

无人机辅助 MEC 系统中基于最优 SIC 顺序的能耗优化方案

季薇¹, 杨许鑫¹, 李飞¹, 李汀¹, 梁彦¹, 宋云超²

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 在基于上行非正交多址接入 (NOMA) 的无人机 (UAV) 辅助移动边缘计算 (MEC) 系统中, NOMA 的连续干扰消除 (SIC) 顺序已成为限制上行任务卸载链路传输性能的瓶颈, 为降低系统能耗, 对 SIC 顺序进行了讨论, 提出了联合信道增益与任务时延约束的最优 SIC 顺序。在满足设备给定任务时延、设备最大发射功率约束以及 UAV 轨迹的约束下, 基于最优 SIC 顺序提出了最小化系统能耗的问题。由于该问题是个复杂的非凸问题, 采取交替优化的方法求解该优化问题, 以实现功率分配和 UAV 轨迹的优化; 利用匹配理论, 提出了低复杂度算法来得到不同时隙的最优设备分组。仿真结果表明, 与其他 SIC 顺序相比, 最优 SIC 顺序能够在相同的任务时延约束下实现更小的系统能耗; 所提的低复杂度设备分组算法能够得到最优设备分组。

关键词: 移动边缘计算; 无人机; 非正交多址接入; 功率分配; 设备分组

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024042

Energy consumption optimization scheme in UAV-assisted MEC system based on optimal SIC order

Ji Wei¹, Yang Xuxin¹, Li Fei¹, Li Ting¹, Liang Yan¹, Song Yunchao²

1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract: In uplink non-orthogonal multiple access (NOMA)-based unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted mobile edge computing (MEC) system, the successive interference cancellation (SIC) order of NOMA became a bottleneck limiting the transmission performance of task offload in uplink link. To reduce the energy consumption of the system, the SIC order was discussed and the optimal SIC order based on channel gain and task delay constraint was proposed. The optimization problem of minimizing the system energy consumption was proposed based on the optimal SIC order while satisfying the constraints of the given task delay of the device, the maximum transmit power constraint of the device, and the UAV trajectory. Since the problem was a complex non-convex problem, an alternating optimization method was adopted to solve the optimization problem to achieve power allocation and UAV trajectory optimization. A low-complexity algorithm based on matching theory was proposed to obtain the optimal device grouping in different time slots. Simulation results show that the optimal SIC order can realize smaller system energy consumption under the same task delay constraint compared with other SIC order, the proposed low-complexity device grouping algorithm can obtain the optimal device grouping.

Keywords: MEC, UAV, NOMA, power allocation, device grouping

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61871238, No.62271265)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61871238, No.62271265)

0 引言

物联网设备及其相关应用的数量呈指数级增长的态势,使计算能力和功率有限的传统智能终端无法满足下一代无线网络中巨大的业务流量和复杂的服务需求^[1]。移动边缘计算(MEC, mobile edge computing)由于其潜在的增强终端设备计算能力和提高服务质量的特点受到了相当大的关注^[2]。MEC允许终端设备将其计算密集型和时延关键型任务卸载到计算能力更强大的边缘服务器中^[3],可以有效减少计算时延和终端能耗。因此,许多研究人员都致力于研究不同技术在 MEC 中的应用^[4-5]。

随着无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)技术的不断进步,越来越多的 UAV 开始应用于各种场景,如生态监测、灾害应急响应、城市设施监测等^[6]。UAV 辅助的通信具有如下优势:无人机与地面通信设备之间信道条件好,可以有效提升接收端的信噪比;无人机的高移动性可以在一些非突发但临时的应用场景中快速部署;无人机可以进行低成本临时组网,以应对不同类型的需求^[7]。为了适应 MEC 系统对任务时延越来越高的要求,可以将 MEC 服务器配置在 UAV 上,通过优化 UAV 的位置,使 MEC 服务器与设备建立能实现更高卸载速率的视线线路(LOS, line of sight)链路和更好的通信信道^[8],从而满足 MEC 系统对任务低时延的要求。此外,非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)技术是第五代无线网络实现低时延、大规模连接和高吞吐量的关键技术^[9]。NOMA 的关键思想是允许多个设备共享相同的频率-时间资源进行通信,在 MEC 系统中任务卸载阶段利用 NOMA 技术,设备通过叠加编码将其计算任务传输给 MEC 服务器,MEC 服务器再根据不同设备功率进行连续干扰消除(SIC, successive interference cancellation),对每个设备的数据进行顺序解码,不仅能够提高频谱效率,还能提高系统的各项性能^[10-12]。

近年来,集上述技术于一体的相关研究越来越多。文献[13]研究了一种基于上行 NOMA 的 UAV 辅助 MEC 系统,通过联合优化 UAV 轨迹、时隙调度以及任务计算分配来最小化系统能耗,并证明了所提方案的有效性及其优越性。文献[14]研究了一种基于 NOMA 多 UAV 辅助 MEC 物联网系统,可在设备能耗以及服务质量(QoS, quality of service)约束下实现更高的设备和速率。

目前,已有的对基于上行 NOMA 的 UAV 辅助 MEC 系统的研究主要集中在 UAV 轨迹和计算资源的联合优化,但是这些研究并没有考虑 SIC 解码顺序对系统能耗的影响,已有研究中 SIC 顺序通常是按照设备与 MEC 服务器之间的信道增益^[11,15-16]进行设置。由文献[17]可知,在 NOMA 系统中,不同的 SIC 顺序会影响每个子用户的可实现速率。当设备的可实现速率发生改变后,MEC 的任务完成时间也会发生改变。因此,当对每个设备的任务完成时间进行相应的时延约束后,SIC 顺序将会受到影响,从而进一步影响系统的能耗。这是由于在功率域 NOMA 中,为了保证串行干扰消除的效果,先解码设备的发射功率需要大于或等于后解码设备的发射功率^[17]。大多数文献中,SIC 顺序按照信道增益降序排序。然而,当解码顺序处于中间的设备的任务时延约束很小时,要满足时延约束的要求,就要增大设备发射功率以获得优先的解码顺序,以此来增大设备的实现速率。此时,为了满足上面提到的功率域 NOMA 系统对设备发射功率的要求,原本在该设备之前解码的设备的发射功率也需增加,从而增加了系统能耗。

针对上面提到的问题,本文联合考虑信道增益和时延约束对系统的 SIC 顺序的影响,在基于上行 NOMA 的 UAV 辅助 MEC 系统中,提出了一种基于最优 SIC 顺序的系统能耗优化方案,通过优化 SIC 顺序、设备的发射功率、UAV 的轨迹以及用户分组,达到减少系统能耗的目的。仿真结果表明,最优 SIC 顺序相较于其他 SIC 顺序能够在相同的任务时延约束下实现更小的系统能耗。与其他方案相比,所提的低复杂度设备分组算法具有更大的优越性,可以进一步降低系统的能耗。

本文的主要贡献总结如下。

1) 综合考虑设备与 UAV 之间的信道增益以及设备的任务时延约束,重新设计了 SIC 顺序,并对设计准则进行了证明。SIC 顺序优化后,任务时延约束较小的设备的解码顺序可能会提前,然而该设备的发射功率在满足自身的任务时延约束的同时,不会使其他设备的发射功率增加,从而达到降低系统能耗的目的。

2) 在设备分组固定的前提下,将所提的能耗最小化的非凸优化问题分解成 2 个子问题,即 UAV 轨迹优化问题和设备发射功率优化问题,并通过交替优化算法来联合求解。

3) 基于匹配理论, 提出低复杂度的设备分组算法, 以获得不同时隙 UAV 服务的设备最优分组, 进一步降低了系统能耗。

1 系统模型与问题构建

1.1 场景描述

考虑如图 1 所示的基于 NOMA 的 UAV 辅助 MEC 系统, 包括 K 个地面设备与一架配备 MEC 服务器的 UAV。其中, K 个地面设备随机分布在目标区域内, 第 k 个地面设备的三维坐标为 $w_k = [x_k, y_k, 0]$, $\forall k \in \kappa$, $\kappa = \{1, 2, \dots, K\}$ 。假设 UAV 已经通过合成孔径雷达等提前知道地面设备的位置, 以及相应链路的信道状态信息^[18]。UAV 以固定的安全高度 H 飞行在目标区域上空, Q_0 和 Q_F 分别为 UAV 在其飞行轨迹上的初始位置与最终位置。将 UAV 的飞行时间划分为 N 个时隙, 每个时隙的长度不固定, 与此时隙内 UAV 服务的设备有关。UAV 在接收以及计算来自设备的数据时, 位置保持不变, 其在每个时隙的三维坐标为 $q(n) = [X(n), Y(n), H]$, $\forall n \in \{0, 1, 2, \dots, N+1\}$ 。

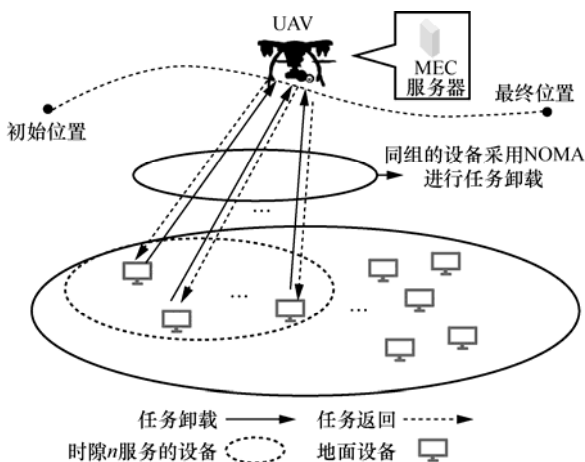


图 1 基于 NOMA 的 UAV 辅助 MEC 系统

假设地面设备有着相同数据量的计算任务 D ^[19-20] 以及不同的任务时延约束 $T_k, k \in \kappa$ 。 K 个地面设备平均分成 N 组, 每组 M 个设备在同一时隙内利用 NOMA 技术向 UAV 卸载全部的计算任务, $M = \frac{K}{N}$, UAV 在时隙内接收并计算设备卸载的任务, 再将计算结果返回给所服务的用户。

1.2 信道模型

假设设备的分组矩阵为 A (A 为一个 $K \times N$ 的矩

阵), 其元素 $a_{kn} = 1$ 或 0 。 $a_{kn} = 1$ 表示第 k 个设备选择在时隙 n 向 UAV 进行计算任务的卸载, $a_{kn} = 0$ 表示第 k 个设备在时隙 n 不执行卸载任务。假设每个设备只能选择一个时隙向 UAV 进行任务卸载, 同时在一个时隙内, UAV 只能接受 M 个设备进行任务卸载, 则设备的分组矩阵要满足以下约束

$$a_{kn} \in \{0, 1\}, \sum_{n=1}^N a_{kn} = 1, \sum_{k=1}^K a_{kn} = M, \forall n \in N, \forall k \in \kappa \quad (1)$$

考虑到 UAV 支持物联网设备的开放环境, 地形、障碍物和阴影效应的影响可以忽略不计。文献[21]中的实验也证明了这一点, 即使在城市环境中, UAV 与物联网设备之间的信道可以近似建模为 LOS 链路。因此, 在时隙 n 内, 第 k 个设备与 UAV 之间的信道增益遵循自由空间损耗模型, 可表示为

$$g_k(n) = \frac{a_{kn} \rho_0}{\|q(n) - w_k\|^2}, \forall n \in N, \forall k \in \kappa \quad (2)$$

其中, ρ_0 为参考距离为 1 m 时的信道功率增益。假设使用的是一个准静态场景, 每个设备与 UAV 之间的信道条件在计算任务卸载期间保持不变。

1.3 任务卸载模型

假设在时隙 n , UAV 服务 M 个地面设备的集合为 $r(n) = [r_1(n), r_2(n), \dots, r_i(n), \dots, r_M(n)]$, 上述设备已经按照某种最优的 SIC 顺序排列好, 其中, $r_i(n)$ 表示时隙 n 的设备组中第 i 个解码设备的原始序号, $r_i(n) \in \kappa$ 。例如, UAV 服务的设备集合为 $r(1) = [r_1(1), r_2(1), r_3(1), r_4(1), r_5(1)] = [7, 2, 5, 3, 1]$, 表示在第 1 个时隙, 设备 1、2、3、5、7 采用 NOMA 技术向 UAV 同时卸载计算任务, 它们在接收端设备的 SIC 顺序为 7、2、5、3、1。

在时隙 n 内, 设备与 UAV 之间的信道增益为 $[g_{r_1(n)}(n), g_{r_2(n)}(n), \dots, g_{r_i(n)}(n), \dots, g_{r_M(n)}(n)]$, 这 M 个设备采用 NOMA 技术向 UAV 卸载计算任务。此时, 设备 $r_i(n)$ 的可实现卸载速率为

$$R_{r_i(n)}(n) = B \ln \left(1 + \frac{P_{r_i(n)} g_{r_i(n)}(n)}{X_i + \sigma^2 B} \right) \quad (3)$$

其中, B 为任务卸载网络总带宽, σ^2 为 UAV 接收处高斯白噪声的功率谱密度, $P_{r_i(n)}$ 为设备 $r_i(n)$

在卸载计算任务时的发射功率， $X_i = \sum_{a_{r_j(n)}=1, j>i} p_{r_j(n)} g_{r_j(n)}(n)$ 为解码顺序在设备 $r_i(n)$

之后的所有设备的干扰之和。

1.4 系统能耗模型

在本文中，由于任务输出数据远远小于任务输入数据，下行下载过程几乎不占据带宽和功率等通信资源，因此可以忽略从 UAV 到地面设备的任务输出数据的下行传输^[22]。系统能耗主要包括任务卸载能耗、任务计算能耗以及 UAV 飞行能耗。

1.4.1 任务卸载能耗

根据式(3)可得时隙 n 中设备 $r_i(n)$ 的卸载时间为

$$T_i^{\text{off}} = \frac{D}{R_i(n)}, \forall i \in \mathbf{r}(n) \quad (4)$$

其中， D 为地面设备卸载的计算任务大小。

时隙 n 内 UAV 服务的设备的总卸载能耗为

$$E_n^{\text{off}} = \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} p_i T_i^{\text{off}} \quad (5)$$

其中， p_i 为设备 i 进行任务卸载时的发射功率。因此所有时隙的总卸载能耗为

$$E^{\text{off}} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} p_i T_i^{\text{off}} \quad (6)$$

1.4.2 任务计算能耗

在每个时隙内，UAV 所提供的计算能力平均分配给服务的 M 个设备，则 UAV 处理每个设备计算任务耗费的时间为

$$T_i^{\text{comp}} = \frac{DC}{f_{\text{CPU}}^{\text{U}}}, \forall i \in \mathbf{r}(n) \quad (7)$$

其中， $f_{\text{CPU}}^{\text{U}}$ 为 UAV 所能提供的计算能力（单位为 cycle/s）， C 为计算 1 bit 任务所需要 CPU 周期数。系统总任务计算能耗^[23]为

$$E^{\text{comp}} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} \gamma_{\text{U}} T_i^{\text{comp}} \left(\frac{f_{\text{CPU}}^{\text{U}}}{M} \right)^3 \quad (8)$$

其中， γ_{U} 表示 UAV 的有效电容系数，这取决于其处理器芯片架构^[24]。

1.4.3 UAV 飞行能耗

本文使用一个高度固定的旋翼无人机。假设 UAV 飞行近似为一系列匀速直线运动，每个直线运动位于相邻时隙的 2 个位置上^[25]，且 UAV 的初始

位置与最终位置是固定的，因此，UAV 轨迹需满足以下约束

$$\begin{aligned} q(0) &= Q_0 \\ q(N+1) &= Q_F \\ \|q(n+1) - q(n)\| &\leq d, \forall n \in \mathbf{N} \end{aligned} \quad (9)$$

其中， d 表示 UAV 相邻时隙的 2 个位置的距离约束。设 W 表示 UAV 的质量，则 UAV 的飞行能耗^[14]可表示为

$$E^{\text{fly}} = \sum_{n=1}^{N+1} \frac{W}{2} \|q(n) - q(n-1)\| v \quad (10)$$

其中， v 是 UAV 的平均飞行速度。综上所述，系统能耗为

$$E = E^{\text{off}} + E^{\text{comp}} + E^{\text{fly}} \quad (11)$$

每个时隙的长度要保证此时服务的设备能够完成任务卸载和任务计算，因此根据式(4)和式(6)，可以将时隙 n 的长度定义为

$$T_n = \max \{T_{r_1(n)}^{\text{off}} + T_{r_1(n)}^{\text{comp}}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall r_i(n) \in \mathbf{r}(n)\} \quad (12)$$

为了满足服务质量要求，时隙长度不能超过此时隙 UAV 服务的设备时延约束，即

$$T_n \leq T_{r_i(n)}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall r_i(n) \in \mathbf{r}(n) \quad (13)$$

1.5 问题构建

针对基于 NOMA 的 UAV 辅助 MEC 系统中的能耗问题，本文首先研究了该系统最优的 SIC 顺序。在任务时延以及设备发射功率约束下，基于最优 SIC 顺序联合优化了 UAV 轨迹、地面设备的发射功率以及地面设备的分组，实现了系统的能耗优化。

令 $\mathbf{Q} \triangleq \{q(n), \forall n \in \mathbf{N}\}$ 表示 UAV 的飞行轨迹， $\mathbf{A} \triangleq \{a_{kn}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall k \in \mathbf{\kappa}\}$ 表示设备分组方案， $\mathbf{P} \triangleq \{p_k, \forall k \in \mathbf{\kappa}\}$ 表示设备在卸载计算任务时采用的发射功率的集合，优化问题可以表示为

$$\text{P0: } \min_{\mathbf{A}, \mathbf{Q}, \mathbf{P}} E \quad (14)$$

$$\text{s.t. } a_{kn} = \{0, 1\}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall k \in \mathbf{\kappa} \quad (14a)$$

$$\sum_{n=1}^N a_{kn} = 1, \forall k \in \mathbf{\kappa} \quad (14b)$$

$$\sum_{k=1}^K a_{kn} = M, \forall n \in \mathbf{N} \quad (14c)$$

$$q(0) = Q_0, q(N+1) = Q_F \quad (14d)$$

$$\|q(n) - q(n-1)\| \leq d, \forall n \in \{1, 2, \dots, N+1\} \quad (14e)$$

$$T_n \leq T_{r_i(n)}, \forall n \in N, \forall r_i(n) \in \mathbf{r}(n) \quad (14f)$$

$$0 \leq p_k \leq p_{th}, \forall k \in \kappa \quad (14g)$$

其中, 式(14a)~式(14c)为用户分组的约束, 式(14d)、式(14e)为 UAV 的飞行轨迹的约束, 式(14f)为每个地面设备的任务时延约束, 式(14g)为每个地面设备的发射功率约束。这个优化问题是非凸的, 变量 \mathbf{A} 、 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 是高度耦合的。除此之外, 用户分组 \mathbf{A} 的二进制性质施加了一个额外的非凸性条件, 因此该优化问题很难直接求解。

2 问题求解

为了解决所提优化问题, 本文根据系统特点, 提出了最优 SIC 顺序, 在此基础上将该优化问题的求解分成以下 2 个阶段: 1) 用户分组已知, 优化设备发射功率以及 UAV 飞行轨迹; 2) 提出低复杂度算法, 得到最优用户分组。

2.1 最优 SIC 顺序

在上行 NOMA 系统中, 不同的 SIC 顺序会对子用户的可实现速率产生影响。在本文提出的系统中, 每个设备有着相应的任务完成时间约束, 通常采用的 SIC 顺序并不能实现卸载能耗和的最小化。为了获得实现卸载能耗和最小的最优 SIC 顺序, 本文提出了定理 1。

定理 1 在时隙 n 中, UAV 服务的 M 个地面设备的最优 SIC 顺序为 $\frac{g_m(n)}{T_m}, \forall m \in \mathbf{r}(n)$ 降序排序, T_m 为该设备任务完成时延约束。

证明 由式(3)可知, 不同 SIC 顺序影响设备的可实现速率, 也就是设备的卸载速率, 从而影响卸载能耗。计算能耗与分配的计算资源有关, 飞行能耗只与无人机轨迹有关, 因此 SIC 顺序与计算能耗和飞行能耗无直接关联, 在对定理 1 进行证明时只需要考虑设备的卸载能耗和。考虑在时隙 n 具有相邻解码顺序的任意 2 个设备用设备 i 、 j 表示, $i \in \mathbf{r}(n), j \in \mathbf{r}(n)$ 。这 2 个设备有 2 种解码顺序, 即先解码 i 或者先解码 j 。然后, 可以获得不同情况下发射功率 p_i 和 p_j , 找到可以实现更低卸载能耗和的情况。

考虑到每个设备卸载的计算任务相同, 以及 UAV 的 CPU 周期数在计算时均匀分配给此时隙服务的 M 个设备, 所以每个设备的任务在 UAV 上计算时间是个常数且相同, 即 $T_i^{\text{comp}} = T_j^{\text{comp}}$, 根据最

大任务时延要求可以得到每个设备的最大任务卸载时延要求, 即 $T_i^{\text{off}} \leq T_i - T_i^{\text{comp}}, T_j^{\text{off}} \leq T_j - T_j^{\text{comp}}$ 。

场景 1 先解码设备 i 的信号

根据优化问题中的约束, 发射功率的可行域可以由式(15)所示约束产生。

$$\begin{cases} \frac{p_i g_i(n)}{p_j g_j(n) + I + \sigma^2 B} \geq \eta_i \\ \frac{p_j g_j(n)}{I + \sigma^2 B} \geq \eta_j \\ 0 \leq p_i \leq p_{th} \\ 0 \leq p_j \leq p_{th} \end{cases} \quad (15)$$

其中, I 表示来自解码顺序在设备 i 和设备 j 之后的设备的干扰。设备的最大任务卸载时延约束可以转化成最小信干噪比约束, 即 $\eta_k = 2^{\frac{D}{BT_k^{\text{off}}}} - 1, k = \{i, j\}$ 。

场景 2 先解码设备 j 的信号

类似地, 设备发射功率的可行域可以由式(16)所示约束产生。

$$\begin{cases} \frac{p_j g_j(n)}{p_i g_i(n) + I + \sigma^2 B} \geq \eta_j \\ \frac{p_i g_i(n)}{I + \sigma^2 B} \geq \eta_i \\ 0 \leq p_i \leq p_{th} \\ 0 \leq p_j \leq p_{th} \end{cases} \quad (16)$$

想要得到最优的 SIC 顺序, 需要对 2 种场景的能耗进行比较, 考虑到设备的任务计算消耗相同, 因此只需要比较 2 种场景下设备的任务卸载能耗之和。在不损失一般性的情况下, 假设 $\frac{g_i(n)}{T_i^{\text{off}}} \geq \frac{g_j(n)}{T_j^{\text{off}}}$,

在此基础上, 证明场景 1 的能耗小于场景 2 的能耗。

式(15)和式(16)中的前 2 个约束确定了 p_i 和 p_j 的下界, 即对于场景 1, $p_i \geq \frac{\eta_i(\eta_j + 1)(I + \sigma^2 B)}{g_i(n)} \triangleq$

$$p_i^{(1)}, p_j \geq \frac{\eta_j(I + \sigma^2 B)}{g_j(n)} \triangleq p_j^{(1)}. \text{ 对于场景 2, } p_i \geq$$

$$\frac{\eta_i(I + \sigma^2 B)}{g_i(n)} \triangleq p_i^{(2)}, p_j \geq \frac{\eta_j(\eta_i + 1)(I + \sigma^2 B)}{g_j(n)} \triangleq p_j^{(2)}.$$

功率域 NOMA 要求先解码的设备发射功率应大于或等于后解码设备发射功率, 并且设备的卸载能耗随发射功率增加而增加。因此在场景 1 中首先根据功率约束确定后解码的设备 j 的发射功率的大

小，也就是先确定 p_j 的大小，可以得到 $p_j = p_j^{(1)}$ 。由于功率域 NOMA 的要求，设备 i 在设备 j 之前解码，因此 $p_i = \min\{p_i^{(1)}, p_{th}\}$ 。

当 $p_j = p_j^{(1)}, p_i = p_i^{(1)}$ 时，在场景 1 中设备 i 和设备 j 的任务卸载能耗之和为

$$c_1 = \frac{p_i^{(1)}D}{R_i^{(1)}(n)} + \frac{p_j^{(1)}D}{R_j^{(1)}(n)} \quad (17)$$

其中， $R_i^{(1)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_i^{(1)}g_i(n)}{p_j^{(1)}g_j(n) + I + \sigma^2B}\right)$ ， $R_j^{(1)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_j^{(1)}g_j(n)}{I + \sigma^2B}\right)$ 。类似地，在场景 2 中设备 i 和设备 j 的任务卸载能耗之和为

$$c_2 = \frac{p_i^{(2)}D}{R_i^{(2)}(n)} + \frac{p_j^{(2)}D}{R_j^{(2)}(n)} \quad (18)$$

其中， $R_j^{(2)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_j^{(2)}g_j(n)}{p_i^{(2)}g_i(n) + I + \sigma^2B}\right)$ ， $R_i^{(2)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_i^{(2)}g_i(n)}{I + \sigma^2B}\right)$ 。可以发现，当 $\frac{g_i(n)}{T_i^{\text{off}}} \geq \frac{g_j(n)}{T_j^{\text{off}}}$ 时， $c_1 \leq c_2$ ，即场景 1 能够实现更小的系统能耗。

当 $p_j = p_j^{(1)}, p_i = p_{th}$ 时，场景 1 中设备 i 和设备 j 的任务卸载能耗之和为

$$c_1 = \frac{p_{th}D}{R_i^{(1)}(n)} + \frac{p_j^{(1)}D}{R_j^{(1)}(n)} \quad (19)$$

其中， $R_i^{(1)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_{th}g_i(n)}{p_j^{(1)}g_j(n) + I + \sigma^2B}\right)$ ， $R_j^{(1)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_j^{(1)}g_j(n)}{I + \sigma^2B}\right)$ ，类似地，场景 2 中设备 i 和设备 j 的任务卸载能耗之和为

$$c_2 = \frac{p_{th}D}{R_j^{(2)}(n)} + \frac{p_i^{(2)}D}{R_i^{(2)}(n)} \quad (20)$$

其中， $R_j^{(2)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_{th}g_j(n)}{p_i^{(2)}g_i(n) + I + \sigma^2B}\right)$ ， $R_i^{(2)}(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_i^{(2)}g_i(n)}{I + \sigma^2B}\right)$ 。可以发现，当

$g_i(n)(\eta_i + 1) \geq g_j(n)(\eta_j + 1)$ 时， $c_1 \leq c_2$ ，即场景 1 能够实现更小的系统能耗。

由于 $\eta_k = 2^{\frac{D}{BT_k^{\text{off}}}} - 1, k = \{i, j\}$ ，因此 $g_i(n)(\eta_i + 1) \geq g_j(n)(\eta_j + 1)$ 与 $\frac{g_i(n)}{T_i^{\text{off}}} \geq \frac{g_j(n)}{T_j^{\text{off}}}$ 都能得到 $\frac{g_i(n)}{T_i} \geq \frac{g_j(n)}{T_j}$ ，在一个时隙内最优的 SIC 顺序是先对 $\frac{g_m(n)}{T_m}, \forall m \in \mathbf{r}(n)$ 较大的设备进行解码。

基于之前的分析，对于同一时隙内 UAV 服务的 M 个用户，任意相邻的 2 个设备的最优解码顺序都应该满足这一准则。因此可以得出结论，每个时隙内最优 SIC 顺序是按 $\frac{g_m(n)}{T_m}, \forall m \in \mathbf{r}(n)$ 递减的顺序。证毕。

2.2 功率分配与 UAV 轨迹优化

由于已经获得了最优的 SIC 顺序，因此在时隙 n 中，设备 i 的可实现速率为

$$R_i(n) = \text{Blb}\left(1 + \frac{p_i g_i(n)}{\sum_{\substack{j \in \mathbf{r}(n) \\ \frac{g_j(n)}{T_j} \geq \frac{g_i(n)}{T_i}, j \neq i}} p_j g_j(n) + \sigma^2 B}\right), \quad i \in \mathbf{r}(n), j \in \mathbf{r}(n) \quad (21)$$

在设备分组固定时，优化问题可以转化为

$$\text{P1: } \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{P}} E^{\text{off}} + E^{\text{fly}} \quad (22)$$

$$\text{s.t. } q(0) = Q_0, q(N+1) = Q_F \quad (22a)$$

$$\|q(n) - q(n-1)\| \leq d, \forall n \in \{1, 2, \dots, N+1\} \quad (22b)$$

$$T_n \leq T_{r_i(n)}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall r_i(n) \in \mathbf{r}(n) \quad (22c)$$

$$0 \leq p_k \leq p_{th}, \forall k \in \mathbf{K} \quad (22d)$$

考虑到目标函数 E^{off} 中分母中变量 \mathbf{Q}, \mathbf{P} 耦合，不易直接求解，因此考虑将问题 P1 分解成 2 个子问题，即固定 \mathbf{P} 优化 \mathbf{Q} 和固定 \mathbf{Q} 优化 \mathbf{P} ，然后对这 2 个子问题进行交替迭代优化，直至收敛。

2.2.1 固定 UAV 轨迹优化设备发射功率

当 UAV 轨迹固定时，不同时间隙 UAV 服务的设备的发射功率的优化是独立的，所以可以将用户发射功率的优化问题分成 N 个独立的子问题。在时隙 n 中，设备发射功率优化问题可以写成

$$\text{P2: } \min_{\mathbf{P}} \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} \frac{p_i}{R_i(n)} \quad (23)$$

$$\text{s.t. } T_n \leq T_{r_i(n)}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall r_i(n) \in \mathbf{r}(n) \quad (23a)$$

$$0 \leq p_i \leq p_{th}, \forall i \in \mathbf{r}(n) \quad (23b)$$

其中, 优化问题 P2 的优化变量 \mathbf{p} 为时隙 n 时 UAV 服务的设备发射功率。优化问题 P2 的目标函数为非线性多项式规划问题, 是非凸问题, 处理起来比较困难并且很难获得它的全局最优解, 可以利用二次变换^[26]将目标函数转换成凸优化问题, 然后利用迭代得到最优解。通过二次变换, 优化问题 P2 的目标函数可以等效为

$$f_q(\mathbf{p}) = \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} \left(2y_i \sqrt{p_i} - y_i^2 R_i(n) \right) \quad (24)$$

其中, $y_i = \frac{\sqrt{p_i^*}}{\text{lb} \left(1 + \frac{p_i^* g_i(n)}{\sum_{\substack{g_j(n) \geq g_j(n) \\ T_j, j \neq i}} p_j^* g_j(n) + \sigma^2 B} \right)}$,

$i \in \mathbf{r}(n), j \in \mathbf{r}(n)$, p_i^*, p_j^* 为上一次迭代中求解得到的发射功率。考虑到式(24)的分母中仍有变量, 再进行一次二次变换, 则式(24)可以等效为

$$f_{qq}(\mathbf{p}) = \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} 2y_i \sqrt{p_i} - \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} y_i^2 \text{lb} \left(1 + 2z_i \sqrt{p_i g_i(n)} - z_i^2 \left(\sum_{\substack{g_j(n) \geq g_j(n) \\ T_j, j \neq i}} p_j g_j(n) + \sigma^2 B \right) \right) \quad (25)$$

优化问题就可以改写为

$$\begin{aligned} \text{P3: } & \min_{\mathbf{p}} f_{qq}(\mathbf{p}) \\ \text{s.t. } & \text{式(23a), 式(23b)} \end{aligned}$$

优化问题 P3 是一个凸优化问题, 可以使用 CVX 工具箱求解。求解发射功率的算法流程如算法 1 所示。

算法 1 基于二次变换的迭代功率分配算法

初始化 第一次迭代发射功率参数 \mathbf{p}^* , 定义算法的收敛精度 ξ 和最大的迭代次数 T_{\max}

- 1) for $n=1$ to N
- 2) 初始迭代次数 $t=0$, 初始能耗 $\widetilde{f}_{qq} = +\infty$;
- 3) while ($t < T_{\max}$)
- 4) $t = t + 1$
- 5) 更新 y_i 和 z_i ;
- 6) 求解优化问题 P3, 得到能耗 $f_{qq}(\mathbf{p}^*)$;
- 7) 如果 $|f_{qq}(\mathbf{p}^*) - \widetilde{f}_{qq}| < \xi$ 成立, 更新 \mathbf{p} 并返

回, 否则令 $\widetilde{f}_{qq} = f_{qq}(\mathbf{p}^*)$, 更新 \mathbf{p} ;

8) end while

9) end for

2.2.2 固定设备发射功率优化 UAV 轨迹

当设备发射功率固定时, P1 可以转化为

$$\text{P4: } \min_{\mathbf{Q}} \sum_{n=1}^{N+1} \frac{W}{2} \|q(n) - q(n-1)\|_v + \sum_{n=1}^N \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} p_i T_i^{\text{off}} \quad (26)$$

$$\text{s.t. } q(0) = Q_0, q(N+1) = Q_F \quad (26a)$$

$$\|q(n) - q(n-1)\| \leq d, \forall n \in \{1, 2, \dots, N+1\} \quad (26b)$$

$$T_n \leq T_{r_i(n)}, \forall n \in N, \forall r_i(n) \in \mathbf{r}(n) \quad (26c)$$

其中, $T_i^{\text{off}} = \frac{p_i D}{R_i(n)}$, $\forall i \in \mathbf{r}(n)$ 。考虑到分母中存在分式且分子和分母都存在变量, 所以参考优化问题 P2 的处理方法, 进行两次二次变换, 可以得到

$$f_i(\mathbf{Q}) = \frac{D}{B} \left(2\sqrt{p_i} y_{in} - y_{in}^2 \text{lb} \left(1 + 2z_{in} \sqrt{p_i g_i(n)} - z_{in}^2 \left(\sum_{\substack{g_j(n) \geq g_j(n) \\ T_j, j \neq i}} p_j g_j(n) + \sigma^2 B \right) \right) \right) \quad (27)$$

其中, $y_{in} = \frac{\sqrt{p_i}}{\text{lb} \left(1 + \frac{p_i g_i^*(n)}{b_i^*} \right)}$, $z_{in} = \frac{\sqrt{p_i g_i^*(n)}}{b_i^*}$, $b_i^* =$

$\sum_{\substack{g_j(n) \geq g_j(n) \\ T_j, j \neq i}} p_j g_j(n) + \sigma^2 B, g_i^*(n), i \in \mathbf{r}(n)$ 是根据上

一次迭代 UAV 的轨迹得到的 UAV 与设备 i 在时隙 n 的信道增益。从式(27)可以看出, $\sqrt{g_i(n)}$ 分母中仍存在变量, P4 为非凸问题。针对这个问题本文使用了连续凸近似法^[27]将 P4 转化为凸优化问题, 利用下界迭代得到次优解。利用一阶泰勒展开 $\sqrt{g_i(n)}$ 可以近似为

$$\sqrt{g_i(n)} \triangleq -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{g_i^*(n)}}{\|q^*(n) - w_i\|^2} \left(\|q(n) - w_i\|^2 - \|q^*(n) - w_i\|^2 \right) \quad (28)$$

其中, $q^*(n)$ 和 $g_i^*(n)$ 是上一次迭代中 UAV 在时隙 n 的位置以及与设备 i 之间的信道增益。将式(27)和式(28)代入优化问题 P4, 得到凸优化问题 P5, 可以采用 CVX 工具箱进行求解。算法流程如算

法 2 所示。

$$\text{P5: } \min_{\mathbf{Q}} \sum_{n=1}^{N+1} \frac{W}{2} \|q(n) - q(n-1)\|_v + \sum_{n=1}^N \sum_{i=r_1(n)}^{r_M(n)} p_i f_i(\mathbf{Q})$$

s.t. 式(26a)~式(26c)

算法 2 基于二次变换的轨迹优化算法

初始化 UAV 轨迹 \mathbf{Q}^* , 定义算法的收敛精度 ξ 和最大的迭代次数 T_{\max}

- 1) 初始化迭代次数 $t=0$, 初始化能耗 $\tilde{E} = +\infty$;
- 2) while ($t < T_{\max}$)
- 3) $t=t+1$;
- 4) 更新 y_i 和 z_i ;
- 5) 求解优化问题 P5, 得到能耗 E ;
- 6) 如果 $|E - \tilde{E}| < \xi$ 成立, 更新 \mathbf{Q}^* 并返回, 否则令 $\tilde{E} = E$, 更新 \mathbf{Q}^* ;
- 7) end while
- 8) 输出最优 UAV 轨迹 \mathbf{Q}^* 。

综上所述, 优化问题 P1 的交替迭代优化算法流程如算法 3 所示。

算法 3 交替迭代优化算法

初始化 UAV 轨迹 \mathbf{Q} 和设备的发射功率 \mathbf{P} , 定义算法的收敛精度 ξ , 以及最大的迭代次数 T_{\max}

- 1) 初始化迭代次数 $t=0$, 初始化能耗 $\tilde{E} = +\infty$;
- 2) while ($t < T_{\max}$)
- 3) $t=t+1$;
- 4) 通过算法 1 得到 \mathbf{P} ;
- 5) 通过算法 2 得到 \mathbf{Q} ;
- 6) 根据 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 得到系统能耗 E ;
- 7) 如果 $|E - \tilde{E}| < \xi$ 成立, 更新系统能耗 E 并跳出循环; 否则令 $\tilde{E} = E$, 并且 $t = t + 1$;
- 8) end while
- 9) 输出设备发射功率 \mathbf{P} 和 UAV 轨迹 \mathbf{Q} 。

2.3 基于匹配理论的设备分组算法

对于设备分组问题, 可以考虑穷举法, 列出所有的分组方案, 然后对每种方案分别计算出相应的系统能耗, 最后选择能耗最少的分组方案。但是当设备数大的时候, 分组方案的数量巨大, 并且每个方案都要进行相同的求解步骤, 复杂度极高, 难以实现。因此, 本节提出了低复杂度的设备分组方案, 将设备分组问题视为匹配问题^[28], 并采用低复杂度匹配理论的算法进行求解。

2.3.1 匹配理论

根据设备和时隙的假设, 设备 κ 和时隙 N 可以看成 2 个不相交的玩家集^[27], 即 $\kappa \cap N = \emptyset$ 。通过分配设备 $k \in \kappa$ 在时隙 $n \in N$, 所提出的设备分组问题可以定义为如下所示的多对一匹配问题。

定义 1 一个多对一的匹配 ψ 是集合 N 到集合 κ 的映射函数, 满足以下条件

- 1) $\psi(n) \in \kappa, \forall n \in N, \psi(k) \in N, \forall k \in \kappa$;
- 2) $|\psi(n)| = 1, \forall n \in N, |\psi(k)| = M, \forall k \in \kappa$;
- 3) $n \in \psi(k) \Leftrightarrow \psi(n) = k$ 。

其中, 匹配 ψ 在不同的参数下具有不同的含义。条件 1) 表示任意一个时隙 n 与设备子集匹配, 任意设备 k 与其中一个时隙匹配; 条件 2) 表示每个设备只能与其中一个时隙匹配, 而每个时隙与 M 个设备匹配; 条件 3) 表示设备 k 与时隙 n 相互匹配的情况。通过定义 1 可以证明设备分组问题可以被表述为多对一匹配问题^[28]。

为了在匹配模型中建立不同玩家的偏好列表, 引入符号 \succ 来表示任意设备和任意时隙的严格偏好关系。例如, 对于任意设备 $k \in \kappa$ 和 2 个不同时隙 $n \in N$ 和 $n' \in N$, 设备 k 更喜欢时隙 n 而不是 n' 可以表示为

$$(n, \psi) \succ_k (n', \psi') \Leftrightarrow E_k(\psi) < E_k(\psi') \quad (29)$$

其中, $E_k(\psi)$ 是设备 k 与时隙 n 匹配时的系统能耗。上述偏好关系的条件就是系统消耗更少的能耗。在时隙方面, 偏好关系为

$$(k, \psi) \succ_n (k', \psi') \Leftrightarrow E_n(\psi) < E_n(\psi') \quad (30)$$

式(30)表示时隙 n 更倾向于与设备 k 匹配, 而不是设备 k' 。该偏好关系的条件是系统消耗更少的能耗。

2.3.2 设备分组算法设计

在这个匹配模型中, 与不同时隙匹配的 2 个设备的交换操作可以定义为 2 个设备交换其匹配的时隙。交换匹配操作 ψ_i^j 意味着设备 i 切换到设备 j 的时隙, 设备 j 被匹配到用户 i 的时隙, 而其他设备保持不变。

定义 2 交换匹配操作

$$\psi_i^j = \{\psi \setminus \{(n, i), (n', i)\} \cup \{(n, i), (n', j)\}\}, j \in \psi(n), i \in \psi(n') \text{ 和 } j \in \psi_i^j(n'), i \in \psi_i^j(n)。$$

对于设备 i 和设备 j 的交换匹配操作,

$j \in \psi(n), i \in \psi(n')$, 匹配由 ψ 变换为 ψ_j^i , $j \in \psi_j^i(n'), i \in \psi_j^i(n)$ 。假如经过交换匹配操作 ψ_j^i 后, 系统的能耗降低, 就定义该交换匹配操作 ψ_j^i 为允许的交换匹配操作。经过一系列允许的交换匹配操作后, 匹配问题可以收敛到交换稳定匹配^[28], 也就是任意 2 个设备之间不再存在允许的交换匹配操作。基于匹配理论的设备分组算法流程如算法 4 所示。

算法 4 基于匹配理论的设备分组算法

初始化阶段

- 1) 随机匹配设备与时隙;
- 2) 记录当前的匹配为 ψ_{init} 。

交换匹配阶段

- 1) 对于任意位于不同时间隙的设备 i 和设备 j , 即 $\psi(i) \neq \psi(j)$;
- 2) 如果交换匹配操作 ψ_j^i 为允许的, 就交换设备 i, j 匹配的时隙, 并且令 $\psi = \psi_j^i$, 否则当前的匹配 ψ 不变;
- 3) 重复这一交换匹配操作, 直到在新一轮中没有允许的交换匹配操作。

所提设备分组算法可以从任意匹配开始, 在每次迭代中, 如果 2 个设备之间的交换匹配操作被允许, 则交换它们所匹配的时隙, 并且更新系统能耗。在新一轮的交换匹配阶段, 如果任意不同时间隙设备之间不再存在允许的交换匹配操作, 则交换匹配阶段终止, 可以获得所有设备最优的对应时隙匹配。

2.3.3 设备分组算法的复杂度分析

对于所提设备分组算法, 考虑最坏的情况, 每个设备需要与其他时隙的所有设备尝试交换匹配。因此, 需要搜索 $K-M$ 个设备来执行交换操作。对于 K 个设备, 一轮完整周期最多执行 $K(K-M)$ 次计算。假如经过 C 轮, 匹配问题达到稳定状态, 所提算法在最坏情况下的计算复杂度近似为 $O(CK^2)$,

而穷举法的计算复杂度达到了 $O\left(\frac{K!}{(M!)^N}\right)$, 所提算

法有效地降低了复杂度。同时, 所提算法在尝试进行交换操作时只需要对相应的 2 个时隙匹配的设备重新进行发射功率优化, 因为不同的时隙是独立的, 其他时隙匹配的设备的发射功率不需要改变。而穷举法的每个方案都需要对 N 个时隙的所有设备进行发射功率优化。

2.4 求解优化问题 P0 的整体算法以及复杂度分析

对于优化问题 P0, 首先根据系统特点, 提出了最优的 SIC 顺序, 然后在此基础上进行求解。因此, 确定 SIC 顺序之后的优化问题的整体算法流程如算法 5 所示。

算法 5 求解问题 P0 的整体算法

- 1) 初始化用户分组矩阵 A 、UAV 轨迹 Q 以及设备的发射功率 P ;
- 2) 采用算法 3 得到优化后的 UAV 轨迹以及设备的发射功率;
- 3) 采用算法 4 得到最优的设备分组矩阵 A , 同时更新得到优化后的 UAV 轨迹以及设备的发射功率。

本文提出的算法的复杂度主要分为 2 个部分。第一部分来自固定设备分组的情况下利用交替迭代的方法求解问题 P1, 假设 K_1 表示交替优化算法的迭代次数, 则求解问题 P1 的计算复杂度为 $O(K_1)$; 第二部分来自利用所提设备分组算法得到最优的设备分组算法, 假设经过 C 轮得到了最优的设备分组方案, 则求解优化问题 P0 的整体算法的计算复杂度可以近似为 $O(CK^2K_1)$ 。

3 仿真分析

假设 $K=50$ 个地面设备随机分布在 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的正方形区域内, UAV 的飞行周期分为 $N=10$ 个时隙, 每个时隙 $M=5$ 个地面设备向 UAV 进行任务卸载。每个设备的计算任务完成时延随机设置为 $[5,10] \text{ s}$, 其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	值	参数	值
H/m	15	$C/(\text{cycle} \cdot \text{bit}^{-1})$	10^3
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2	B/MHz	1
W/kg	1	P_{th}/W	10
Q_0/m	$[0,25,15]$	D/kbit	100
d/m	10	σ^2/dBm	-100
f_{cpu}^U/GHz	2	ξ	10^{-3}
κ_U	1×10^{-27}	T_{max}	50
Q_r/m	$[50,25,15]$	ρ_0/dB	-50

在相同的设备分组条件下不同方案的系统能耗对比如图 2 所示。时延约束升序以及信道增益

降序方案是指系统在上行 NOMA 中采取的 SIC 顺序分别是此时隙 UAV 服务的设备任务时延约束升序和此时隙 UAV 服务的设备与 UAV 之间的信道增益降序。OMA 方案是指在每个时隙中，UAV 服务的设备采用 OMA 方案进行任务卸载，即 M 个设备平分信道带宽。时延约束升序、最优 SIC 顺序、信道增益降序^[15-17]以及 OMA 方案都会对 UAV 的轨迹进行优化。固定 UAV 轨迹方案是指将 UAV 的轨迹固定为一条直线，采用基于最优 SIC 顺序的上行 NOMA 方案进行计算任务的卸载，并且对系统能耗进行优化。从图 2 可以看出，随着迭代次数的增加，各种方案的系统能耗都趋于收敛，证明了所提算法的有效性以及对 UAV 轨迹进行优化可以降低系统能耗。与 OMA 方案相比，采用 NOMA 方案时系统能实现更小的能耗。与本文提出的 SIC 顺序相比，采用其他 2 种 SIC 顺序的方案系统能耗均会增加，这一结果表明，在本文提出的 MEC 系统上行链路采用功率域 NOMA 进行任务卸载时，SIC 顺序将对系统能耗产生影响。因此，优化 SIC 的顺序，而不是遵循信道增益或任务时延大小的顺序，对系统能耗优化具有实际意义。

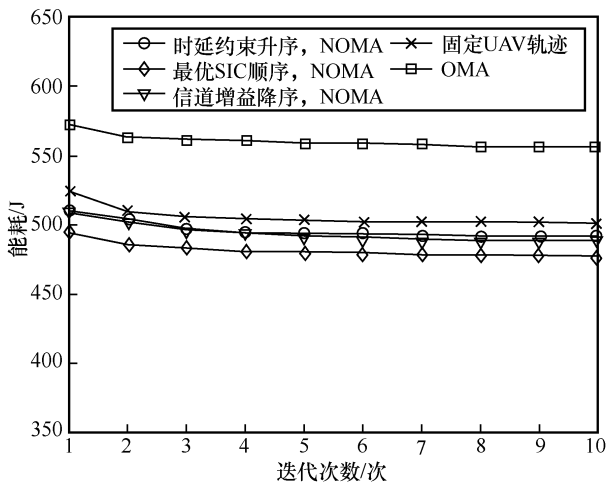


图 2 在相同的设备分组条件下不同方案的系统能耗对比

在不同设备总数下不同方案的系统能耗对比如图 3 所示。从图 3 可以看出，随着设备数量的增加，系统能耗也增加。当每个时隙 UAV 服务的设备数仅有一个，也就是设备总数为 10 个时，采用不同 SIC 顺序 NOMA 方案的系统能耗相同；随着设备数的增加，采用最优 SIC 顺序 NOMA 方案可以实现更好的系统性能。

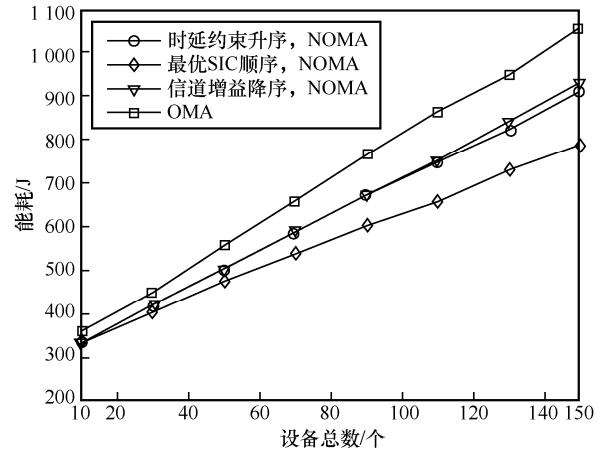


图 3 在不同设备总数下不同方案的系统能耗对比

在不同设备总数下，优化 UAV 轨迹对系统能耗的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出，进行 UAV 轨迹优化后的系统能实现更低的系统能耗，因此对 UAV 轨迹进行优化对系统能耗的优化同样有着重要意义。

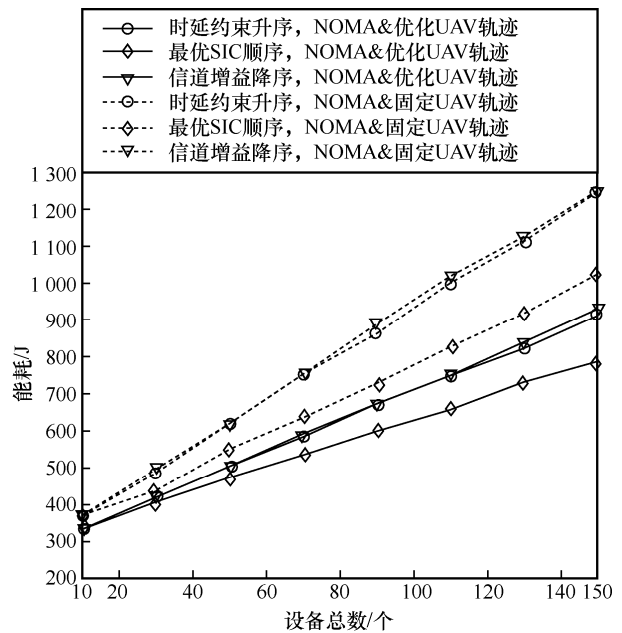


图 4 优化 UAV 轨迹对系统能耗的影响

系统能耗与所提设备分组算法中允许的交换次数的关系如图 5 所示。初始的设备分组是随机的，可以看出，分组算法中每一个允许的交换匹配操作都会使系统的能耗降低，而且算法能够保证无论初始的设备分组是什么状态，都会使系统能耗收敛。当设备总数为 50 时，在经过大约 180 次允许的交换匹配操作后，在新一轮的交换匹配中没有发现允许的交换匹配操作，所以系统能耗不会再下降，此时

的设备分组就是最优的设备分组方案。文献[29]提出了动态用户分组算法，该算法主要分组流程为：在 N 个用户的情形下，将用户按照信道增益的大小排序，在进行用户分组的时候，利用远近用户分组的思想，从每个集合中各取出相应位置的用户进行组合。文献[30]提出了低复杂度的 k -means 用户分组算法，不同于动态用户分组算法，基于 k -means 的用户分组算法不能保证用户之间的信道差异，主要关注的是通过低复杂度的用户匹配方案，为每个用户保持较强的可实现速率，从而得到次优的用户分组方案。

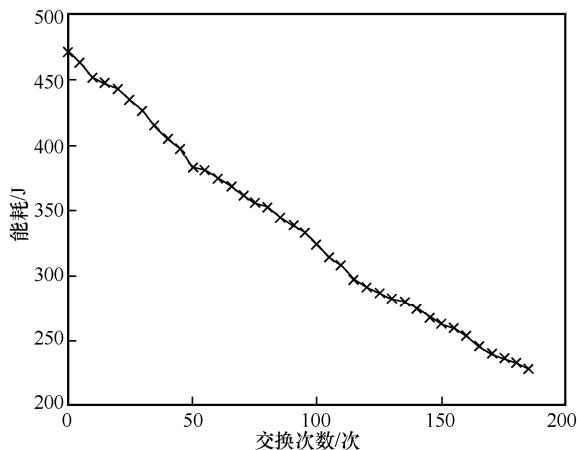


图 5 系统能耗与所提设备分组算法中允许的交换次数的关系

优化前后的设备分组情况如表 2 所示，其中数字表示设备的编号，一共有 50 个设备，每个时隙中以 5 个设备为一组向 UAV 进行任务卸载，初始设备分组方案为随机分组，经过分组优化后，可发现分组有明显不同。

表 2 优化前后的设备分组情况

时隙	优化前的设备分组	优化后的设备分组
时隙 1	3、14、31、32、41	15、17、23、26、43
时隙 2	6、22、42、48、50	9、19、28、29、33
时隙 3	5、8、21、27、42	4、24、36、44、49
时隙 4	16、34、36、37、43	1、2、5、7、37
时隙 5	17、23、26、28、49	16、20、30、35、38
时隙 6	9、19、23、26、28	13、14、25、38、47
时隙 7	4、15、38、44、47	10、11、18、45、46
时隙 8	1、2、7、12、39	8、21、27、34、42
时隙 9	13、25、35、45、46	6、22、44、48、50
时隙 10	10、11、18、20、30	3、14、31、32、41

基于匹配理论的用户分组算法、动态用户分组算法、基于 k -means 的用户分组算法以及随机分组算法的系统能耗如图 6 所示。各种算法在上行 NOMA 卸载传输均采用最优 SIC 顺序。从图 6 可以看出，基于匹配理论的用户分组算法的性能明显优于使用固定分组规则的动态用户分组算法，也优于基于 k -means 的用户分组算法。

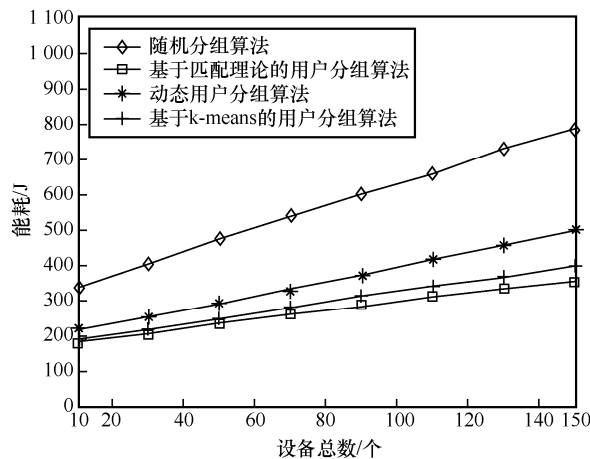


图 6 不同算法的系统能耗

4 结束语

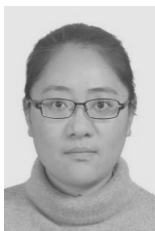
本文建立了基于 NOMA 的 UAV 辅助 MEC 系统，提出了基于最优 SIC 顺序的 NOMA 的系统能耗优化方案。具体来讲，本文提出的最优 SIC 顺序同时考虑了设备与 UAV 之间的信道增益和设备的任务计算时延约束，在此基础上，将优化问题分成 2 个阶段进行求解。首先在固定分组的情况下，利用了基于二次变换的交替迭代优化算法得到了使系统能耗最小的 UAV 飞行轨迹和设备的发射功率；对于最优设备分组的求解，考虑到设备的数量使穷举搜索法复杂度极大，难以实现，因此提出了基于匹配理论的低复杂度的设备分组方案。仿真结果表明，本文提出的基于最优 SIC 顺序 NOMA 方案能够使系统能耗降低，验证了优化 SIC 顺序在基于上行 NOMA 传输方案的系统中的有效性；本文所提设备分组算法具有较好的实现性。

参考文献：

[1] BAKTIR A C, OZGOVDE A, ERSOY C. How can edge computing benefit from software-defined networking: a survey, use cases, and future directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2359-2391.

- [2] SHNAIWER Y N, KOUZAYHA N, MASOOD M, et al. Multi-hop task routing in UAV-assisted mobile edge computing IoT networks with intelligent reflective surfaces[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023,10(8): 7174-7188.
- [3] ZHOU H, WANG Z N, MIN G Y, et al. UAV-aided computation offloading in mobile edge computing networks: a Stackelberg game approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(8): 6622-6633.
- [4] ZHANG J, GUO H Z, LIU J J, et al. Task offloading in vehicular edge computing networks: a load-balancing solution[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 2092-2104.
- [5] LIAO Y Z, CHEN X Y, XIA S, et al. Energy minimization for UAV swarm-enabled wireless inland ship MEC network with time windows[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(2): 594-608.
- [6] XU H R, WANG L Z, HAN W, et al. A survey on UAV applications in smart city management: challenges, advances, and opportunities[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 8982-9010.
- [7] 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.
- [8] LI J, YI C Y, CHEN J Y, et al. Joint trajectory planning, application placement, and energy renewal for UAV-assisted MEC: a triple-learner-based approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(15): 13622-13636.
- [9] 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. NOMA-based multi-user collaborative MEC offloading scheme[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 2022, 42(6): 52-60.
- [10] FANG F, WANG K D, DING Z G, et al. Energy-efficient resource allocation for NOMA-MEC networks with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3436-3449.
- [11] LU W D, DING Y, GAO Y, et al. Secure NOMA-based UAV-MEC network towards a flying eavesdropper[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(5): 3364-3376.
- [12] SHI J, ZHOU Y F, LI Z, et al. Delay minimization for NOMA-mmW scheme-based MEC offloading[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(3): 2285-2296.
- [13] BUDHIRAJA I, KUMAR N, TYAGI S, et al. Energy consumption minimization scheme for NOMA-based mobile edge computation networks underlying UAV[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(4): 5724-5733.
- [14] FARHA Y A, ISMAIL M H. Design and optimization of a UAV-enabled non-orthogonal multiple access edge computing IoT system[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 117385-117398.
- [15] LIU Z X, QI J X, SHEN Y Y, et al. Maximizing energy efficiency in UAV-assisted NOMA-MEC networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(24): 22208-22222.
- [16] QIN X T, SONG Z Y, HOU T W, et al. Joint optimization of resource allocation, phase shift, and UAV trajectory for energy-efficient RIS-assisted UAV-enabled MEC systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(4): 1778-1792.
- [17] ZHANG J, ZHU L P, XIAO Z Y, et al. Optimal and sub-optimal uplink NOMA: joint user grouping, decoding order, and power control[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(2): 254-257.
- [18] LU W D, DING Y, GAO Y, et al. Resource and trajectory optimization for secure communications in dual unmanned aerial vehicle mobile edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(4): 2704-2713.
- [19] DU Y, YANG K, WANG K Z, et al. Joint resources and workflow scheduling in UAV-enabled wirelessly-powered MEC for IoT systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10): 10187-10200.
- [20] LIU B Y, WAN Y Y, ZHOU F H, et al. Resource allocation and trajectory design for MISO UAV-assisted MEC networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(5): 4933-4948.
- [21] LIN X Q, YAJNANARAYANA V, MURUGANATHAN S D, et al. The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(4): 204-210.
- [22] ZHANG X C, ZHANG J, XIONG J, et al. Energy-efficient multi-UAV-enabled multiaccess edge computing incorporating NOMA[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(6): 5613-5627.
- [23] TUN Y K, PARK Y M, TRAN N H, et al. Energy-efficient resource management in UAV-assisted mobile edge computing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(1): 249-253.
- [24] YUAN W H, NAHRSTEDT K. Energy-efficient CPU scheduling for multimedia applications[J]. *ACM Transactions on Computer Systems*, 2006, 24(3): 292-331.
- [25] YANG Z H, PAN C H, WANG K Z, et al. Energy efficient resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(9): 4576-4589.
- [26] SHEN K M, YU W. Fractional programming for communication systems—part I: power control and beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(10): 2616-2630.
- [27] 徐勇军, 谢豪, 陈前斌, 等. 基于不完美 CSI 的异构 NOMA 网络能效优化算法[J]. *通信学报*, 2020, 41(7): 131-140.
XU Y J, XIE H, CHEN Q B, et al. Energy efficiency optimization algorithm for heterogeneous NOMA network based on imperfect CSI[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(7): 131-140.
- [28] SASAKI H, TODA M. Two-sided matching problems with externalities[J]. *Journal of Economic Theory*, 1996, 70(1): 93-108.
- [29] ALI M S, TABASSUM H, HOSSAIN E. Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 6325-6343.
- [30] KATWE M, SINGH K, CLERCKX B, et al. Rate-splitting multiple access and dynamic user clustering for sum-rate maximization in multiple RISs-aided uplink mmWave system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(11): 7365-7383.

[作者简介]



季薇（1979- ），女，江苏淮安人，博士，南京邮电大学教授，主要研究方向为无线通信与通信信号处理、基于机器学习的信号处理算法和应用。



李汀（1979- ），男，江苏扬州人，博士，南京邮电大学副教授，主要研究方向为 5G 无线通信技术、基于人工智能的无线通信技术。



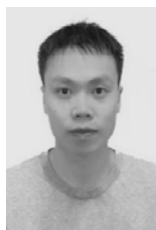
杨许鑫（1999- ），男，安徽安庆人，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为移动边缘计算与无人机辅助通信。



梁彦（1979- ），女，河北唐山人，博士，南京邮电大学副教授，主要研究方向为无线通信、信号处理。



李飞（1966- ），女，湖南长沙人，博士，南京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为量子智能计算、群智能算法和无线通信中的信号处理算法。



宋云超（1988- ），男，江苏常州人，南京邮电大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为 5G/6G 无线通信信号处理。