

doi:10.13682/j.issn.2095-6533.2025.06.001

IRS 辅助多用户 BC 安全卸载的感知 MEC 网络资源分配方案

刘伯阳, 孙连锐, 万宇航, 李 泽, 贺嘉成

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 针对物联网(Internet of Things, IoT)移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)网络中的频谱资源紧张、计算资源不足及信息传输易被窃听与篡改的问题,提出一种智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)辅助多用户反向散射通信(Backscatter Communication, BC)技术安全卸载的感知 MEC 网络资源分配方案。通过融合认知无线电(Cognitive Radio, CR)、IRS 与 BC 技术,构建以安全 MEC 网络吞吐量最大化为目标的优化问题,并采用基于块坐标下降(Block Coordinate Descent, BCD)、拉格朗日对偶及二次变换的方法进行联合优化求解。仿真结果表明,所提方案与随机 IRS 相位和随机波束成形两个方案相比,次用户可完成的任务量分别提升了约 260% 和 178%,验证了其在复杂约束条件下的有效性与可行性。

关键词: 移动边缘计算; 认知无线电; 智能反射表面; 反向散射通信; 拉格朗日对偶; 无人机

中图分类号: TN929

文献标志码: A

文章编号: 2095-6533(2025)06-0001-10

Resource allocation scheme for perception-based MEC networks with IRS-assisted secure offloading in multi-user BC

LIU Boyang, SUN Lianrui, WAN Yuhang, LI Ze, HE Jiacheng

(School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an 710121, China)

Abstract: Aiming at the problems of tight spectrum resources, insufficient computing resources, and easy interception and tampering of information transmission in the Internet of Things (IoT) mobile edge computing (MEC) network, a resource allocation scheme for the IRS-assisted user backscatter communication (BC) technology secure offloading perception MEC network is proposed. By integrating cognitive radio (CR), IRS and BC technologies, an optimization problem targeting the maximization of secure MEC network throughput is constructed, and the joint optimization solution is carried out by using methods based on block coordinate descent (BCD), Lagrangian duality, and quadratic transformation. Simulation results show that compared with the random IRS phase scheme and the random beamforming scheme, the proposed scheme can increase the task computation amount of secondary users by about 260% and 178%, verifying its effectiveness and feasibility under complex constraint conditions.

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61901366); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-851); 陕西省普通高校青年杰出人才支持计划项目

引文格式: 刘伯阳, 孙连锐, 万宇航, 等. IRS 辅助多用户 BC 安全卸载的感知 MEC 网络资源分配方案[J]. 西安邮电大学学报, 2025, 30(6): 1-10.

LIU B Y, SUN L R, WAN Y H, et al. Resource allocation scheme for perception-based MEC networks with IRS-assisted secure offloading in multi-user BC[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2025, 30(6): 1-10.

Keywords: mobile edge computing; cognitive radio; intelligent reflecting surface; backscatter communication; Lagrangian duality; unmanned aerial vehicle

随着物联网(Internet of Things, IoT)的快速发展,自动驾驶、虚拟现实等高计算复杂度与时延敏感型应用不断涌现,对IoT节点的计算能力提出了更高要求。然而,受限于尺寸和成本,IoT设备的计算能力和电池容量通常不足,难以满足日益增长的计算需求。为解决这一问题,移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)技术^[1-2]应运而生。MEC通过将计算资源部署在靠近用户和数据源的网络边缘,显著提升了服务性能并降低了时延^[3]。在IoT-MEC网络中,IoT设备可以通过无线频谱将计算任务卸载至附近的MEC服务器进行处理。但是,随着IoT设备数量的快速增长以及数据交换量的激增^[4],频谱资源紧张和能量不足问题日益突出。现有的固态频谱分配机制无法为IoT节点提供专用频谱,而工业、科学和医疗(Industrial, Scientific and Medical, ISM)频段带宽有限,在节点密集区域易造成链路拥塞。此外,IoT设备电池容量有限,难以支持频繁的任务卸载和数据传输^[5]。因此,亟须探索新的解决方案,以缓解IoT-MEC网络中频谱资源短缺和能量不足的双重挑战。

反向散射通信(Backscatter Communication, BC)作为一种低成本、低功耗的通信技术,为上述问题提供了潜在解决方案^[6]。BC技术通过调整天线负载阻抗实现信息传输^[7],无需复杂的射频发送硬件,从而大幅降低了能耗。然而,在BC辅助的MEC系统中,IoT设备在收集能量时易受到建筑物遮挡,导致信道质量下降和服务性能不佳,而智能反射表面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)技术的引入可以有效改善这一问题^[8]。IRS通过控制反射单元的相位状态,能够动态调整入射信号的反射方向,从而增强目标节点的接收信噪比,优化IoT设备与MEC服务器之间的信道质量^[9-10]。此外,认知无线电(Cognitive Radio, CR)作为一种频谱共享技术,为解决频谱资源紧张问题提供了新思路^[11-12]。CR允许非授权用户在对授权用户造成的干扰低于干扰容限的前提下,接入授权用户进行信息传递,其通过动态频谱接入技术,可以有效提升频谱效率,为次用户提供频谱接入机会^[13]。通过将BC、IRS、CR与MEC技术相

结合,可以为IoT网络提供实时、可靠且高效的计算服务。但是,无线网络的广播特性使得信息传输面临安全威胁^[14],尤其是在低空经济快速发展的背景下,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的广泛部署易对地面用户的信息传输安全构成严重威胁^[15-16]。针对这一问题,物理层安全(Physical Layer Security, PLS)技术通过利用信道差异设计友好干扰或合作干扰策略,能够有效降低窃听者的接收信噪比,从而保障信息传输的安全速率^[17-18]。

目前,BC和IRS辅助MEC网络已得到广泛研究。例如,文献[19]研究了IRS和BC辅助的MEC网络的通信干扰问题,通过实现吞吐量最大化与延迟最小化,提高了MEC系统的能量效率。文献[20]提出了IRS和BC辅助的MEC多层计算网络框架,实现了MEC系统的总计算比特数最大化。文献[21-22]聚焦于BC和IRS辅助的MEC网络的能量效率问题,最大化实现系统的计算能效。同时,CR与MEC的结合,进一步为MEC系统数据卸载过程中的频谱资源短缺问题提供了解决方案。文献[23]和文献[24]提出了一种MEC计算网络架构,集成了MEC、CR和无线能量传输3种技术,实现了MEC系统的计算比特最大化。文献[25]研究了多用户协作的MEC网络为SU提供计算卸载服务的问题,实现了MEC系统的服务成本最小化。文献[26]考虑了非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)协作的中继卸载计算服务问题,实现了MEC系统的任务卸载能耗最小化。文献[27]分析了基于NOMA和CR辅助的无线供电MEC网络的计算时延问题,实现了MEC系统的计算时延最小化。但是,上述研究均未充分考虑物理层安全的影响,未能全面保障系统的信息传输安全。

基于以上分析,针对IoT-MEC网络中频谱资源紧张、计算资源不足及信息传输易被窃听与篡改的问题,拟提出IRS辅助多用户BC安全卸载的感知MEC网络资源分配方案。通过联合优化主发射机(Primary Transmitter, PT)发射波束成形,次发送机(Secondary Transmitter, ST)发射波束成形、ST本地计算频率和卸载时隙长度,实现MEC网络

的系统吞吐量最大化。为求解该吞吐量最大化问题,采用基于块坐标下降(Block Coordinate Descent, BCD)、拉格朗日对偶变换及二次变换法的联合迭代求解方法进行求解。最后,通过将所提方案与随机 IRS 相位方案和随机波束成形方案相比,验证所提方案的性能。

1 系统模型

为了缓解 MEC 网络中的频谱资源紧张、计算资源不足及信息传输易被窃听与篡改的问题,考虑 IRS 联合 CR 辅助的 BC-MEC 安全卸载网络模型。该网络包含 M 个部署 MEC 服务器的次接收机(Secondary Receiver, SR), K 个搭载 IRS 且支持 BC 技术的 ST, 1 个 PT, 1 个主接收机(Primary Receiver, PR)和 I 个 UAV 组成的潜在窃听用户,具体系统模型示意图如图 1 所示。其中,PT 装备 N_T 根发送天线($N_T \leq 2$),每个 IRS 含有 L 个反射单元,组成均匀平面阵列,SR、PR 和窃听者均装备单根天线。令 $\mathcal{K} = \{1, 2, 3, \dots, K\}$ 、 $\mathcal{M} = \{1, 2, 3, \dots, M\}$ 、 $\mathcal{I} = \{1, 2, 3, \dots, I\}$ 和 $\mathcal{L} = \{1, 2, 3, \dots, L\}$ 分别表示次级发送机 ST 集合、次级接收机 SR 集合、窃听者集合和 IRS 反射单元集合。ST 通过 IRS 接收的载波信号将次用户请求的计算任务数据卸载给 SR。

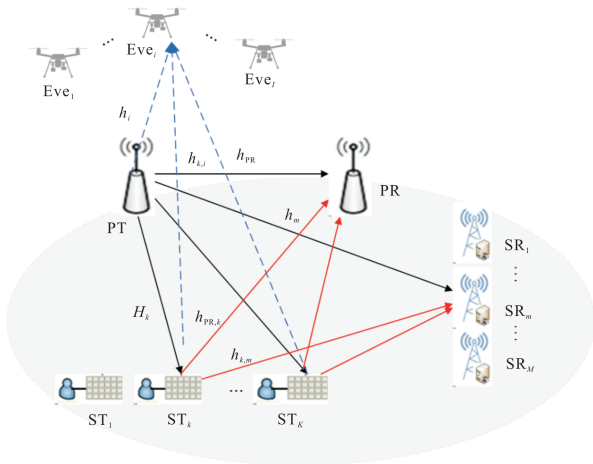


图 1 系统模型示意图

假设用户采用部分卸载模式,每个 ST 的计算任务可按位独立并划分为多个子集。ST 可以同时进行本地计算和任务卸载,一部分任务在本地计算,另一部分任务卸载至 SR 进行边缘计算,SR 计算完成后将结果返回给 ST。各 ST 采用时分多址

方案进行任务卸载,以避免干扰,时隙帧结构示意图如图 2 所示。任务周期总长度为 T , $t_k (\forall k \in \mathcal{K})$ 表示第 k 个 ST 的卸载时隙长度。第 k 个用户在时隙 t_k 中反射 IRS 接收的载波信号,同时,吸收电磁能量并进行本地计算,而第 k 个用户在其他时隙 $t_i (i \neq k, \forall k \in \mathcal{K})$ 仅本地计算电路工作。对于通常的计算密集型任务,假设其任务结果回传时间可以忽略,即结果下载时间 $\tau \approx 0$ 。

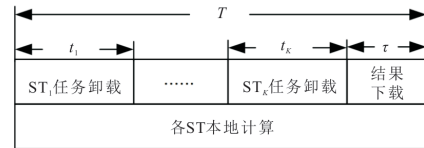


图 2 时隙帧结构示意图

该系统模型考虑所有信道互易,且在周期 T 内保持不变,不同时隙之间信道会发生变化。令 θ_k 表示第 k 个 ST 的 IRS 反射相位矢量, Θ_k 表示第 k 个 ST 的 IRS 对角反射矩阵, $\Theta_k = \text{diag}(\theta_k)$, $\forall k \in \mathcal{K}$ 。

1.1 计算模型

令 $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{L \times N_T}$ 表示 PT 与第 k 个 ST 之间的信道,则第 k 个 ST 发送的信号为

$$\Theta_k \mathbf{H}_k \mathbf{w}_k s = \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \sum_{r=1}^M \theta_{k,r} x_{k,r} \quad (1)$$

式中: s 表示 PT 的发送数据,且 $V[|s|^2] = 1$; \mathbf{w}_k 为第 k 个 ST 发送数据的波束成形矢量; $x_{k,r}$ 表示第 k 个 ST 向第 $r (r \in \mathcal{M})$ 个 SR 发送的任务数据,且 $V[|x_{k,r}|^2] = 1$; $\theta_{k,r}$ 为第 k 个 ST 发给第 $r (r \in \mathcal{M})$ 个 SR 的 IRS 反射相位矢量; IRS 反射系数小于 1,即需要满足 $[\sum_{m=1}^M \theta_{k,r} \theta_{k,r}^H]_{l,l} \leq 1, l \in \mathcal{L}$ 。

第 k 个 ST 在任务周期 T 内的本地计算比特数 $D_{\text{loc},k} = f_k T / C_k$, $\forall k \in \mathcal{K}$, 其中, C_k 表示第 k 个 ST 计算单位比特数据所消耗的 CPU 周期数, f_k 为第 k 个 ST 的本地计算频率。

令 $\mathbf{h}_{k,m} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 表示第 k 个 ST 与第 m 个 SR 之间的信道, $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 表示 PT 与第 m 个 SR 之间的信道,则在第 t_k 个时隙,第 m 个 SR 处接收到的信号为

$$y_{k,m} = \sum_{r=1}^M \mathbf{h}_{k,m}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k^H \mathbf{w}_k) \theta_{k,r} x_{k,r} + \mathbf{h}_m \mathbf{w}_k s + n_1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (2)$$

式中: n_1 为第 m 个 SR 处的高斯白噪声,且满足均值为 0, 方差为 σ_1^2 的复高斯分布,即满足 $n_1 \sim$

$\mathcal{CN}(0, \sigma_1^2)$ 。

进一步可将第 t_k 个时隙中第 m 个 SR 的接收信干噪比(Signal to Interference Plus Noise Ratio, SINR)表示为

$$\gamma_{k,m} = \frac{|h_{k,m}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \boldsymbol{\theta}_{k,m}|^2}{\sum_{r \in \mathcal{M}, r \neq m} |h_{k,m}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,r}|^2 + |h_m^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_1^2} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}_{k,m}$ 表示第 k 个 ST 发送给第 $m(m \in \mathcal{M})$ 个 SR 的 IRS 反射相位矢量。

根据香农公式及式(3),第 t_k 个时隙中第 k 个 ST 卸载给第 m 个 SR 的计算比特数可表示为

$$D_{\text{off},k,m} = t_k B \log_2(1 + \gamma_{k,m}), \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (4)$$

1.2 能耗模型

令 $\mathbf{h}_{\text{PR},k} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 表示第 k 个 ST 与 PR 之间的信道、 $\mathbf{h}_{\text{PR}} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 表示 PT 与 PR 之间的信道,则在第 t_k 个时隙 PR 处接收到的信号为

$$y_{\text{PR},k} = \sum_{r=1}^M \mathbf{h}_{\text{PR},k}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \boldsymbol{\theta}_{k,r} x_{k,r} + \mathbf{h}_{\text{PR}}^H \mathbf{w}_k s + n_2, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (5)$$

式中: n_2 为 PR 处的高斯白噪声,且 $n_2 \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_2^2)$ 。那么,第 t_k 个时隙中 PR 的 SINR 表示为

$$\gamma_{\text{PR},k} = \frac{|\mathbf{h}_{\text{PR}}^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{r=1}^M |h_{\text{PR},k}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,r}|^2 + \sigma_2^2}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (6)$$

令 $\mathbf{h}_{k,i} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 表示第 k 个 ST 与第 i 个窃听者之间的信道、 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 表示 PT 与第 i 个窃听者之间的信道,则在第 t_k 个时隙,第 i 个窃听者接收的信号 $x_{k,m}$ 的 SINR 表示为

$$\gamma_{k,i,m} = \frac{|h_{k,i}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \boldsymbol{\theta}_{k,m}|^2}{\sum_{r=1, r \neq m}^M |h_{k,i}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,r}|^2 + |h_i^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_3^2} \quad (7)$$

式中: $\forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall m \in \mathcal{M}$ 。

此时,第 k 个 ST 的能耗为

$$E_k = T \epsilon_k f_k^3 + t_k L \mu, \forall k \in \mathcal{K} \quad (8)$$

式中: ϵ_k 为第 k 个 ST 的电容系数; μ 为单个 IRS 反射单元的功率。

2 问题建模

令 $t = \{t_k\}_{\forall k \in \mathcal{K}}$ 表示 ST 的卸载时隙集合、 $\mathbf{w} = \{\mathbf{w}_k\}_{\forall k \in \mathcal{K}}$ 表示 PT 发送数据的波束成形矢量集合、

$f = \{f_k\}_{\forall k \in \mathcal{K}}$ 表示 ST 的本地计算频率集合以及 $\boldsymbol{\theta} = \{\boldsymbol{\theta}_{k,m}\}_{\forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}}$ 表示 ST 发送波束成形矩阵集合。此时,建立优化问题 P_0 为

$$P_0: \max_{\mathbf{w}, f, t, \boldsymbol{\theta}} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M t_k B \log_2 \cdot \left(1 + \frac{|h_{k,m}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \boldsymbol{\theta}_{k,m}|^2}{\sum_{r \in \mathcal{M}, r \neq m} |h_{k,m}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,r}|^2 + |h_m^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_1^2}\right) + \sum_{k=1}^K \frac{f_k T}{C_k} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } C_1: \frac{|\mathbf{h}_{\text{PR}}^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{r=1}^M |h_{\text{PR},k}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,r}|^2 + \sigma_2^2} \geq \epsilon_{\text{th}}, \forall k \in \mathcal{K},$$

$$C_2: \frac{|h_{k,i}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \boldsymbol{\theta}_{k,m}|^2}{\sum_{r=1, r \neq m}^M |h_{k,i}^H \boldsymbol{\Theta}_{k,r}|^2 + |h_i^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_3^2} \leq \gamma_{\text{th}},$$

$$\forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall m \in \mathcal{M},$$

$$C_3: \left[\sum_{r=1}^M \boldsymbol{\theta}_{k,r} \boldsymbol{\theta}_{k,r}^H \right]_{l,l} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall l \in \mathcal{L},$$

$$C_4: |\mathbf{w}_k|^2 \leq P_{\text{max}}, \forall k \in \mathcal{K},$$

$$C_5: 0 \leq f_k \leq f_{k,\text{max}}, \forall k \in \mathcal{K},$$

$$C_6: 0 \leq t_k, \sum_{k=1}^K t_k \leq T, \forall k \in \mathcal{K},$$

$$C_7: E_k \leq E_{\text{th},k}, \forall k \in \mathcal{K}.$$

式中: $\epsilon_{\text{th}}, \gamma_{\text{th}}, P_{\text{max}}, f_{k,\text{max}}$ 及 $E_{\text{th},k}$ 分别表示 PR 的信噪比门限、保证物理层安全的窃听者信噪比容限、PT 的最大发射功率、第 k 个 ST 本地计算的最大频率及第 k 个 ST 的能耗; C_1 为 PR 的接收信噪比门限约束,保证 ST 通信时不影响 PT 通信; C_2 为用户的安全卸载约束; C_3 为反射系数的近似约束; C_4 为 PT 发送功率约束; C_5 为 ST 的本地计算频率约束; C_6 为 ST 的任务卸载时间约束; C_7 为 ST 的能量约束。

3 优化问题求解

在优化问题 P_0 中,优化变量 $\mathbf{w}, \boldsymbol{\theta}$ 及 t 在目标函数与约束条件中存在复杂的耦合,因此,所建立的优化问题为非凸问题。基于此,采用基于目标函数转换、约束变形及问题求解等步骤进行迭代求解。

3.1 目标函数转换

由于优化问题 P_0 中的目标函数由多个对数函数构成,优化参数存在强耦合情况,目标函数非凸。因此,基于拉格朗日对偶法和二次变换法,通过引入辅助变量 $\alpha_{k,m}$ 和 $\beta_{k,m}$,将目标函数转换为

$$O_{\text{obj1}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M t_k B [\log_2(1 + \alpha_{k,m}) - \alpha_{k,m}] + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (2 \sqrt{t_k B(1 + \alpha_{k,m})} \text{Re}(\beta_{k,m}^* A_{k,m}) - |\beta_{k,m}|^2 B_{k,m}) + \sum_{k=1}^K \frac{f_k T}{C_k} \quad (10)$$

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部。

为方便描述,令 $a = \{\alpha_{k,m} | k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}\}$, 令 $b = \{\beta_{k,m} | k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}\}$, 优化问题 P_0 可重新表示为

$$P_1: \max_{\mathbf{w}, f, t, \boldsymbol{\theta}, a, b} O_{\text{obj1}} \quad (11)$$

s. t. $9C_1 \sim 9C_7$.

针对该非凸问题中的优化参数耦合问题,采用分块迭代算法对问题进行分块求解,将问题分为 4 个子问题进行求解。首先,固定变量 \mathbf{w}, f, t 与 $\boldsymbol{\theta}$, 通过求取目标函数对辅助变量 $\alpha_{k,m}$ 和 $\beta_{k,m}$ 的导数,获得最优设计变量 a 与 b 的闭式解。其次,将变量 a 与 b 固定为优化后的变量值,同时固定 \mathbf{w} 与 $\boldsymbol{\theta}$, 问题重新变形为凸优化问题,实现变量 f 与 t 的优化。继续固定 a, b, f, t 与 $\boldsymbol{\theta}$, 通过变量替换对 \mathbf{w} 进行优化。最后,固定 a, b, f, t 与 \mathbf{w} , 对 $\boldsymbol{\theta}$ 进行优化。

3.2 子问题求解

3.2.1 变量 $\alpha_{k,m}$ 和 $\beta_{k,m}$ 的优化

当优化变量 \mathbf{w}, f, t 和 $\boldsymbol{\theta}$ 固定时,子问题表示为

$$P_{1.1}: \max_{a, b} O_{\text{obj1}} \quad (12)$$

s. t. $9C_1 \sim 9C_7$.

根据 KKT 条件,可得到 $\alpha_{k,m}$ 和 $\beta_{k,m}$ 的闭式解 $\alpha_{k,m}^*$ 和 $\beta_{k,m}^*$ 的表达式分别为

$$\alpha_{k,m}^* = \frac{|\mathbf{h}_{k,m}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \boldsymbol{\theta}_{k,m}|^2}{\sum_{r \in \mathcal{M}, r \neq m} |\mathbf{h}_{k,m}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k) \boldsymbol{\theta}_{k,r}|^2 + |\mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_1^2} \quad (13)$$

$$\beta_{k,m}^* = \frac{\sqrt{t_k B(1 + \alpha_{k,m}^*)} A_{k,m}}{B_{k,m}} \quad (14)$$

3.2.2 计算频率 f 和计算卸载时间 t 的优化

当优化变量 $\mathbf{w}, \boldsymbol{\theta}, a$ 和 b 固定时,子问题表示为

$$P_2: \max_{f, t} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M t_k B [\log_2(1 + \alpha_{k,m}) - \alpha_{k,m}] + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (2 \sqrt{t_k B(1 + \alpha_{k,m})} \text{Re}(\beta_{k,m}^* A_{k,m})) + \sum_{k=1}^K \frac{f_k T}{C_k} \quad (15)$$

s. t. $C_1: 0 \leq f_k \leq f_{k,\max}, \forall k \in \mathcal{K}$,

$$C_2: 0 \leq t_k, \sum_{k=1}^K t_k \leq T, \forall k \in \mathcal{K},$$

$$C_3: T \epsilon_k f_k^3 + t_k L \mu \leq E_{\text{th},k}, \forall k \in \mathcal{K}.$$

问题 P_2 是一个典型的二次规划问题,其具有凸性,因此可利用现有科学工具进行高效求解,得到 f 和 t 的次优解。

3.2.3 PT 的波束成形 \mathbf{w} 的优化

当优化变量 a, b, f, t 与 $\boldsymbol{\theta}$ 固定时,子问题表示为

$$P_3: \max_{\mathbf{w}} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (2 \sqrt{t_k B(1 + \alpha_{k,m})} \cdot \text{Re}(\beta_{k,m}^* A_{k,m}) - |\beta_{k,m}|^2 B_{k,m}) \quad (16)$$

s. t. $9C_1, 9C_2, 9C_4$

1) 目标函数转换。由于问题 P_3 的目标函数非凸,对目标函数进行变量替换。目标函数重新表示为

$$\min_{\hat{\mathbf{w}}_k} \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\hat{\mathbf{G}}_k \hat{\mathbf{W}}_k) - \text{Tr}(\mathbf{Z}_k \hat{\mathbf{W}}_k) \quad (17)$$

式中: $\hat{\mathbf{G}}_k$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{G}_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{G}_k = \sum_{m=1}^M (\beta_{k,m}^H \mathbf{h}_{k,m}^H \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_{k,r}) \cdot \mathbf{H}_k)^H \cdot (\beta_{k,m}^H \mathbf{h}_{k,m}^H \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_{k,r}) \mathbf{H}_k) + (\beta_{k,m}^H \mathbf{h}_m^H)^H \beta_{k,m}^H \mathbf{h}_m^H$; \mathbf{Z}_k 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{z}_k \\ \mathbf{z}_k^H & \mathbf{0} \end{bmatrix}$, 且 $\mathbf{z}_k = \sum_{m=1}^M \sqrt{t_k B(1 + \alpha_{k,m})} (\beta_{k,m}^H \mathbf{h}_{k,m}^H \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_{k,m}) \mathbf{H}_k)^H$; $\hat{\mathbf{W}}_k$ 为 $\hat{\mathbf{w}}_k \hat{\mathbf{w}}_k^H$, $\hat{\mathbf{w}}_k$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{w}_k \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

2) 约束转换。问题 P_3 约束为非凸约束,因此需进行代数变换,可得约束为

$$\begin{cases} \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{0,k} \hat{\mathbf{W}}_k) \geq \epsilon_{\text{th}} \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{1,k} \hat{\mathbf{W}}_k) + \epsilon_{\text{th}} \sigma_2^2 \\ \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{2,k,i,m} \hat{\mathbf{W}}_k) \leq \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{3,k,i} \hat{\mathbf{W}}_k) + \gamma_{\text{th}} \sigma_3^2 \\ \text{Tr}(\hat{\mathbf{I}} \hat{\mathbf{W}}_k) \leq P_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\hat{\mathbf{J}}_{0,k}$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{0,k} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{J}_{0,k} = (\mathbf{h}_{\text{PR}}^H)^H \mathbf{h}_{\text{PR}}^H$; $\hat{\mathbf{J}}_{1,k}$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{1,k} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{J}_{1,k} = \sum_{r=1}^M (\mathbf{h}_{\text{PR},k}^H \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_{k,r}) \mathbf{H}_k)^H (\mathbf{h}_{\text{PR},k}^H \cdot \text{diag}(\boldsymbol{\theta}_{k,r}) \mathbf{H}_k)$; $\hat{\mathbf{J}}_{2,k,i,m}$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{2,k,i,m} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{J}_{2,k,i,m} = (\mathbf{h}_{k,i}^H \cdot \text{diag}\{\boldsymbol{\theta}_{k,m}\} \mathbf{H}_k)^H (\mathbf{h}_{k,i}^H \text{diag}\{\boldsymbol{\theta}_{k,m}\} \mathbf{H}_k)$; $\hat{\mathbf{J}}_{3,k,i}$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{3,k,i} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{J}_{3,k,i} = \gamma_{\text{th}} \sum_{r=1, r \neq m}^M (\mathbf{h}_{k,i}^H \text{diag}\{\boldsymbol{\theta}_{k,r}\} \mathbf{H}_k)^H \cdot (\mathbf{h}_{k,i}^H \text{diag}\{\boldsymbol{\theta}_{k,r}\} \mathbf{H}_k) + \gamma_{\text{th}} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H$ 。 $\forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall m \in \mathcal{M}$; $\hat{\mathbf{I}}$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}$, 其中 \mathbf{I} 为 N_T 阶单位矩阵,

$\hat{\mathbf{I}}$ 为 \mathbf{I} 的增广矩阵。

3) 问题转换。令 $\hat{\mathbf{W}} = \{\hat{\mathbf{W}}_1, \hat{\mathbf{W}}_2, \dots, \hat{\mathbf{W}}_K\}$, 则优化问题 P_3 的子问题可等价表示为

$$P_{3.1} : \min_{\hat{\mathbf{W}}} \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\hat{\mathbf{G}}_k \hat{\mathbf{W}}_k) - \text{Tr}(\mathbf{Z}_k \hat{\mathbf{W}}_k) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } C_1 : & \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{0,k} \hat{\mathbf{W}}_k) \geq \epsilon_{\text{th}} \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{1,k} \hat{\mathbf{W}}_k) + \epsilon_{\text{th}} \sigma_2^2, \\ & \forall k \in \mathcal{K}, \\ C_2 : & \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{2,k,i,m} \hat{\mathbf{W}}_k) \leq \text{Tr}(\hat{\mathbf{J}}_{3,k,i} \hat{\mathbf{W}}_k) + \gamma_{\text{th}} \sigma_3^2, \\ & \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall m \in \mathcal{M}, \\ C_3 : & \text{Tr}(\hat{\mathbf{I}} \hat{\mathbf{W}}_k) \leq P_{\max}, \forall k \in \mathcal{K}, \\ C_4 : & [\hat{\mathbf{W}}_k]_{N_T+1, N_T+1} = 1, \forall k \in \mathcal{K}, \\ C_5 : & \hat{\mathbf{W}}_k \succeq 0, \forall k \in \mathcal{K}, \\ C_6 : & \text{Rank}(\hat{\mathbf{W}}_k) = 1, \forall k \in \mathcal{K}. \end{aligned}$$

由于 C_6 是非凸的秩一约束, 因此该问题仍为非凸问题, 使用半正定规划松弛 (Semidefinite Programming Relaxation, SDR) 将 $\text{Rank}(\hat{\mathbf{W}}_k) = 1$ 约束进行松弛, 此时将问题 $P_{3.1}$ 转换为一个凸优化问题

$$P_{3.2} : \min_{\hat{\mathbf{W}}} \sum_{k=1}^K \text{Tr}(\hat{\mathbf{G}}_k \hat{\mathbf{W}}_k) - \text{Tr}(\mathbf{Z}_k \hat{\mathbf{W}}_k) \quad (20)$$

$$\text{s. t. } 19C_1 \sim 19C_5.$$

问题 $P_{3.2}$ 是凸优化问题, 可利用凸优化求解工具进行求解。

3.2.4 次用户波束成形 θ 的子优化问题

由 P_1 的目标函数可知, 当优化变量 a, b, f, t 与 w 固定时, 子问题可表示为

$$P_4 : \max_{\theta} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (2 \sqrt{t_k B (1 + \alpha_{k,m})} \cdot \text{Re}(\beta_{k,m}^* A_{k,m}) - |\beta_{k,m}|^2 B_{k,m}) \quad (21)$$

$$\text{s. t. } 9C_1 \sim 9C_3.$$

1) 目标函数转换。对 P_4 的目标函数进行变量替换, 将 $A_{k,m}$ 和 $B_{k,m}$ 代入, 并将无关项化简, 可得目标函数为

$$\max_{\theta} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M [\text{Tr}(\mathbf{Q}_k \hat{\Theta}_{k,m}) - \sum_{r=1}^M \text{Tr}(\hat{\mathbf{U}}_{k,m} \hat{\Theta}_{k,r})] \quad (22)$$

式中: \mathbf{Q}_k 为 $\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{q}_k \\ \mathbf{q}_k^H & 0 \end{bmatrix}$, 且 $\mathbf{q}_k = \sqrt{t_k B (1 + \alpha_{k,m})} \beta_{k,m}^* \mathbf{h}_{k,m}^H \cdot$

$\text{diag}\{\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k\}; \hat{\Theta}_{k,m}$ 为 $\hat{\Theta}_{k,m} \hat{\Theta}_{k,m}^H$, 且 $\hat{\Theta}_{k,m} = \begin{bmatrix} \theta_{k,m} \\ 1 \end{bmatrix}; \hat{\mathbf{U}}_{k,m}$

为 $\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{k,m} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 且 $\mathbf{U}_{k,m} = \beta_{k,m}^H (\mathbf{h}_{k,m}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k))^H \cdot$

$(\mathbf{h}_{k,m}^H \cdot \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k)) \beta_{k,m}; \hat{\Theta}_{k,r}$ 为 $\hat{\theta}_{k,r} \hat{\theta}_{k,r}^H$, 且 $\hat{\theta}_{k,r} = \begin{bmatrix} \theta_{k,r} \\ 1 \end{bmatrix}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}.$

2) 约束转换。问题 P_4 约束为非凸约束, 因此需进行代数变换, 可得约束为

$$\begin{cases} |\mathbf{h}_{\text{PR}}^H \mathbf{w}_k|^2 \geq \epsilon_{\text{th}} \sum_{r=1}^M \text{Tr}(\hat{\mathbf{Y}}_{1,k} \hat{\Theta}_{k,r}) + \epsilon_{\text{th}} \sigma_2^2, \forall k \in \mathcal{K} \\ \text{Tr}(\hat{\mathbf{Y}}_{2,k,i} \hat{\Theta}_{k,m}) \leq \sum_{r=1, r \neq m}^M \text{Tr}(\hat{\mathbf{Y}}_{3,k,i} \hat{\Theta}_{k,r}) + \gamma_{\text{th}} (|\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_3^2), \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall m \in \mathcal{M} \\ \left[\sum_{r=1}^M \hat{\Theta}_{k,r} \right]_{l,l} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall r \in \mathcal{M}, \forall l \in \mathcal{L} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\hat{\mathbf{Y}}_{1,k}$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{1,k} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 且 $\mathbf{Y}_{1,k} = (\mathbf{h}_k^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k))^H$

$(\mathbf{h}_k^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k)); \hat{\mathbf{Y}}_{2,k,i}$ 为 $\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{2,k,i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 且 $\mathbf{Y}_{2,k,i} =$

$(\mathbf{h}_{k,i}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k))^H (\mathbf{h}_{k,i}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k)); \hat{\mathbf{Y}}_{3,k,i}$ 为

$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{3,k,i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 且 $\mathbf{Y}_{3,k,i} = \gamma_{\text{th}} (\mathbf{h}_{k,i}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k))^H \cdot$

$(\mathbf{h}_{k,i}^H \text{diag}(\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k)), \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{I}, \forall m \in \mathcal{M}.$

3) 问题转换。令 $\hat{\theta} = \{\hat{\Theta}_{k,m} | k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}\}$, 则优化问题 P_4 可等价表示为

$$P_{4.1} : \max_{\hat{\theta}} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M [\text{Tr}(\mathbf{Q}_k \hat{\Theta}_{k,m}) - \sum_{r=1}^M \text{Tr}(\hat{\mathbf{U}}_{k,m} \hat{\Theta}_{k,r})] \quad (24)$$

$$\text{s. t. } C_1 : |\mathbf{h}_{\text{PR}}^H \mathbf{w}_k|^2 \geq \epsilon_{\text{th}} \sum_{r=1}^M \text{Tr}(\hat{\mathbf{Y}}_{1,k} \hat{\Theta}_{k,r}) + \epsilon_{\text{th}} \sigma_2^2,$$

$$C_2 : \text{Tr}(\hat{\mathbf{Y}}_{2,k,i} \hat{\Theta}_{k,m}) \leq \sum_{r=1, r \neq m}^M \text{Tr}(\hat{\mathbf{Y}}_{3,k,i} \hat{\Theta}_{k,r}) +$$

$$\gamma_{\text{th}} (|\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma_3^2), \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{I},$$

$$\forall m \in \mathcal{M},$$

$$C_3 : \left[\sum_{r=1}^M \hat{\Theta}_{k,r} \right]_{l,l} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall r \in \mathcal{M},$$

$$\forall l \in \mathcal{L},$$

$$C_4 : [\hat{\Theta}_{k,r}]_{L_k+1, L_k+1} = 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall r \in \mathcal{M},$$

$$C_5 : \hat{\Theta}_{k,r} \succeq 0, \forall k \in \mathcal{K}, \forall r \in \mathcal{M},$$

$$C_6 : \text{Rank}(\hat{\Theta}_{k,r}) = 1, \forall k \in \mathcal{K}, \forall r \in \mathcal{M}.$$

参考问题 $P_{3.1}$ 的 C_6 , 将问题 $P_{4.1}$ 约束 C_6 从优化问题中松弛, 并在后续使用高斯随机近似法恢复出秩一解, 则问题 $P_{4.1}$ 可转换为一个标准凸优化问题

$$\begin{aligned}
P_{4.2} : \max_{\hat{\theta}} & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M [\text{Tr}(\mathbf{Q}_k \hat{\boldsymbol{\Theta}}_{k,m}) - \\
& \sum_{r=1}^M \text{Tr}(\hat{\mathbf{U}}_{k,m} \hat{\boldsymbol{\Theta}}_{k,r})] \\
\text{s. t.} & 24C_1 \sim 24C_5.
\end{aligned} \quad (25)$$

4 仿真结果及分析

4.1 仿真环境及参数设置

为验证所提方案的性能,使用 Windows 11 操作系统进行仿真验证,所使用硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60 GHz 1.80 GHz 处理器和 8 GiB 内存。考虑包含 2 个 ST 的 IRS 与 CR 辅助 BC-MEC 网络系统,假设 ST 都聚焦到一簇,不同 ST 到达同一设备的通信链路具有相同的信道衰落。由于 2 个 ST 间距离较近,考虑 PT 与 2 个 ST 间距离均为 $d_k = 30$ m, 2 个 ST 与 2 个 SR 的距离均为 $d_{k,m} = 30$ m。具体参数说明和默认值设置如表 1 所示。

表 1 参数说明和默认值设置

参数	数值
ST 数量 K	2
窃听者数量 I	2
SR 数量 M	2
RIS 反射单元个数 L	10
噪声功率 σ^2/W	1×10^{-12}
传输带宽 B/Hz	1×10^6
PT 的天线数量 N_T	3
单一 IRS 反射单元能耗 μ	0
窃听者信噪比门限 $\gamma_{\text{th}}/\text{dB}$	-7.5
PT 最大发射功率 P_{max}/W	2
任务卸载时间 T/s	2
ST 的电容系数 ϵ_k	1×10^{-27}
单比特所需计算频率 C_k/Hz	1×10^3
本地计算频率 f_k/Hz	1×10^6
PR 接收信噪比门限 $\epsilon_{\text{th}}/\text{dB}$	0

4.2 结果分析

为验证所提方案的有效性,在不同 IRS 反射单元个数 L 、窃听者信噪比容限 γ_{th} 、用户总卸载时间 T 、SR 部署数量、PR 接收信噪比门限 ϵ_{th} 及 ST 数量 K 的参数设置下,将所提方案与随机 IRS 相位方案和随机波束成形方案相比,以验证所提方案的性能。

在所提方案中,分析 IRS 反射单元个数 L 和窃听者信噪比容限 γ_{th} 对用户卸载比特数的影响,具体结果如图 3 所示。随着 IRS 反射单元个数 L 的增加,ST 能够更高效地将计算任务卸载至 SR,提升 BC 速率。此外,当 IRS 反射单元个数 L 增加时,用户卸载比特数增大;随着窃听者信噪比容限 γ_{th} 的提高,用户卸载比特数增大,表明所提方案在面对更强窃听威胁时仍能有效维持通信性能,具有良好的鲁棒性。

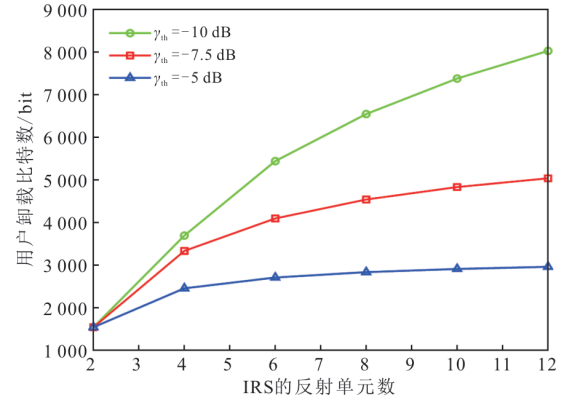


图 3 反射单元数 L 和 γ_{th} 对用户卸载比特数的影响

在所提方案中,用户总卸载时间 T 和 SR 部署数量 M 对用户卸载比特数的影响如图 4 所示。

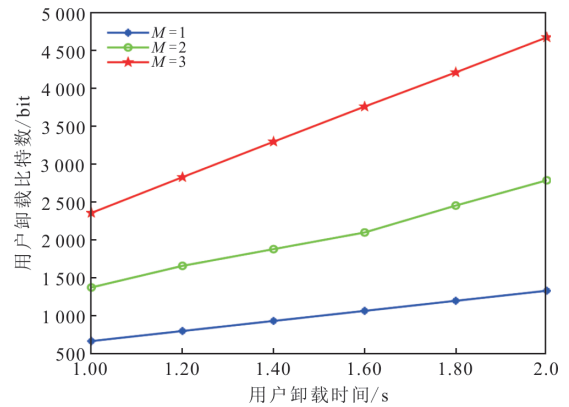


图 4 用户总卸载时间和 SR 数量对用户卸载比特数的影响

由图 4 可知,当用户的数量 K 固定时,随着用户总卸载时间 T 增加,ST 向 SR 卸载计算任务的子时隙 t_k 同步增加;当用户总卸载时间 T 固定时,用户卸载比特数随 SR 部署数量 M 的增加而增加。SR 部署数量 M 的增加,意味着每个 ST 在每次计算任务卸载子时隙中能够向 MEC 服务器卸载数量更多的计算数据。

所提方案的 PR 接收信噪比门限 ϵ_{th} 和 ST 数量 K 对用户卸载比特数的影响如图 5 所示。由图 5 可知,当 PR 接收信噪比门限 ϵ_{th} 增加时,3 条曲线均呈现递减趋势,即用户卸载比特数的减少。当 PR 接收信噪比门限 ϵ_{th} 固定时,用户卸载比特数随 ST

数量 K 的增加而增加。PR 接收信噪比门限 ϵ_{th} 增加,意味着在 PR 发射功率不变的情况下,ST 的被动反射计算任务卸载功率降低,即 ST 向 SR 的卸载速率降低。随着 ST 数量 K 的增加,SR 将从 ST 处接收更多的计算卸载比特。

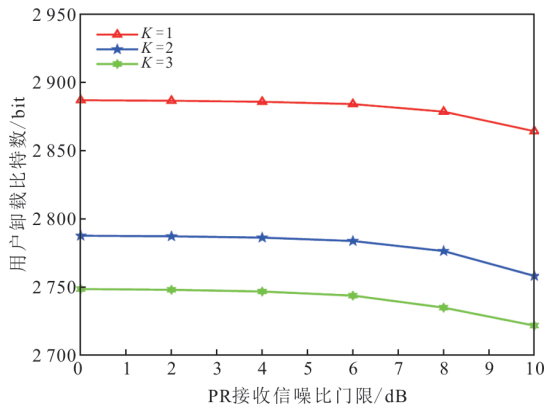


图5 PR接收 ϵ_{th} 和 ST 数量 K 对用户卸载比特数的影响

为了验证所提方案的性能,将其与随机 IRS 相位方案和随机波束成形方案对比,具体结果如图 6 所示。

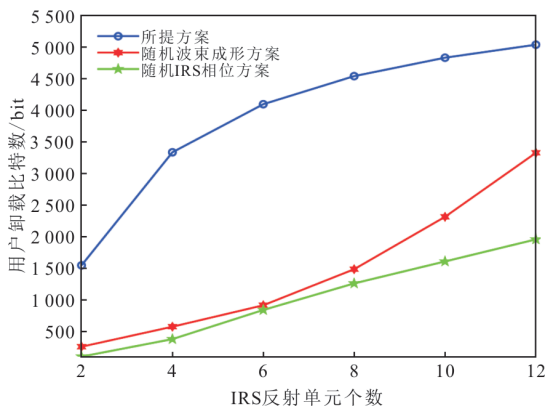


图6 3种方案对比结果

由图 6 可知,在相同系统配置(如 ST 数量、SR 部署数量等)下,基于不同的 IRS 反射单元个数,所提方案通过联合优化波束成形与 RIS 相位,大幅提升了资源利用率,其 ST 总平均吞吐量显著优于随机 IRS 相位方案与随机波束成形方案。在多用户、多 IRS 反射单元的复杂场景下,能稳定输出最优配置,性能优势显著,充分验证了其在 IRS 辅助 BC-MEC 网络中提升 ST 吞吐量的有效性与优越性。

5 结语

针对 IoT 设备算力不足、频谱资源短缺及系统安全性的问题,提出了一种 IRS 辅助多用户 BC 安全卸载的感知 MEC 网络资源分配方案。利用 CR

技术提供频谱接入机会,纳入信道、能耗和计算模型,考虑用户采用部分卸载策略,建立基于 PLS 和 IRS、CR 辅助的 BC-MEC 网络中 ST 吞吐量最大化问题。同时利用基于 BCD、拉格朗日对偶、二次变换、变量替换和 SDR 等方法进行求解。仿真结果表明,卸载比特数随着 IRS 反射单元个数、窃听者信噪比容限、SR 部署数量、ST 数量的增加而增加;随着 PR 接收信噪比门限的增加而减少。将所提方案与随机波束成形和随机 IRS 相位两个方案相比,发现次用户可完成的任务量分别能提升了约 260% 和 178%。因此,所提方案可以增加 ST 总平均吞吐量,具有更好的性能。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Y L, WANG W, LI Y J, et al. Edge computing and networking: A survey on infrastructures and applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 101213-101230.
- [2] 杨婧,付卿卿,唐贤敏. 边缘计算下配网暂态数据缓存冲突规避方法[J]. 电子设计工程, 2024, 32(7): 115-118, 123.
YANG J, FU Q Q, TANG X M. Cache conflict avoidance method for distribution network transient data under edge computing[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(7): 115-118, 123. (in Chinese)
- [3] 谢文婷, 李安, 杨鼎成, 等. 空地协同隐蔽移动边缘计算系统的能耗优化算法[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(3): 96-102.
XIE W T, LI A, YANG D C, et al. Energy consumption optimization for air-ground cooperation based covert mobile edge computing system[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024, 47(3): 96-102. (in Chinese)
- [4] 赵梓铭, 刘芳, 蔡志平, 等. 边缘计算: 平台、应用与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(2): 327-337.
ZHAO Z M, LIU F, CAI Z P, et al. Edge computing: Platforms, applications and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(2): 327-337. (in Chinese)
- [5] 刘伯阳, 党儒鸽, 王丽平, 等. 基于反向散射无人机辅助 MEC 网络能耗最小化方案[J]. 西安邮电大学学报, 2024, 29(6): 1-10.
LIU B Y, DANG R G, WANG L P, et al. Energy consumption minimization scheme for UAV-assisted MEC network based on backscatter[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2024, 29(6): 1-10. (in Chinese)
- [6] YE Y H, SHI L Q, CHU X L, et al. Resource allocation in backscatter-assisted wireless powered MEC net-

- works with limited MEC computation capacity [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(12): 10678-10694.
- [7] LU X, JIANG H, NIYATO D, et al. Wireless-powered device-to-device communications with ambient backscattering: Performance modeling and analysis [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1528-1544.
- [8] 张晓茜, 徐勇军, 吴翠先, 等. 智能反射面增强的全双工环境反向散射通信系统波束成形算法[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(3): 914-924.
ZHANG X X, XU Y J, WU C X, et al. Beamforming design for reconfigurable intelligent surface enhanced full-duplex ambient backscatter communication networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(3): 914-924. (in Chinese)
- [9] HASHIDA H, KAWAMOTO Y, KATO N. Selective reflection control: Distributed IRS-aided communication with partial channel state information[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(11): 11949-11958.
- [10] SHEN H, XU W, GONG S L, et al. Beamforming optimization for IRS-aided communications with transceiver hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(2): 1214-1227.
- [11] HAYKIN S, SETOODEH P. Cognitive radio networks: The spectrum supply chain paradigm[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2015, 1(1): 3-28.
- [12] 赵国兴, 刘富辉, 晏子祥, 等. IRS 增强的 UAV 机会接入宽带 CR 系统资源分配与安全优化[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2025, 45(3): 38-47.
ZHAO G X, LIU F H, YAN Z X, et al. Resource allocation and security optimization for IRS-enhanced UAV opportunistic access broadband CR systems[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2025, 45(3): 38-47. (in Chinese)
- [13] SONG T, CAI S, ZHANG J, et al. Secure symbol-level precoding design in RIS-aided ISAC systems[C]//2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Dubai: IEEE, 2024: 1-6.
- [14] XU J, YAO J P. Exploiting physical-layer security for multiuser multicarrier computation offloading[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(1): 9-12.
- [15] 刘伯阳, 张浩然, 郭天润, 等. 无人机辅助多 MEC 服务器的任务完成率最大化方案[J]. *西安邮电大学学报*, 2024, 29(5): 19-29.
LIU B Y, ZHANG H R, GUO T R, et al. Task completion maximization scheme for UAV-assisted multi-MEC servers[J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2024, 29(5): 19-29. (in Chinese)
- [16] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [17] HE X F, JIN R C, DAI H Y. Physical-layer assisted secure offloading in mobile-edge computing [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(6): 4054-4066.
- [18] CHEN Y C, ZHAO K, ZHANG H, et al. A comprehensive physical layer security mechanism for mobile edge computing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(19): 16816-16829.
- [19] ZARGARI S, TELLAMBURA C, HERATH S. Energy-efficient hybrid offloading for backscatter-assisted wirelessly powered MEC with reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(9): 5262-5279.
- [20] XU S, LIU J J, KATO N, et al. Intelligent reflecting surface backscatter enabled multi-tier computing for 6G Internet of Things[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 41(2): 320-333.
- [21] ZARGARI S, TELLAMBURA C, HERATH S. Energy-efficient hybrid offloading for backscatter-assisted wirelessly powered MEC with reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(9): 5262-5279.
- [22] YUAN Y T, XU X D, HAN S J, et al. Energy efficiency aware computation offloading in RIS-enhanced symbiotic radio systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(4): 1823-1835.
- [23] LIU B Y, LI W, MA Y J, et al. Wireless powered cognitive-based mobile edge computing with imperfect spectrum sensing [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 80431-80442.
- [24] WANG J, LIU B Y, FENG L. Secure MISO cognitive-based mobile edge computing with wireless power transfer[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 15518-15528.
- [25] ZHANG Z B, LIN S J, LU B S, et al. Cost minimization for energy-constrained partial offloading in cognitive capacity harvesting networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(4): 5567-5579.
- [26] 陈韩, 张晶, 董俊, 等. 基于 NOMA 的多用户协作 MEC 卸载方案[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(6): 52-60.

CHEN H, ZHANG J, DONG J, et al. A multi-user collaborative MEC offloading scheme based on NOMA [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022, 42 (6): 52-60. (in Chinese)

- [27] YU Y F, LIU X, LIU Z C, et al. Joint trajectory and resource optimization for RIS assisted UAV cognitive radio [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(10): 13643-13648.

[作者简介]



刘伯阳(1988—),男,陕西延安人,博士,西安邮电大学副教授,主要研究方向为边缘计算、认知无线电。E-mail: liuboyang@xupt.edu.cn



孙连锐(1999—),男,陕西安康人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为边缘计算、通感一体化、软件无线电。E-mail: xupzed@163.com



万宇航(1999—),男,陕西西安人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为边缘计算、认知无线电。E-mail: wanyuhang1999@163.com



李泽(2000—),男,陕西渭南人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为边缘计算、通感一体化、软件无线电。E-mail: lize@stu.xupt.edu.cn



贺嘉成(2000—),男,陕西渭南人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为边缘计算、通感一体化、软件无线电。E-mail: 230121214@stu.xupt.edu.cn

[责任编辑:刘武英]