了 10%、33%。

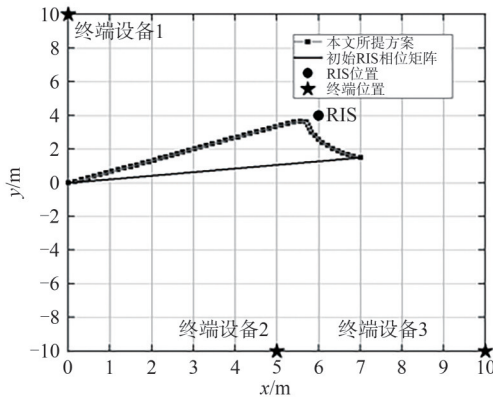


图3 UAV飞行轨迹

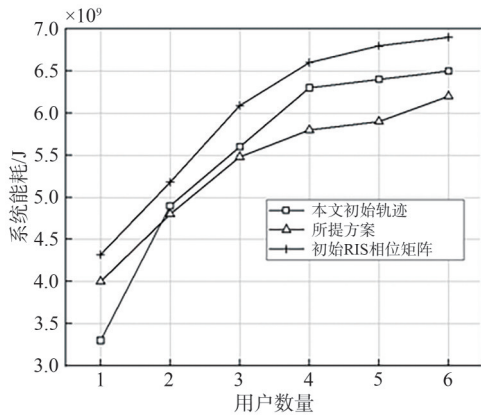


图4 系统能耗与用户数量的关系

图5和图6分别展示了本文所提方案和初始化RIS相位矩阵下系统能耗与单元片数量的关系。对比图5、图6可知, 随着单元片数量的增加, 本文所提出方案相较于初始化RIS方案的系统能耗分别降低了7%、43%、56%、59%、59%、86%。这归因于随着单元片数量增加, RIS提供了额外的瑞利信道和莱斯信道, 提高了传输速率, 从而减少了终端卸载能耗。而从图5可知, 当单元片数量分别为1和3时, 终端能耗改变最快, 降低了52%; 当单元片数量分别为7和9时, 终端能耗改变最慢, 降低了18%。这是由于所有的单元片的供能是有上限的, 即使单元片数量增多, 也无法使终端能耗得到更大的提升。

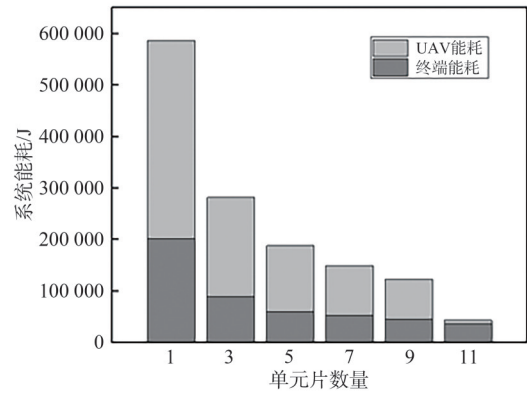


图5 本文所提方案下系统能耗与单元片数量的关系

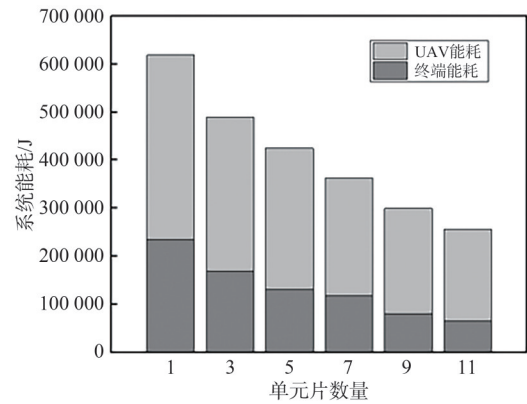


图6 初始化RIS相位矩阵下系统能耗与单元片数量的关系

由图6可知, 随着单元片数量的增加, 系统能耗分别降低了21%、14%、15%、13%、15%。当相位矩阵采用初始随机取值的方式时, 每次单元片的数量变化都会引起系统能耗15%的降低, 没有受到单元片供能的约束。

图7展示了终端卸载能耗与路径损耗因子的关系。路径损耗因子增大, 终端卸载能耗随之提升^[30]。这是因为路径损耗因子仅影响终端卸载能耗, 与UAV能耗无关。当固定U-R、R-G、 k 的路径损耗因子, 可以观察到U-G、 k 的最佳路径损耗因子值为3.5。同理, U-R和R-G、 k 的最佳路径损耗因子值分别为2.0、2.8。由于3种链路表示均保持一致, 故3条曲线的增长速率基本一致。由此可知, 当使用含路径损耗因子的信道模型时, 无论是视距信道、瑞利衰落信道抑或莱斯衰落信道, 路径损耗因子都有最佳值使得终端卸载能耗最小化。

图8展示了不同单元片数量下系统能耗的优化过程。当 $S=3$ 和 $S=6$ 时本文所提方案均能在20轮迭代内完成收敛^[31], 而初始相位矩阵的基准方案则需要迭代25轮。这归因于在RIS辅助下的相位矩阵对

齐优化能够带来更快的收敛速度和更好的优化结果，而初始相位矩阵的基准方案无法比拟。

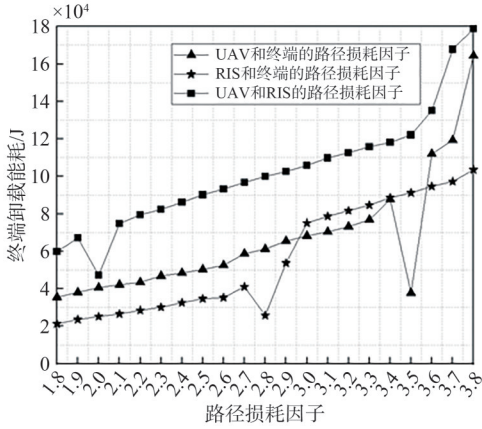


图7 终端卸载能耗与路径损耗因子的关系

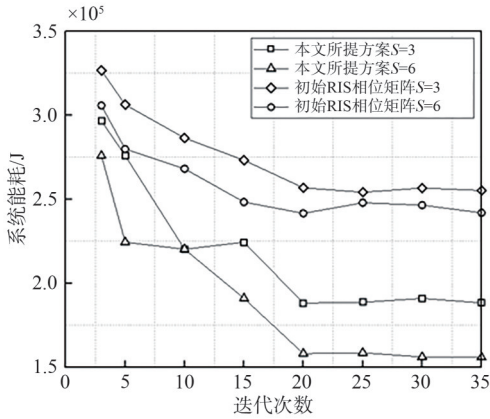


图8 不同单元片量下系统能耗的优化过程

4 结束语

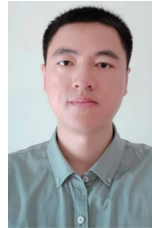
本文构建了一种新型的RIS辅助MEC中无线供电的能效优化策略，该策略将RIS改善信道质量同计算卸载相结合，令RIS和多个终端设备无线接收UAV提供的能量并用于上行任务卸载，能广泛适用于终端卸载任务到UAV时信道质量受到挑战的场景。此外，本文也涉及卸载率的分配，利用闭式解为其找到最优解，通过联合优化卸载率、上下行波束成形矩阵和UAV飞行轨迹，实现了最小化系统能耗的目标。通过验证，相比于其他基准方案，本文提出的联合优化方案在完成时延敏感性任务的同时，有效提高了任务卸载量、解决通信信道受阻问题、降低系统能耗。未来笔者将考虑采用多UAV协同方式来代替本文中单UAV辅助边缘计算的模型，进一步降低系统能耗。此外，合理提高任务卸载过程的鲁棒性以及UAV发射功率的可变性也可以作为未来研究方向。

参考文献:

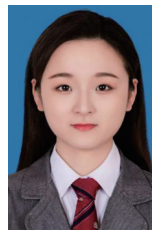
- [1] SHANG B D, POOR H V, LIU L J. Aerial reconfigurable intelligent surfaces meet mobile edge computing[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(6): 104-111.
- [2] AMRI M M. Recent trends in the reconfigurable intelligent surfaces (RIS): active RIS to brain-controlled RIS[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 299-304.
- [3] LYU W G, BAI J L, YAN Q L, et al. RIS-assisted green secure communications: active RIS or passive RIS? [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(2): 237-241.
- [4] LIU Z X, ZHAO S H, WU Q Q, et al. Joint trajectory design and resource allocation for IRS-assisted UAV communications with wireless energy harvesting[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(2): 404-408.
- [5] YANG Y F, ZHANG S W, ZHANG R. IRS-enhanced OFDMA: joint resource allocation and passive beamforming optimization[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 760-764.
- [6] LUO Y Z, DING W R, ZHANG B C. Optimization of task scheduling and dynamic service strategy for multi-UAV-enabled mobile-edge computing system[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(3): 970-984.
- [7] ZHANG T K, XU Y, LOO J, et al. Joint computation and communication design for UAV-assisted mobile edge computing in IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5505-5516.
- [8] BAI T, PAN C H, REN H, et al. Resource allocation for intelligent reflecting surface aided wireless powered mobile edge computing in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 5389-5407.
- [9] EL HABER E, ELHATTAB M, ASSI C, et al. Latency and reliability aware edge computation offloading via an intelligent reflecting surface[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(12): 3947-3951.
- [10] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [11] WANG W, TIAN H, NI W L. Secrecy performance analysis of IRS-aided UAV relay system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(12): 2693-2697.
- [12] GAO H H, HUANG W Q, LIU T, et al. PPO2: location privacy-oriented task offloading to edge computing using reinforcement learning for intelligent autonomous transport systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(7): 7599-7612.
- [13] WEI Z Q, CAI Y X, SUN Z, et al. Sum-rate maximization for IRS-assisted UAV OFDMA communication systems[C]//Proceedings

- of the GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [14] NGUYEN M D, LE L B, GIRARD A. UAV placement and resource allocation for intelligent reflecting surface assisted UAV-based wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(5): 1106-1110.
- [15] YUE X W, XIE J, LIU Y W, et al. Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface assisted NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(1): 189-204.
- [16] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [17] PAPAZAFEIROPOULOS A, ELBIR A M, KOURTESSIS P, et al. Cooperative RIS and STAR-RIS assisted mMIMO communication: analysis and optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(9): 11975-11989.
- [18] ARDAH K, GHEREKHLOO S, DE ALMEIDA A L F, et al. Double-RIS versus single-RIS aided systems: tensor-based mimo channel estimation and design perspectives[C]//Proceedings of the ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 5183-5187.
- [19] LUO W R, SHEN Y Y, YANG B, et al. Joint 3-D trajectory and resource optimization in multi-UAV-enabled IoT networks with wireless power transfer[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(10): 7833-7848.
- [20] BANSAL A, AGRAWAL N, SINGH K, et al. RIS selection scheme for UAV-based multi-RIS-aided multiuser downlink network with imperfect and outdated CSI[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(8): 4650-4664.
- [21] MAO S, ZHANG N, LIU L, et al. Computation rate maximization for intelligent reflecting surface enhanced wireless powered mobile edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10): 10820-10831.
- [22] LIU B C, ZHANG W K, CHEN W H, et al. Online computation offloading and traffic routing for UAV swarms in edge-cloud computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(8): 8777-8791.
- [23] ZHAO Y J, LV X. Network coexistence analysis of RIS-assisted wireless communications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 63442-63454.
- [24] LIU S F, LIU R, LI M, et al. Joint BS-RIS-user association and beamforming design for RIS-assisted cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(5): 6113-6128.
- [25] NIU H H, LIANG X H. Weighted sum-rate maximization for STAR-RISs-aided networks with coupled phase-shifters[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 1083-1086.
- [26] LIM B, ALIZADEH A, VU M. Low complexity joint user association, beamforming and RIS reflection optimization for load balancing in a multi-RIS assisted network[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [27] MU G Z, ZHAO Y S, ZHONG S D, et al. An element selection enhanced hybrid relay-RIS assisted communication system[C]//Proceedings of the 2022 5th International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [28] LIU S F, NI P F, LIU R, et al. BS-RIS-user association and beamforming designs for RIS-aided cellular networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 563-568.
- [29] WANG H, ZHAO H T, SHI Z, et al. RIS-level SIC for uplink cascaded-RIS assisted NOMA system[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(7): 1884-1888.
- [30] DE SOUZA JUNIOR W, ABRÃO T. NOMA-aided double RIS under Nakagami-m fading: Channel and System Modelling[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [31] FAISAL A, AL-NAHHAL I, DOBRE O A, et al. Deep reinforcement learning for RIS-assisted FD systems: single or distributed RIS? [J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(7): 1563-1567.

[作者简介]



余雪勇(1979-), 男, 博士, 江苏省无线通信与物联网省高校重点实验室副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网技术、移动边缘计算和异构无线网络资源管理。



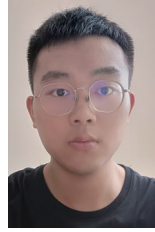
宋家宁(1999-), 女, 江苏省无线通信与物联网省高校重点实验室硕士生, 主要研究方向为移动边缘计算、智能反射面技术。



朱洪波(1956-), 男, 《物联网学报》执行主编, 南京邮电大学教授、物联网研究院院长, 中国通信学会物联网专业委员会主任, 中国电子学会通信分会主任, 中国(无锡)物联网研究院院长, 主要研究方向为无线通信网络、移动通信与物联网等。



张露丹(1999-), 女, 江苏省无线通信与物联网省高校重点实验室硕士生, 主要研究方向为无线资源管理、边缘计算和区块链。



王大刚(2002-), 男, 江苏省无线通信与物联网省高校重点实验室硕士生, 主要研究方向为无线通信、信号处理和网络安全、智能反射面和物联网。