

## 基于 UAV 的空地协同任务卸载策略研究

杨紫薇, 解志斌, 陈磊, 袁伟康  
(江苏科技大学海洋学院 镇江 212003)

**摘要:** 随着各行业对大批量信息处理需求的增加, 移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)技术应运而生。而在陆地障碍较多、MEC服务器搭载不便的情况下, 研究了一种无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)中继辅助用户卸载任务到基站的场景。针对该场景, 提出了一种基于博弈论的最优任务卸载方法, 通过联合优化任务卸载比例和卸载策略使得系统时延最小化。由于这两个变量之间相互耦合, 因此将原优化问题转化为两个子问题求解。首先, 在确定策略的情况下, 证明了系统时延最小值存在的条件, 得到了用户的最优卸载比例闭合解。然后, 将原优化问题转化为任务分配问题, 并建立博弈论模型。在证明了该模型存在纳什均衡(Nash Equilibrium, NE)的前提下, 经过多次迭代, 求解得到基于时延最小的用户任务卸载策略集。仿真结果表明: 上述方法有效降低了全局计算时延, 在时效性上优于其他一些常见的卸载方法。

**关键词:** 移动边缘计算; 无人机; 计算卸载; 博弈论

**中图分类号:** TP393; V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0010-06

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20221012001

**引用格式:** 杨紫薇, 解志斌, 陈磊, 等. 基于 UAV 的空地协同任务卸载策略研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 10-15.

## Research of air-to-ground cooperative task offloading strategy based on UAV-assisted

YANG Ziwei, XIE Zhibin, CHEN Lei, YUAN Weikang  
(Jiangsu University of Science and Technology, Ocean College, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Mobile edge computing (MEC) technology has emerged, as processing a tremendous amount of data information has gradually become an urgent need in various industries. In the case of many land obstacles and inconvenient installation of MEC servers, a scenario where unmanned aerial vehicles (UAVs) relay assist users to offload tasks to the base station is proposed. Aiming at this scenario, an optimal task offloading method based on game theory is presented. In order to minimize system delay, the task-offloading ratio and task-offloading strategy are jointly optimized. Since these two variables are coupled with each other, the original optimization problem is transformed into two sub-problems for solving. First, the conditions for the existence of the minimum system latency are proved under the determined strategy. Simultaneously, the closed-form expression of the optimal offloading ratio is given. Then, the optimization problem is transformed into a task assignment problem and a game theory model is developed. By proving the existence of Nash Equilibrium (NE) in this model, the set of user task offloading policies based on the minimum delay is given after several iterations. The simulation demonstrates that the global computation time delay is effectively reduced by the above method, which is better than some other common offloading methods in terms of timeliness.

**Keywords:** Mobile edge computing; Unmanned aerial vehicle; Computing offloading; Game theory

**Citation:** YANG Ziwei, XIE Zhibin, CHEN Lei, et al. Research of air-to-ground cooperative task offloading strategy based on UAV-assisted[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 10-15.

### 引 言

近年来, 随着新一代信息通信技术的发展, 各行业都在逐步推进数字化转型。目前全球仍处

于疫情反复阶段, 在疫情管控情况下, 人们的衣食住行都离不开数字化<sup>[1]</sup>。基于上述情况, 边缘计算技术的提出有效地缓解了有限资源与大量计算需求之间的矛盾, 是产业数字化转型的关键环

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61871203); 江苏省未来网络科研基金项目(FNSRFP-2021-YB-51)

**通信作者:** 解志斌 (xiezhbin@just.education.cn)

**收稿日期:** 2022-10-12 **修回日期:** 2022-11-18

节<sup>[2]</sup>。目前,大部分研究都基于对MEC系统中时延和能耗的优化,文献[3]针对边缘云场景,以带宽分配作为奖励,通过近似凸优化方法获得更优卸载策略,该方法有效减少了全局时延。文献[4]提出了一种基于拍卖理论的算法,分别寻求时延、能耗和吞吐量最优情况下的用户卸载策略。

然而,现有的MEC技术也极易受到传输路径上的障碍物影响,特别是在应急场景下,MEC服务器搭建困难,无法有效地处理任务。近年来,无人机以其机动性而受到广泛关注,无人机协同下的MEC技术能有效地弥补陆地MEC架构在应急场景中的不足。文献[5]通过实验证明了无人机通信系统在远距离传输中的有效性,是构建一体化多平台支撑通信系统的关键组成。

在现有研究中,无人机可以作为用户节点向地面服务器卸载任务,也可以作为空中MEC服务器和中继服务器为地面用户提供服务。文献[6,7]中无人机作为请求任务卸载的用户,采用优化算法求解基于时延和能耗最小的任务分配问题。文献[8]中以无人机的全局计算时间和能耗作为优化目标,采用博弈论来获得卸载策略的最优解。然而无人机计算卸载需求较少,更多情况下,无人机的机动性使得其能高效地为用户传输和卸载无法处理的业务。而在针对无人机搭载MEC服务器的研究中,文献[9]、[10]以最小化系统的能耗为指标,对用户任务的分配进行优化,获得最佳的用户任务卸载决策。但文献[9]、[10]中的模型仅考虑了用户-无人机两层架构,无人机服务器也受到其搭载电池容量和CPU计算能力的限制,不适用于大规模任务卸载场景。

在针对无人机辅助用户卸载的三层架构研究中,文献[11]在无人机作为中继服务器的场景下,利用联盟博弈算法联合优化了系统的时延和能耗。文献[12]提供了一种无人机辅助用户卸载任务到边缘云的方案,以低时延和低能耗为目标获得最佳的用户卸载决策。然而,文献[11]、[12]未采用分割式卸载方法确认最佳卸载比例,未合理利用用户自身的计算资源,提高系统效率。

通过总结上述工作,可以发现大多数研究仍然集中在无人机-用户两层架构上,且现有模型大多仍然采取二元任务卸载策略,未能有效降低系统时延。基于上述情况,本文研究了无人机辅助用户任务卸载任务到基站场景。利用了无人机

的机动性和空地链路干扰小的优点,将无人机作为中继,帮助用户解决由于距离较远、地面上障碍较多而导致的无法直接卸载到基站的问题。同时,用户、无人机、基站三者并行处理部分任务,可以有效降低处理任务的时延。

在该场景中,为了获得全局最小时延,提出了一种基于博弈论的最优任务卸载方法,同时优化了用户部分任务卸载比例和用户任务卸载策略这两个参数。由于这两个参数是互相耦合的,属于混合整数非线性规划(Mixed Integer Non-Linear Programming, MINLP)问题,因此将原优化问题转化为卸载比例和卸载策略两个子问题求解。在提出的算法中,首先证明了系统时延最小值存在的条件,得到确定策略下的最优卸载比例闭合解。然后,将原优化问题转化为最优任务分配问题,并基于博弈论方法得到了最佳用户卸载策略,最小化系统的总时延。最后,通过仿真分析,可以表明该算法有效地降低了用户任务卸载的全局时延,提高了网络时效性。

## 1 无人机中继辅助用户任务卸载系统模型

本文考虑了一个多无人机中继辅助地面多用户任务卸载的场景,系统模型如图1所示。此系统由 $K$ 个移动用户、 $M$ 架无人机和1台基站组成。当遇到用户距离基站较远或用户与基站间有阻碍的应急情况时,用户可选择将任务部分卸载给无人机,由无人机作为中继,间接转发给远端基站处理。假设无人机配备了一定的资源,但受到尺寸、重量和功率的限制,无法满足大量用户的计算需求。因此,系统中无人机仅负责转发任务到基站,利用基站较高的功率和充足的计算资源完成复杂任务,降低用户为完成大量任务而造成的计算时延。在该系统中,采用了时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)传输协议,以保证每个用户传输数据互不干扰。

考虑一个三维坐标系,假设用户 $k$ 的三维坐标为 $u_k = (x_k, y_k, 0)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , 而无人机 $m$ 的三维坐标为 $q_m = (x_m, y_m, h_m)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ 。用户、无人机和基站三者间的通信均为视距通信<sup>[13]</sup>, 则用户 $k$ 和无人机 $m$ , 无人机 $m$ 和基站间的信道增益分别表示为:

$$g_{k,m} = \frac{g_0}{h_m^2 + d_{k,m}^2} \quad (1)$$

$$g_m = \frac{g_0}{h_m^2 + d_m^2} \quad (2)$$



图 1 无人机中继辅助用户卸载系统图

Fig.1 The figure of users' task-offloading assisted with the UAV relay

其中,  $g_0$  为参考距离  $d=1$  m 时的信道增益,  $d_{k,m}$  和  $d_m$  分别表示用户  $k$  和无人机  $m$  之间的水平距离以及无人机  $m$  和基站之间的水平距离。根据香农公式, 用户  $k$  和无人机  $m$  的数据传输速率可以分别表示为

$$R_{k,m} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_k g_{k,m}}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

$$R_m = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_m g_m}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

其中,  $B$  为系统带宽,  $\sigma^2$  表示噪声功率,  $P_k$  和  $P_m$  为用户和无人机的信息发送功率。

每个用户的任务被建模为一个二元组,  $I_k$  表示用户  $k$  需要完成的任务数据大小,  $C_k$  则表示用户  $k$  完成该任务所需的 CPU 周期数。定义  $x_{k,m}$  表示用户  $k$  与无人机  $m$  之间的卸载策略,  $x_{k,m}=1$  表示用户  $k$  将任务部分卸载给无人机  $m$ , 相反则表示用户  $k$  没有选择无人机  $m$ 。

## 2 问题描述

整个通信过程可分为三部分, 地面用户将任务分割成两部分, 一部分由自身处理, 一部分选择转发给无人机, 再由无人机转发给基站处理, 避免了由于地面障碍较多以及用户距离基站较远而导致的传输问题。

在本地计算部分, 假设用户  $k$  的 CPU 计算频率为  $f_k$ 。用户首先分割任务, 定义  $\rho_{k,m} \in [0, 1]$  为用户  $k$  卸载给无人机  $m$  的任务比例, 则用户计算时延表示为

$$T_{k,m}^{\text{local}} = \frac{(1 - x_{k,m} \rho_{k,m}) C_k}{f_k} \quad (5)$$

用户  $k$  转发给无人机  $m$  过程所产生的时间延迟可表示为

$$T_{k,m}^{\text{UAV}} = \frac{x_{k,m} \rho_{k,m} I_k}{R_{k,m}} \quad (6)$$

无人机  $m$  转发任务到基站所产生的时延为

$$T_{k,m}^{\text{bs}} = \frac{x_{k,m} \rho_{k,m} I_k}{R_m} \quad (7)$$

综上, 总时延最小问题可表示为

$$\begin{aligned} \min_{\{x_{k,m}, \rho_{k,m}\}} & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \max \{ T_{k,m}^{\text{local}}, T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}} \} \\ \text{s.t.} & \quad 0 \leq \rho_{k,m} \leq 1 \\ & \quad 0 \leq \sum_{m=1}^M x_{k,m} \leq 1, \forall k \\ & \quad 0 \leq \sum_{k=1}^K x_{k,m} \leq K, \forall m \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, 第一个约束条件表示用户的任务卸载比例为  $[0, 1]$ ; 第二个约束条件表示每个用户最多被一个无人机服务; 第三个约束条件表示每个无人机可以服务多个用户。

## 3 基于无人机中继辅助的用户任务卸载方法

针对上面所述场景, 提出了一种基于无人机中继辅助的用户任务卸载方法。在该方法中, 首先通过数学方法确定最佳卸载比例的闭合解, 再采用博弈论获得用户-无人机-基站三层网络场景下的最佳用户卸载决策, 从而最小化系统的总时延。

### 3.1 最佳任务卸载比例的求解

在式(8)中, 需要优化的变量是任务卸载比例  $\rho_{k,m}$  与卸载决策  $x_{k,m}$ , 二者是相互耦合的, 因此需要分别求解。首先在特定的卸载决策下, 求解该决策下的每个用户的最佳卸载比例  $\rho_{k,m}^*$ , 然后利用博弈论方法获得全局时延最小的用户卸载决策合集。

引理 1 当且仅当  $T_{k,m}^{\text{local}} = T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}}$  时, 存在最小时延  $T_{k,m}^*$ , 且对应的卸载比例为

$$\rho_{k,m}^* = \frac{C_k}{C_k + I_k f_k / R_{k,m} + I_k f_k / R_m} \quad (9)$$

证明: 用户的计算时间分别为  $T_{k,m}^{\text{local}} > T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}}$ ,  $T_{k,m}^{\text{local}} < T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}}$  和  $T_{k,m}^{\text{local}} = T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}}$  三种情况。

情况 1: 当  $T_{k,m}^{\text{local}} > T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}}$ , 则  $T_{k,m}^* = T_{k,m}^{\text{local}}$ , 有  $(1 - \rho_{k,m}) C_k / f_k > \rho_{k,m} I_k / R_{k,m} + \rho_{k,m} I_k / R_m$ , 因此可得  $\rho_{k,m} < C_k / (C_k + I_k f_k / R_{k,m} + I_k f_k / R_m)$ 。

假设  $\varphi = C_k / (C_k + I_k f_k / R_{k,m} + I_k f_k / R_m)$ , 因此有  $\rho_{k,m} < \varphi$ , 可得  $T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}} > \varphi (I_k / R_{k,m} + I_k / R_m)$ 。

情况 2: 当  $T_{k,m}^{\text{local}} < T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}}$  时, 同情况 1, 可得  $\rho_{k,m} > \varphi$ , 因此  $T_{k,m}^{\text{local}} > (1 - \varphi) C_k / f_k$ 。

情况 3: 当  $T_{k,m}^{\text{local}} = T_{k,m}^{\text{UAV}} + T_{k,m}^{\text{bs}}$  时, 则  $\rho_{k,m} = \varphi$ 。此

时,可以分别得到本地计算时延  $T_{k,m}^{\text{local}}=(1-\varphi)C_k/f_k$  以及传输时延  $T_{k,m}^{\text{UAV}}+T_{k,m}^{\text{bs}}=\varphi(I_k/R_{k,m}+I_k/R_m)$ 。

综上所述,最优值  $T_{k,m}^*$  只存在于情况3中,即当  $T_{k,m}^{\text{local}}=T_{k,m}^{\text{UAV}}+T_{k,m}^{\text{bs}}$  时,用户任务卸载时间最小,且最佳卸载比例为  $\rho_{k,m}^*=C_k/(C_k+I_k f_k/R_{k,m}+I_k f_k/R_m)$ 。

### 3.2 最优任务卸载方案的求解

根据公式(9),此时优化问题(8)可以转化为

$$\begin{aligned} \min_{\{x_{k,m}\}} & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \frac{(1-\rho_{k,m}^* x_{k,m})C_k}{f_k} \\ \text{s.t.} & 0 \leq \sum_{m=1}^M x_{k,m} \leq 1, \forall k \\ & 0 \leq \sum_{k=1}^K x_{k,m} \leq K, \forall m \end{aligned} \quad (10)$$

目前,博弈论主要解决的问题是,大量移动用户在面对共有且有限的网络资源时,如何相互竞争和协调以获得稳定的资源分配方案来满足不同的系统指标<sup>[4]</sup>。而在确定了卸载比例的闭合解后,问题(10)就是一个资源分配问题,可以通过博弈论方法来解决。该博弈模型表示为

$$\Gamma=(N(a_k, a_{-k}), T_k(a_k, a_{-k})) \quad (11)$$

其中  $N$  代表所有的用户,  $(a_k, a_{-k})$  为用户  $k$  的策略集,  $a_k$  表示用户  $k$  的卸载策略集合,而  $a_{-k}=(a_1, \dots, a_{n-1}, a_{n+1}, \dots, a_K)$  表示除了用户  $k$  以外的其他用户的卸载策略。 $T_k(a_k, a_{-k})$  为用户  $k$  的时延函数,可表示为:

$$T_k(a_k, a_{-k}) = \sum_{m=1}^M \frac{(1-\rho_{k,m}^* x_{k,m})C_k}{f_k} \quad (12)$$

因此全局时延可表示为

$$T(a_k, a_{-k}) = \sum_{k=1}^K T_k(a_k, a_{-k}) \quad (13)$$

在所考虑的系统中,每个用户可以获得自身和其他用户的决策信息,且每个用户的策略集合有限,只采取有限次数的行动。在每次决策中,每个用户保持理性,寻求个人最优。因此该系统建立的是有限的完全信息非合作博弈模型,而该博弈模型存在纳什均衡<sup>[5]</sup>。

为了获得基于纳什均衡的最优全局卸载策略,采用算法1,步骤详细描述如下:

算法1 无人机中继辅助的用户任务卸载方法

① 初始化:系统各参数;令用户的初始卸载策略集为  $(a_k, a_{-k})$ ,给定初始策略为每一个用户选择离自身最近的无人机中继;策略集合  $D=\emptyset$ ;时延集合  $T=\emptyset$ ;竞争集  $C=\emptyset$

② for 每一次迭代  $\tau$

③ for 每一个用户  $k$

④ 基于初始卸载策略,根据式(9)计算卸载比例  $\rho_{k,m}$ ,根据(12)计算用户效用函数  $T_k(a_k, a_{-k})$ ,再根据(13)计算全局时延  $T(a_k, a_{-k})$

⑤ 改变卸载策略,计算基于新策略下的  $\rho_{k,m}$ ,  $T_k(a_k, a_{-k})$  以及  $T(a_k, a_{-k})$

⑥ if 存在新策略  $a'_k$ ,使得  $T(a'_k, a_{-k}) < T(a_k, a_{-k})$ , then

⑦ 将  $a'_k$  更新到  $D$ ,将基于  $a'_k$  的系统总时延  $T(a'_k, a_{-k})$  更新到  $T$ ,将所有请求更新的用户存入  $C$

⑧ end if

⑨ end for

⑩ While  $C(\tau) \neq \emptyset$

⑪ 比较  $C$  中基于各个请求更新用户策略下的全局时延  $T(a_k, a_{-k})$ ,每次迭代中只允许使得时延最小的用户更新策略,并保存到  $D$

⑫ end while

⑬ end for

⑭ 返回  $D$  和  $T(a_k, a_{-k})$

## 4 仿真结果与分析

本节使用 MATLAB 仿真软件验证所提出的任务卸载方法性能。在仿真中,设定无人机和用户均匀分布在  $2 \times 2$  km 的区域,基站位于原点。主要仿真参数<sup>[8,12,16]</sup>如表1所示。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
仿真参数	取值
网络带宽 $B$	1 MHz
用户 $k$ 的传输功率 $P_k$	0.1~0.2 W
无人机 $m$ 传输功率 $P_m$	0.5~1 W
无人机 $m$ 飞行高度 $h_m$	100 m
用户 $k$ 任务量 $I_k$	20~200 kB
用户 $k$ 任务 CPU 周期数 $C_k$	1 000~5 000 Mcycles/bits
用户 $k$ 计算频率 $f_k$	0.1~0.3 GHz
热噪声功率 $\sigma^2$	-100 dBm
参考距离 1 m 时信道增益 $g_0$	-50 dB

图2展示了所提卸载方案与穷举算法的计算对比结果。考虑到穷举算法计算量较大,故设置用户数和无人机服务器数分别为  $N=8, M=4$ 。由图可以发现,所提方案的全局最小计算时间结果与穷举方案的结果是一致的。由此表明,该方案可以为问题提供近似最优解。

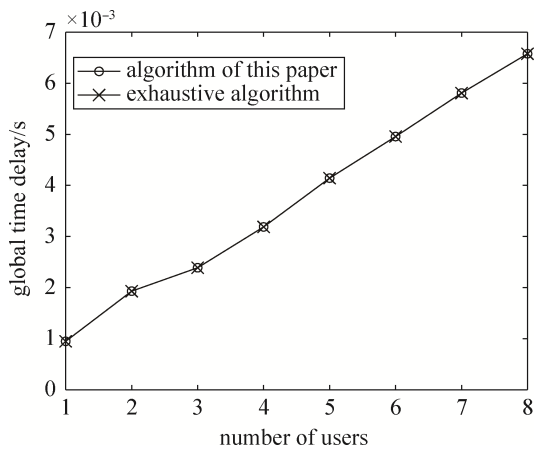


图2 本文算法与穷举算法的比较结果

Fig.2 The results of comparing the algorithm of this paper with the exhaustive algorithm

图3展示了所提卸载方案在不同用户数(N=30, 40,50)下的收敛速度, 设置无人机服务器数量为M=8。由图可知, 经过有限次的迭代后, 全局计算时间逐渐收敛。另外, 从三条曲线可以看出, 当N=30,40,50时, 达到平衡的迭代次数分别为11次、17次和20次。这说明参与卸载的用户设备越多, 需要的迭代次数越多。

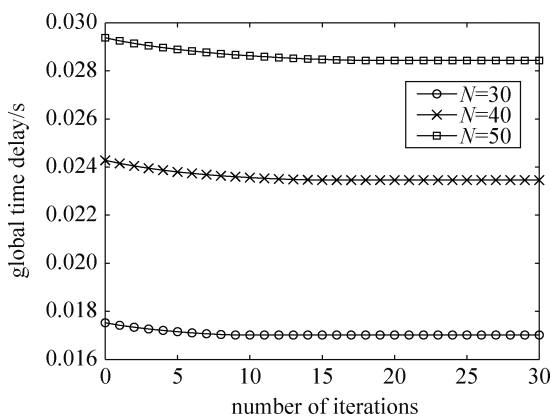


图3 不同用户数下的收敛情况

Fig.3 The convergence with different number of users

图4展示了所提方案与本地计算方案、全卸载计算方案的对比结果。为了保持一致性, 另外两种策略也采用了博弈论来获得最优决策。设置无人机服务器的数量M=10。如图, 在N=50时, 所提方案比全本地计算减少了325%的时延, 比全卸载计算减少了39%的时延, 这说明本方案可以有效减少全局时延。

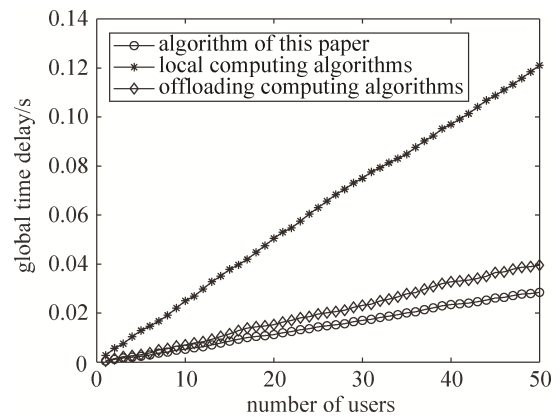


图4 本文算法与其他卸载方案的比较结果

Fig.4 The results of comparing the algorithm of this paper with other offloading schemes

图5展示了所提卸载方案与二元卸载方法的对比结果。在所提方案中, 用户可以选择将任务分为两部分并行处理, 一部分本地计算, 一部分发送给无人机, 再由无人机转交给基站处理。而二元卸载方案中, 用户任务只能全本地或全卸载处理。由图可知, 与二元卸载方案相比, 在N=8时, 所提方案的计算时延减少了61%。因此, 所提方案具有更好的系统时效性。

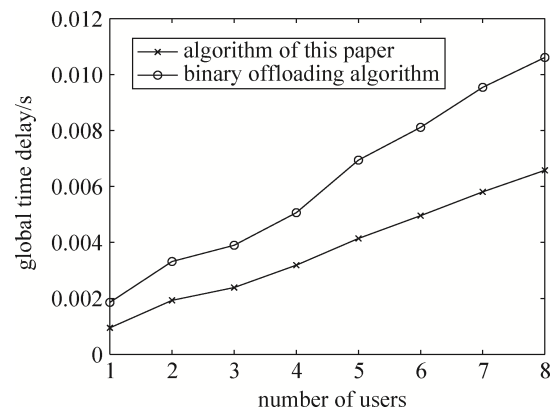


图5 本文算法与二元卸载方法的比较结果

Fig.5 The results of comparing the algorithm of this paper with binary offloading algorithm

### 5 结束语

由于传统MEC架构容易受到传播延迟的影响, 特别是在应急场景下, 不能有效地发挥作用。而基于无人机架构的MEC技术以其机动性的特点, 可以更加高效地为地面用户提供卸载服务。因此, 考虑一种无人机作为中继服务器辅助用户卸载任

务到远程基站的场景,并提出了一种基于博弈论的最优任务卸载方法来解决全局时延最小的问题。在所提算法中,得到并证明了最优卸载比例的闭合解,建立了有限的完全信息非合作博弈论模型并求解得到了最佳的卸载策略,获得了基于最小全局时间的任务卸载方案。在未来的工作中,将关注其他一些无人机 MEC 技术的适用场景,解决最优用户时间和能耗的加权等问题。

### 参考文献

- [1] 吴静,张凤,孙翊,等. 抗疫情助推我国数字化转型:机遇与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(3): 306-311.  
WU Jing, ZHANG Feng, SUN Yi, et al. Fighting the epidemic helps China digital transformation: Opportunities and challenges[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2020, 35(3): 306-311.
- [2] 崔滔. 边缘计算助力行业数字化转型[J]. 计算机与网络, 2021, 47(8): 35-37.  
CUI Tao. Edge computing facilitates the digital transformation of the industry[J]. Computer & Network, 2021, 47(8): 35-37.
- [3] 方加娟,李凯. 基于边缘云和移动辅助设备的计算卸载优化方案[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(12): 6-12.  
FANG Jiajuan, LI Kai. Optimal scheme of computation offloading based on edge cloud and mobile auxiliary equipment[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(12): 6-12.
- [4] 查易艺,袁焯,李金湖,等. 一种移动边缘云计算任务卸载算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(6): 135-141.  
ZHA Yiyi, YUAN Ye, LI Jinhui, et al. A task offloading algorithm in mobile edge cloud computing[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(6): 135-141.
- [5] 张捷,杨晨,刘学. 一种超视距组网无人机载通信系统设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 1-10.  
ZHANG Jie, YANG Chen, LIU Xue. A design of UAV-borne communication system of non-line-of-sight networking[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 1-10.
- [6] ZHU S, LIN G, CHEN J, et al. Cooperative computation offloading for UAVs: A joint radio and computing resource allocation approach[C]//2018 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE), San Francisco, CA, USA: IEEE, 2018: 74-79.
- [7] HUA M, HUANG Y, SUN Y, et al. Energy optimization for cellular-connected UAV mobile edge computing systems[C]//2018 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), Chengdu, China: IEEE, 2018: 1-6.
- [8] REN Y, XIE Z, DING Z, et al. Computation offloading game in multiple UAV-enabled mobile edge computing networks[J]. IET Communications, 2021, 15(10): 1392-1401.
- [9] GUO H, LIU J. UAV-enhanced intelligent offloading for internet of things at the edge[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(4): 2737-2746.
- [10] ALESNWI M, YAN K T, PANDEY S R, et al. UAV-assisted multi-access edge computing system: an energy-efficient resource management framework[C]//2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), Barcelona, Spain: IEEE, 2020: 214-219.
- [11] 姚维,黄俊. 移动边缘计算中的无人机群协同任务卸载策略研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(3): 507-514.  
YAO Wei, HUANG Jun. Research on UAVs collaborative task offloading strategy based on mobile edge computing[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2022, 34(3): 507-514.
- [12] YU Z, GONG Y, GONG S, et al. Joint task offloading and resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 3147-3159.
- [13] XU J, ZENG Y, ZHANG R. UAV-enabled wireless power transfer: trajectory design and energy optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(8): 5092-5106.
- [14] MOURA J, HUTCHISON D. Game theory for multi-access edge computing: Survey, use cases, and future trends[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 260-288.
- [15] NASH J F. Equilibrium points in N-Person games[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1950, 36(1): 48-49.
- [16] YANG L, YAO H, ZHANG X, et al. Multi-UAV deployment for MEC enhanced IoT networks[C]//2020 CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Chongqing, China: IEEE, 2020: 436-441.

### [作者简介]

杨紫薇 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为移动边缘计算。

解志斌 1981年生, 教授, 主要研究方向为通信信号处理和无线传感器网络。

陈磊 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络。

袁伟康 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信系统理论。

(本文编辑: 潘三英)