

基于混合多址的 WPT-MEC 系统耗能优化

周 涛¹ 陈东华¹ 于海洋¹

ZHOU Tao CHEN Donghua YU Haiyang

摘 要

为降低多用户同时卸载任务到多个边缘计算设备的能耗,借助混合多址和无线能量传输,提出了一种系统耗能最小化方案,该方案通过联合优化波束矢量、计算量、带宽、时间和每个物联网设备发送功率等变量,实现了资源的最佳分配。由于多变量耦合,该问题为非线性非凸问题,首先采用半定松弛及泰勒近似将其转化为凸优化问题,然后采用逐次凸逼近算法得到该问题的有效数值解。仿真结果表明,所提方案性能优于传统方案,有效降低了系统总耗能。

关键词

无线供能;波束成型;非正交多址;逐次凸逼近

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.026

0 引言

随着物联网的发展,智能设备在虚拟现实、车联网、远程医疗等领域得到广泛应用。相比传统移动云计算,移动边缘计算^[1](mobile edge computing, MEC)能满足高速率和低时延的需求,解决设备的实时计算问题。同时,由于设备通信受能量和带宽限制,MEC结合无线能量传输^[2](wireless power transfer, WPT)技术,通过非接触方式为设备供能,并采用非正交多址^[3](non-orthogonal multiple access, NOMA)技术提高频谱效率,优化边缘计算系统的持续运行。

目前,融合WPT和NOMA技术的边缘计算系统已成为MEC领域的研究焦点。在具有MEC服务器的无线接入点(access point, AP)和两用户组成的网络结构下,文献[4-7]提出了一种三阶段传输协议。第一阶段,AP向两用户传输无线能量;第二阶段,远端用户利用采集到的无线能量以上行NOMA方式向近端用户和AP进行部分卸载;第三阶段,用户一起或近端用户向AP完成部分卸载。除了在基本三节点结构下的研究,还有对单AP多用户系统的研究。在该网络下,文献[8-9]先让AP向用户提供无线能量,然后用户利用采集的能量以上行NOMA方式向AP进行数据卸载。其中文献[8]使用二进制任务卸载与部分卸载结合的方式实现了系统的单位成本最小化;在动态信道场景下,文献[9]提出了基于深度强化学习的二进制卸载和传输时间优化算法,获得了几乎最优的计算总速率。

上述研究中,AP同时负责无线供能和边缘计算,但文献[10]对AP与MEC服务器分离的情况进行了研究。在非线性能量采集场景下,先由AP给多用户供能,然后用户采用收集的能量以上行NOMA方式向服务器完成全部卸载。以上研究仅考虑了多用户的任务卸载到单服务器的情况,还未涉及多用户同时向多服务器卸载任务的复杂情况。此外,上述研究均使用单天线AP进行无线能量传输,并未研究多天线能量采集场景中应用波束成型技术的情况。

基于以上分析,本文研究了多用户多服务器的多天线WPT-NOMA系统。首先,为提高能量采集效率,采用多天线能量发射器(energy transmitter, ET)为多用户供能,然后用户将该能量全部用于数据卸载,通过为不同MEC服务器分配正交信道并在信道内采用NOMA上行卸载的方式,提高了卸载速率,排除了信道复用时的相互干扰,完成了任务卸载。由于问题为非线性非凸问题,需先采用半正定松弛(semi-definite relaxation, SDR)和一阶泰勒近似转化为凸优化问题,再通过逐次凸逼近(successive convex approximation, SCA)算法进行联合优化。

1 系统模型

根据图1所示,WPT-MEC系统中包含一个多天线ET、 N 个用户(remote user, RU)、 M 个MEC服务器(sever user, SU);其中能量发射器的天线数为 N_t ,所有用户和服务设备均为单天线配置,工作在半双工模式。遵循“先采集后传输”协议,先在 τ_1 时间内, N 个RU首先从ET传输的射频信号中采集能量,然后使用采集的能量来卸载其任务,从而避免消耗其电池中的能量并延长每个RU的操作时间。所有信道都为准静态衰落,即在 T 内保持静态。

1. 淮北师范大学物理与电子信息学院 安徽淮北 235000

[基金项目]安徽省高校自然科学研究重点项目“面向蜂窝协同无线网络的能量采集通信研究”(2023AH050325)

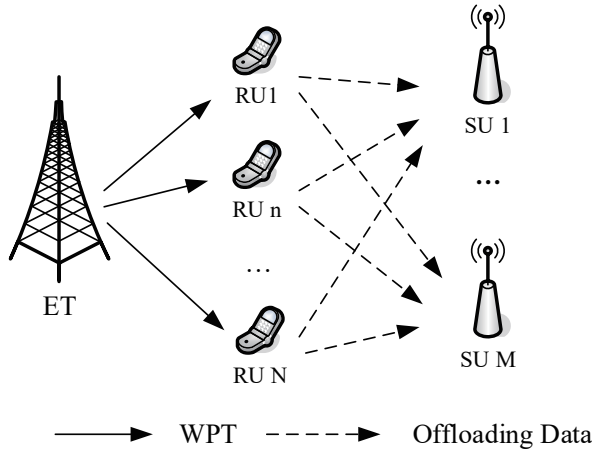


图1 系统模型

整个时间块 T 被划分为 4 个阶段，如图 2 所示。在持续时间 τ_1 的第 1 阶段，ET 广播能量信号， N 个 RU 以 EH 模式工作。持续时间 τ_2 的第 2 阶段用于任务卸载，其中 N 个 RU 通过上行链路 NOMA 将其全部任务卸载到 M 个 SU。持续时间 τ_3 的第 3 阶段是任务执行阶段，其中 N 个 RU 停止卸载任务，MEC 服务器执行所有接收到的计算任务。在第 4 阶段，SU 服务设备将计算结果发送到 RU，假设下行链路传输时间可以忽略不计，因为计算结果的大小远小于任务数据的大小。因此，此后将忽略每个时间块的第 4 阶段。请注意，在第 2 到第 4 阶段期间，ET 保持静音。

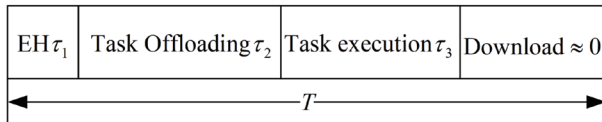


图2 通信系统的划分结构

1.1 能量采集阶段

在 WPT 阶段 τ_1 ，多天线 ET 采用能量波束赋形向下行 N 个 RU 广播能量那么用户 RU_n 在第一阶段可以收获的能量为：

$$E_n = \rho t_1 p_0 \sum_{i=1}^N |h_n^H w_i|^2, \forall n \quad (1)$$

式中： $0 \leq \rho \leq 1$ 是用户的能量转换效率； p_0 为发射功率； w_n 为 $N_t \times 1$ 的能量波束赋形矢量； h_n 为 PB 到 RU_n 的信道功率增益。

1.2 卸载阶段

在卸载阶段 τ_2 内，采用混合多址将带宽按照 SU 个数分频，每个频段内 RU 采用上行 NOMA 进行完全卸载，SU 通过连续干扰消除获得每个 RU 的任务。基于上行 NOMA 的原理， SU_m 首先解码最佳信道条件的 RU 发送的消息，然后将解码后的信息从复合信号中删除，接着解码那些信道条件次优的 RU 发送的消息。因此，假设在每个正交频段中信道增

益 $|g_{n,m}|^2$ 按降序排列，即 $|g_{1,m}|^2 \geq |g_{2,m}|^2 \geq \dots \geq |g_{n,m}|^2$ 。用 $R_{n,m}$ 表示第 n 个 RU 向第 m 个 SU 的传输速率：

$$R_{n,m} = \mu_m B \log_2 \left(1 + \frac{p_{n,m} |g_{n,m}|^2}{\sum_{j=n+1}^N p_{j,m} + \mu_m B N_0} \right) \quad (2)$$

式中： B 为上行 NOMA 总带宽； $0 \leq \mu_m \leq 1$ 为带宽 B 分配给 SU_m 的比例； $p_{n,m}$ 为 RU_n 分配给 SU_m 的功率； N_0 为具有零均值的加性高斯白噪声的功率谱密度。

1.3 任务执行阶段

在卸载阶段 τ_3 内，SU 处执行接收到的数据。设 F_m 表示 SU 处服务器计算能力。则每个 SU 的计算时延和计算耗能分别表示为：

$$t_m = \sum_{n=1}^N \frac{C_n \alpha_{n,m} I_n}{F_m} \quad (3)$$

$$E_{mec} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta C_n \alpha_{n,m} I_n F_m^2 \quad (4)$$

式中： δ 为每 CPU 时钟周期消耗的能量； $0 \leq \alpha_{n,m} \leq 1$ 为 RU_n 的数据量 I_n 传输给 SU_m 的比例； C_n 是完成一位计算任务所需的 CPU 周期数； I_n 是计算任务的数据大小（以位为单位）。

1.4 联合优化问题

系统在一个时间块的总耗能由两部分组成，一部分是 WPT 消耗的能量，还有一部分是所有 SU 的任务计算耗能。通过联合优化 ET 的能量波束赋形矢量、RU 发射功率，带宽分配比，传输资源分配比和 EH 时间、卸载时间和执行时间，最小化系统耗能。该问题公式化为 P1：

$$\min_{\{w_n, \alpha_{n,m}, \mu_m, p_{n,m}, \tau_1, \tau_2, \tau_3\}} p_0 \tau_1 \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N |h_n^H w_i|^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta C_n \alpha_{n,m} I_n F_m^2 \quad (5)$$

$$s.t. \quad \rho p_0 \sum_{i=1}^N |h_n^H w_i|^2 \geq \tau_2 \sum_{m=1}^M p_{n,m}, \forall n \quad (6)$$

$$R_{n,m} \geq \frac{\alpha_{n,m} I_n}{\tau_2}, \forall n, \forall m \quad (7)$$

$$\tau_3 \geq \sum_{n=1}^N \frac{C_n \alpha_{n,m} I_n}{F_m}, \forall m \quad (8)$$

$$\tau_1, \tau_2, \tau_3 \geq 0 \quad (9)$$

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \leq T \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M \alpha_{n,m} = 1, \forall n \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M \mu_m = 1 \quad (12)$$

式中： ρ 为能量收获效率因子； T 为总的时间； τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分

别为 EH 阶段、卸载阶段、MEC 阶段时延。

在问题 P1 中，式 (6) 保证了第二阶段传输耗能全部来自于第一阶段收集的能量；式 (7) 保证卸载数据在 τ_2 时间内全部卸载；式 (8) 保证在 τ_3 时间内任务全部计算完；式 (9) 保证时延不为负；式 (10) 使得三阶段时延小于总时间 T ；式 (11) 保证 RU 任务全部卸载完；式 (12) 保证带宽全部使用。

2 优化问题求解

从目标函数的式 (5) 中看出，由于波束赋形矢量 $\mathbf{w}_n$ 和 EH 时间 τ_1 耦合，导致目标函数为非凸函数，则引入所有 RU 收集的总能量上界为 q^2 ，问题 P1 等价转化为优化问题 P2：

$$\min_{\left\{\alpha_{n,m}, \mu_m, p_{n,m}, \tau_1, \tau_2, \tau_3, q\right\}} q^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta C_n \alpha_{n,m} I_n F_m^2 \quad (13)$$

$$s.t. \quad q^2 \geq p_0 \tau_1 \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N \left| \mathbf{h}_n^H \mathbf{w}_i \right|^2 \quad (14)$$

$$(6) \sim (12) \quad (15)$$

2.1 SDR 转换

由于式 (6) (14) 为非凸约束，则采用 SDR^[11] 技术，通过定义半正定矩阵 $\mathbf{W}_n = \mathbf{w}_n \mathbf{w}_n^H$ 来线性化式 (6) (14)，将问题 P2 转化为优化问题 P3：

$$\min_{\left\{\mathbf{w}_n, \alpha_{n,m}, \mu_m, p_{n,m}, \tau_1, \tau_2, \tau_3, q\right\}} q^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta C_n \alpha_{n,m} I_n F_m^2 \quad (16)$$

$$s.t. \quad \rho \tau_1 p_0 \sum_{i=1}^N \text{Tr}(\mathbf{W}_i \mathbf{H}_n) \geq \tau_2 \sum_{m=1}^M p_{n,m}, \forall n \quad (17)$$

$$(7) \sim (12) \quad (18)$$

$$\mathbf{W}_n \succeq 0, \forall n \quad (19)$$

$$R(\mathbf{W}_n) = 1, \forall n \quad (20)$$

$$q^2 \geq p_0 \tau_1 \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N \text{Tr}(\mathbf{W}_i \mathbf{H}_n) \quad (21)$$

式中： $\mathbf{H}_n = \mathbf{h}_n \mathbf{h}_n^H$ 。可看出，非凸秩 1 式 (20) 是求解难点，松弛秩 1 式 (17) (21) 都是 $\mathbf{W}_n$ 的线性表达式。

2.2 SCA 迭代算法

优化变量 τ_1 、 τ_2 、 $p_{n,m}$ 、 $\mathbf{w}_i$ 间耦合导致式 (17) 非凸，优化变量 $p_{n,m}$ 、 $\beta_{n,m}$ 、 μ_m 间耦合导致式 (7) 非凸，优化变量 q 、 τ_1 、 $\mathbf{w}_i$ 导致式 (21) 非凸，因此引入松弛变量 x_n 、 $y_{n,m}$ 、 $z_{n,m}$ 、 $r_{n,m}$ 、 s_n 、 t_n 将问题 P3 松弛为优化问题 P4：

$$\min_{\left\{\mathbf{w}_n, \alpha_{n,m}, \mu_m, p_{n,m}, \tau_1, \tau_2, \tau_3, q, x_n, y_{n,m}, z_{n,m}, r_{n,m}, s_n, t_n\right\}} q^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta C_n \alpha_{n,m} I_n F_m^2 \quad (22)$$

$$s.t. \quad \rho p_0 \sum_{i=1}^N \text{Tr}(\mathbf{W}_i \mathbf{H}_n) \geq \frac{x_n^2}{\tau_1}, \forall n \quad (23)$$

$$\frac{x_n^2}{\tau_2} \geq \sum_{m=1}^M p_{n,m}, \forall n \quad (24)$$

$$\frac{y_{n,m}^2}{z_{n,m}} \geq 2 \frac{I_n y_{n,m}^2}{B s_m} - 1, \forall n, \forall m \quad (25)$$

$$p_{n,m} \left| \mathbf{h}_{n,m} \right|^2 \geq y_{n,m}^2, \forall n, \forall m \quad (26)$$

$$z_{n,m} \geq \left| \mathbf{h}_{n,m} \right|^2 \sum_{j=n+1}^N p_{j,m} + B N_0 \mu_m, \forall n, \forall m \quad (27)$$

$$r_{n,m}^2 \geq \alpha_{n,m}, \forall n, \forall m \quad (28)$$

$$\mu_m \geq \frac{t_m^2}{\tau_2} \quad (29)$$

$$t_m^2 \geq s_m, \forall m \quad (30)$$

$$(8) \sim (12) \quad (19) \quad (21) \quad (31)$$

其中，式 (24) (25) (28) (30) (21) 为非凸约束，则 P4 仍为非凸优化问题。通过一阶泰勒近似，非凸约束转化为：

$$\frac{2\bar{x}_n x_n}{\bar{\tau}_2} - \left(\frac{\bar{x}_n^2}{\bar{\tau}_2^2} \right) \tau_2 \geq \sum_{m=1}^M p_{n,m}, \forall n \quad (32)$$

$$\frac{2\bar{y}_{n,m} y_{n,m}}{\bar{z}_{n,m}} - \left(\frac{\bar{y}_{n,m}^2}{\bar{z}_{n,m}^2} \right) z_{n,m} \geq 2 \frac{I_n y_{n,m}^2}{B s_m} - 1, \forall n, \forall m \quad (33)$$

$$\bar{r}_{n,m}^2 + 2\bar{r}_{n,m} (r_{n,m} - \bar{r}_{n,m}) \geq \alpha_{n,m}, \forall n, \forall m \quad (34)$$

$$\bar{t}_m^2 + 2\bar{t}_m (t_m - \bar{t}_m) \geq s_m, \forall m \quad (35)$$

$$\frac{2\bar{q} q}{\bar{\tau}_1} - \left(\frac{\bar{q}^2}{\bar{\tau}_1^2} \right) \tau_1 \geq p_0 \tau_1 \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N \text{Tr}(\mathbf{W}_i \mathbf{H}_n) \quad (36)$$

其中，变量 x_n 在 $\bar{x}_n$ 处展开，其他变量同理，根据上述分析，通过求解迭代问题 P5 来解决非凸优化问题 P4：

$$\min_{\left\{\mathbf{w}_n, \alpha_{n,m}, \mu_m, p_{n,m}, \tau_1, \tau_2, \tau_3, q, x_n, y_{n,m}, z_{n,m}, r_{n,m}, s_n, t_n\right\}} q^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta C_n \alpha_{n,m} I_n F_m^2 \quad (37)$$

$$s.t. \quad (8) \sim (12) \quad (19) \quad (32) \sim (36) \quad (38)$$

问题 P5 为凸半定规划问题，可采用 CVX 工具^[12] 进行求解。从得到的半正定矩阵 $\mathbf{W}_n$ 中提取出秩 1 解即为能量波束赋形矢量 $\mathbf{w}_n$ ，并得到其余变量。

具体的 SCA^[13] 迭代算法步骤如下：

(1) 令迭代次序 $i=0$ ，最大迭代次数为 I ，初始化问题 P5 的可行解；

(2) 重复循环；

(3) $i=i+1$ ；

(4) 求解优化问题 P5 得到优化解；

(5) 利用 $\bar{x}_n = x_n$ 更新变量，其他变量同理；

(6) 直到算法收敛或者 $i=I$ ；

(7) 得到问题 P5 的最优解。

3 数据及仿真分析

仿真参数：基于混合多址的无线供能边缘计算系统包含一个多天线 ET、 $N=3$ 个 RU， $M=2$ 个 SU，ET 的天线数为 4，其余设备都为单天线；RU 和 SU 在以 ET 为中心、半径为 10 m 的圆形区域内随机分布，所有信道均为大尺度衰落和小尺度衰落的混合信道模型^[14]，其中大尺度衰落信道增益为 $\sqrt{1/d^\epsilon}$ ， d 和 ϵ 分别表示 RU 与 ET 或者 SU 间的距离及路径损耗因子，且 $\epsilon=2$ ，小尺度衰落信道响应服从瑞利衰落；此外 ET 发射功率 $p_0=10$ W，噪声功率谱密度为 $N_0=10^{-9}$ ，总时间为单位时间 1 s，能量收获效率因子 $\rho=0.8$ ，除非特别说明，每个 SU 的计算能力为 $F_m=10^4$ cycles/s，每 bit 所需 CPU 周期数 $C_n=10^2$ cycle/bit，带宽为 $B=8$ MHz。

图 3 对本文所提的多天线 WPT 方案与单天线 WPT 方案进行比较，在图 3 中，每个 RU 的数据为 3 bit/s，如图所示，系统总能耗可以在 6 次迭代中收敛。采用多天线 WPT 的系统总能耗约为 7.5×10^{-5} J，而采用单天线 WPT 的系统总能耗约为 3.2×10^{-6} J。使用多天线的系统可以使用波束成型技术进行采能，从而大大降低了能耗。

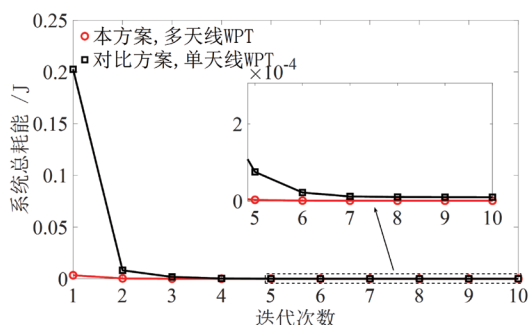


图 3 本方案和单天线 WPT 方案的比较

图 4 仿真结果显示，本方案明显优于 FDMA 方案和直接卸载方案，且随着数据量增大，效果愈加显著，因本方案使用混合多址方案有效解决了信道内干扰和信道间干扰，进一步降低了系统总能耗，并且随着数据量的增大，放大了混合多址方案的效果，导致曲线差距越来越大。

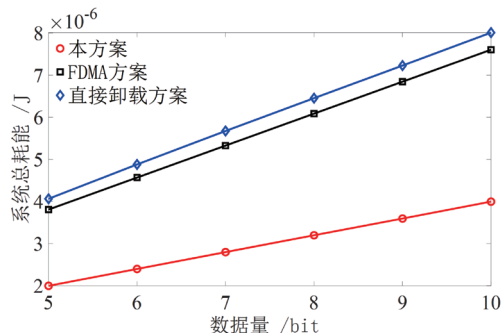


图 4 FDMA 方案和直接卸载方案的比较

图 5 比较了本文所提的最优数据量分配方案与传统的均匀数据量分配方案。随着用户数据量的增大，系统总能耗逐渐增加，但本方案的系统总能耗明显低于均匀分配方案，且优化效果随着数据量增大而越明显。这是因为数据量增大，导致传输能耗和边缘计算能耗增加，引起系统总能耗增加，但本方案让数据量根据信道条件、发射功率等因素综合考虑来最优分配，则系统总能耗低于不考虑综合条件的数据量均匀分配方案。

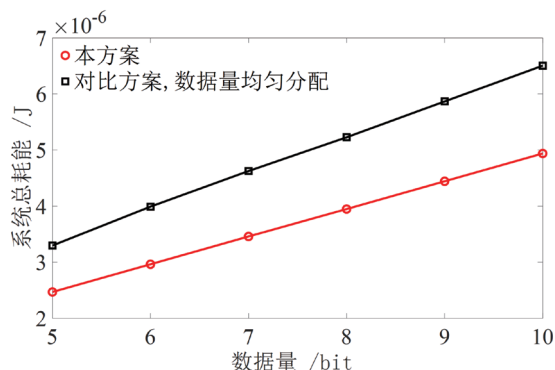


图 5 数据量最优分配和均匀分配的比较

图 6 比较了本文所提的最优带宽分配与均匀带宽分配。结果显示，本方案的总能耗明显低于均匀分配带宽方案。因为本方案根据信道条件、发射功率等因素综合考虑来最优分配，有效降低了系统能耗。随着数据量增大，带宽优化效果越明显，这是因为数据量增大需要更多带宽来提高传输速率并降低能耗。其次，本方案中多个优化变量的综合作用使得带宽变化对总能耗的影响较小，导致两条线基本重合。

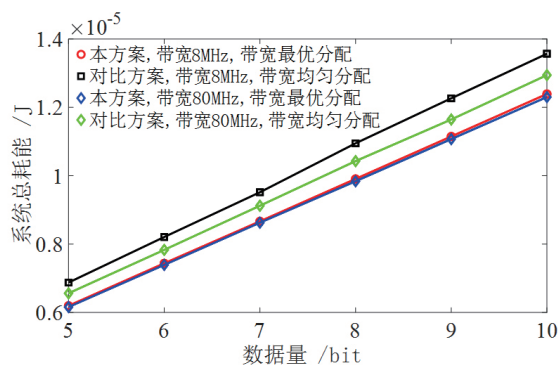


图 6 带宽最优分配（本方案）和带宽均匀分配比较

4 结语

针对混合多址无线供能系统，通过联合优化计算量、带宽分、执行时间、卸载时间、无线供能时间和每个物联网设备发送功率，来最小化系统整体耗能。该方案在保证系统时间约束、无线供能约束及带宽约束下，不仅提高了频谱效率和信息速率，还降低了系统总能耗。通过松弛、泰勒近似和

SCA 迭代算法获得数值解。仿真数据结果验证了算法的收敛性,并且相比于其他方案,本方案实现了系统总耗能的有效减小。

参考文献:

- [1] PHAM Q V, FANG F, HA V N, et al. A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: fundamentals, technology integration, and state-of-the-art[J]. IEEE access, 2020, 8:116974-117017.
- [2] HADZI-VELKOV Z, POPOSKA M. Edge computing: system overview and fusion with wireless power transfer[C/OL]//2021 International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom). Piscataway: IEEE, 2021[2024-04-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9593153>.
- [3] 王正强, 杜金, 樊自甫, 等. 多载波 NOMA 系统资源分配研究综述 [J]. 无线电工程, 2023, 53(9):2074-2087.
- [4] WANG R, CHEN J, HE B T, et al. Energy consumption minimization for wireless powered NOMA-MEC with user cooperation[C/OL]//2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE, 2021[2024-06-26]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9613252>.
- [5] LI B G, SI F Q, ZHAO W, et al. Wireless powered mobile edge computing with NOMA and user cooperation[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(2):1957-1961.
- [6] WANG L, LIU X, JIANG X, et al. Effective computational efficiency maximization in cooperative NOMA based MEC system[C/OL]//2022 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE, 2022[2024-01-19]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10039385>.
- [7] ZENG S, HUANG X H, LI D D. Joint communication and computation cooperation in wireless-powered mobile-edge computing networks with NOMA[J]. IEEE internet of things journal, 2023, 10(11):9849-9862.
- [8] ZHU W W, CHEN X, JIAO L B, et al. NOMA-based WPT-MEC network system cost efficient units minimization [C/OL]//2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE, 2022[2024-05-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10065733>.
- [9] GAO H F, GUO X. Deep reinforcement learning-based computation offloading and optimal resource allocation in industrial internet of things with NOMA[C/OL]//2022 11th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS). Piscataway: IEEE, 2022[2024-06-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9825343>.
- [10] SHI L Q, YE Y H, CHU X L, et al. Computation energy efficiency maximization for a NOMA-based WPT-MEC network[J]. IEEE internet of things journal, 2021, 8(13):10731-10744.
- [11] LUO Z Q, MA W K, YE Y Y, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. IEEE signal processing magazine, 2010, 27(3):20-34.
- [12] GRANT M, BOYD S. CVX: matlab software for disciplined convex programming, version 2.2[EB/OL]. [2024-06-28]. <https://cvxr.com/cvx/>.
- [13] LI W C, CHANG T H, LIN C, et al. Coordinated beamforming for multiuser MISO interference channel under rate outage constraints[J]. IEEE transactions on signal processing, 2013, 61(5):1087-1103.
- [14] LIM D, CHOI K, LIU H P. Optimum power allocation for distributed antenna systems with large-scale fading-only feedback[C/OL]//2009 Sixth International Conference on Information Technology: New Generations. Piscataway: IEEE, 2009[2024-05-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5070781>.

【作者简介】

周涛(1996—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向:无线通信。

陈东华(1977—),通信作者(email: zt2457202010@163.com),男,安徽濉溪人,博士,副教授,研究方向:宽带无线通信。

于海洋(1999—),山东临沂人,硕士研究生,研究方向:无线通信。

(收稿日期: 2024-10-31)