

# 多无人机辅助移动边缘计算中的轨迹优化

江雪<sup>1</sup>, 赵亮<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学物联网学院, 江苏南京 210003;

2. 杭州昊舜视讯科技有限公司, 浙江杭州 311100)

**摘要:**在无人机辅助移动边缘计算网络中,优化无人机的飞行轨迹可以显著提升无线网络的各项性能指标。该文主要以加权最小化无人机的飞行能耗和接收卸载任务的能耗为目标,考虑满足无人机自身的机械特性和多无人机之间飞行轨迹需满足碰撞避免的约束条件,协同优化多架无人机的飞行轨迹和无人机与地面设备之间的卸载决策参数。建立的基于能耗最小化的多无人机飞行轨迹的优化问题中,目标函数非线性,约束条件非凸。针对这些问题,通过引入辅助变量转化非凸的优化条件,并通过连续凸优化的方法转化非线性的优化问题求解。仿真结果表明,所提多无人机的轨迹优化算法,较好地优化了所有无人机的飞行轨迹,在保证所有地面设备任务卸载完成的前提下明显改善了无人机的能耗性能。

**关键词:**移动边缘计算;多无人机;加权能耗;轨迹优化;卸载决策参数

中图分类号:TP39;TN925

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2023)05-0110-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2023.05.017

## Trajectory Scheduling for Multi-UAV Assisted Mobile Edge Computing

JIANG Xue<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>2</sup>

(1. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Hangzhou Haoshun Vision Technology Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

**Abstract:** In the multi unmanned aerial vehicles (UAV) assisted mobile edge computing (MEC), optimizing the trajectory of the UAV is of great significance for improving the performance of wireless networks. In this paper, a weighted flight energy consumption and receiving offload task energy consumption minimization problem is formulated to optimize the trajectory scheduling of UAVs and offload decision parameters, where both the multi-UAV mechanical property and collision avoidance mechanism are considered. For the nonlinear optimization problem and non-convex constraint conditions, we develop auxiliary variables to relax the non-convex constraint conditions and the successional convex optimization method. Simulation results demonstrate that the proposed trajectory optimization algorithm for the multi-UAV can obtain excellent UAV trajectories while reducing the consumption energy of UAVs.

**Key words:** mobile edge computing; multi unmanned aerial vehicles; weighted energy consumption; trajectory scheduling; offload decision parameter

## 0 引言

随着信息相关技术的飞速发展,智能化的应用越来越普及,大量密集的计算任务使得移动终端的带电量 and 计算能力都无法满足人们日益增长的需求。移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)<sup>[1-2]</sup>应运而生,它通过将计算任务卸载到边缘服务器,可以有效地提高终端设备电池的使用寿命,降低整个网络的时延。另外一方面,无人机<sup>[3]</sup>(unmanned aerial vehicle, UAV)由于其灵活性高、机动性强、成本低、可靠性高、操作简单等优点,被广泛应用于边缘计算网络中。即使是在地理位置复杂的区域,无人机也可以实现高效快速的

部署,较好地解决应急通信的需要。目前关于无人机应用于移动边缘计算的研究主要集中在以下三个方面:一是无人机作为空中数据中继<sup>[4-6]</sup>,为远距离的用户提供可靠的无线连接。二是无人机作为飞行的无线接入点,用于物联网中用户设备的数据收集与分发<sup>[7]</sup>。三是无人机作为移动基站通信<sup>[8]</sup>,可以为蜂窝网络提供有效补充。不论是无人机的哪种应用,无人机的飞行轨迹都会直接影响边缘计算网络的能耗、时延和计算效率等关键性能,因此,无人机的轨迹问题研究是近几年学术界和工业界研究的热点。

目前无人机辅助移动边缘计算网络中针对无人机

收稿日期:2022-08-16

修回日期:2022-12-20

基金项目:国家自然科学基金(62001248);杭州昊舜科技有限公司合作项目(HV-20210610B,2021外256)

作者简介:江雪(1982-),女,讲师,博士研究生,通信作者,研究方向为干扰对齐、拓扑干扰管理、无人机辅助边缘计算网络资源优化。

飞行轨迹优化算法的研究大部分都集中在以能耗最小化为目标。文献[9]在满足用户服务需求的限制条件下,联合优化用户发送功率、计算卸载策略等设计基于能耗最小化的无人机轨迹优化算法。文献[10]在满足无人机飞行速度的限制条件下,通过最大最小化地面设备可收集能量,设计无人机的最优飞行轨迹。文献[11]考虑用户和无人机之间的上行和下行通信链路,在正交和非正交接入的两种模式下,以加权最小化无人机和设备的能耗为目标,联合设计计算资源分配策略和无人机最优轨迹。文献[12]通过强化学习和分簇的方法设计基于能耗最小化的无人机轨迹优化算法。文献[13]在满足用户服务需求的条件下,最大化能量效率,即最大化卸载总数据量比总能耗,联合优化无人机的飞行轨迹、用户的发送功率和计算卸载策略。文献[14]通过辛普森法和遗传算法求解基于能耗最小化的无人机轨迹优化算法。文献[15]通过加权方式最小化无人机能耗和地面设备能耗,优化资源分配策略和无人机飞行轨迹。文献[16]在满足设备服务质量要求和可用计算资源的条件下,联合优化任务卸载策略、资源分配策略以及无人机的飞行时间,提出基于无人机飞行能耗和计算能耗最小化的轨迹优化算法。上述大部分无人机辅助边缘计算网络的研究都是针对网络中只有一架无人机优化其轨迹路径提高网络整体性能,而实际的移动边缘计算网络中,情况复杂,许多情况下需要多架无人机协同<sup>[17-18]</sup>工作完成任务,提高工作效率和优化网络整体性能。基于此,该文主要以能耗最小化为目标,在满足无人机机械特性的条件下,同时考虑多架无人机之间需满足防撞撞的约束条件,协同优化多架无人机的飞行轨迹。

### 1 系统模型

考虑多架无人机辅助的移动边缘计算网络,网络中有  $K(k = 1, 2, \dots, K)$  架无人机为  $U(u = 1, 2, \dots, U)$  个地面设备提供服务,每个地面设备卸载部分任务给某架无人机,本地执行剩余任务。此外,每个地面设备只能卸载任务给某一架无人机,每架无人机可以接收多个地面设备的卸载任务,如图 1 所示。

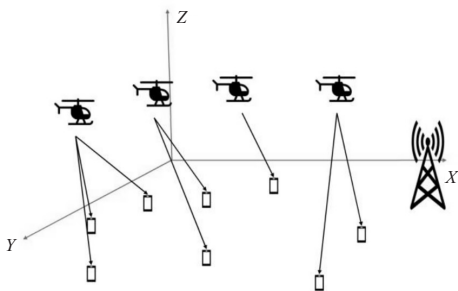


图 1 多无人机辅助移动边缘计算网络模型

每架无人机已知所有在水平地面设备的笛卡尔位置坐标。其中,第  $u$  个设备的位置可以表示为:

$$O_u = [x_u, y_u]^T, u = 1, 2, \dots, U \quad (1)$$

另外一方面,无人机在固定高度  $H$  的平面飞行,其飞行的时间周期为  $T_f$  秒,  $T_f$  秒被划分为  $T$  个等长时隙,其位置可以表示为:

$$c_k(t) = [x_k(t), y_k(t), H]^T, 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

该文主要考虑视距 (line of sight, LoS) 信道和非视距 (non-line-of-sight, NLoS) 信道<sup>[17]</sup>。在时隙  $t$ , 第  $k$  架 UAV 和第  $u$  个地面设备在 LoS 信道的连通概率可以表示为:

$$P_{ku}^{LoS}(t) = \frac{1}{1 + a(-b(\theta_k^u(t) - a))} \quad (3)$$

其中,  $a$  和  $b$  为取决于信道环境的常数。  $\theta_k^u(t) = \arctan(H/d_k^u(t))$ 。  $d_k^u(t)$  表示第  $k$  架无人机和第  $u$  个地面设备在时隙  $t$  的水平距离,可以表示为:

$$d_k^u(t) = \sqrt{\|x_k(t) - x_u\|^2 + \|y_k(t) - y_u\|^2} \quad (4)$$

进一步可得,在时隙  $t$ , 第  $k$  架无人机与第  $u$  个地面设备之间的路径损耗系数<sup>[17]</sup>为:

$$L(\theta_k^u(t), d_k^u(t)) = 20 \log_{10}(\sqrt{(d_k^u(t))^2 + H^2}) + A p_{ku}^{LoS}(t) + C \quad (5)$$

其中,  $A$  和  $C$  为常数,满足  $A = \eta_{LoS} - \eta_{NLoS}$ ,  $C = 20 \log_{10}(\frac{4\pi f_c}{c}) + \eta_{NLoS}$ 。  $f_c$  表示载波频率。  $c$  为光速。  $\eta_{LoS}$  和  $\eta_{NLoS}$  表示 LoS 链路和 NLoS 链路的连接损耗系数。

第  $k$  架无人机和第  $u$  个地面设备在时隙  $t$  的信道功率增益<sup>[17]</sup>可以表示为:

$$h_k^u(t) = 10^{-L(\theta_k^u(t), d_k^u(t))/10} \quad (6)$$

由于 LoS 链路的中断概率比 NLoS 链路高很多,在时隙  $t$ , 第  $u$  个地面设备向第  $k$  架无人机卸载任务时的数据率可以表示为:

$$R_k^u(t) = B_k^u(t) \log_2(1 + \frac{p_k^u(t) h_k^u(t)}{\sigma^2}) \quad (7)$$

其中,  $B_k^u(t)$  和  $p_k^u(t)$  分别表示在时隙  $t$ , 第  $k$  架无人机和第  $u$  个地面设备之间的带宽和第  $u$  个地面设备卸载任务给第  $k$  架无人机时的发送功率,  $\sigma^2$  表示噪声功率。

#### 1.1 通信模型

定义  $x_k^u(t)$  表示地面设备与无人机之间的卸载决策参数,如果在时隙  $t$  第  $u$  个地面设备卸载任务给第  $k$  架无人机,则满足  $x_k^u(t) = 1$ 。否则,  $x_k^u(t) = 0$ 。由图 1 可以看出,每个地面设备最多只能在某个时隙卸载任务给某架 UAV,但每架 UAV 可以接收一个或多个地面设备的卸载任务,因此可以得出卸载决策参数  $x_k^u(t)$  需满足如下条件:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K x_k^u(t) \leq 1 \quad (8)$$

根据文献[17]可得,第  $k$  架无人机接收第  $u$  个地面设备卸载任务  $l_k^u(t)$  需要的能耗可以表示为:

$$E_{k,u}^{\text{off}}(t) = \sum_{k=1}^K p_k^u(t) x_k^u(t) \frac{l_k^u(t)}{R_k^u(t)} \quad (9)$$

## 1.2 无人机模型

该文假设每架无人机在每个时隙的速度为恒定值  $v_k(t)$ ,无人机的速度受到最大速度  $V_{\max}$  的约束,需满足如下约束条件:

$$v_k(t) = \frac{\|c_k(t+1) - c_k(t)\|}{\delta} \leq V_{\max} \quad (10)$$

其中,  $\delta = T_f/T$  表示每个时隙的长度。

为了确保所有无人机可以为地面设备提供稳定可靠的服务,假设每架无人机飞行一个时间周期  $T_f$  后都需要回到最初的位置充电,即需要满足:

$$c_k(1) = c_k(T) \quad (11)$$

另外一方面,多架无人机在同一水平面飞行执行任务,每架无人机之间还需要保持一个最小安全飞行距离  $d_{\min}$  以避免发生碰撞,因此需满足:

$$\|c_i(t) - c_j(t)\| \geq d_{\min}, \forall i, j = 1, 2, \dots, K; i \neq j \quad (12)$$

无人机飞行需要消耗的能量主要与其重量和飞行距离有关。因此在每个时隙,无人机的飞行能耗<sup>[9]</sup>可以表示为:

$$E_k^{\text{fly}}(t) = Y \left( \frac{\|c_k(t+1) - c_k(t)\|}{T} \right) \quad (13)$$

其中,  $Y$  表示无人机的有效载荷。

## 2 优化问题建模

无人机辅助边缘计算网络中,无人机的能耗远大于地面设备的能耗,无人机的能耗<sup>[15]</sup>主要由以下几个部分组成:与地面设备之间通信的能耗、接收地面设备卸载任务的能耗、执行接收卸载任务的计算能耗和飞行能耗。其中,接收地面设备卸载任务的能耗和飞行能耗受到无人机飞行轨迹的影响最大,因此主要考虑接收卸载计算任务的能耗和飞行能耗。根据上述分析,可以建立如下优化问题:

$$\min_{\Omega} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left( \alpha \sum_{u=1}^U E_{k,u}^{\text{off}}(t) + \beta E_k^{\text{fly}}(t) \right) \quad (14)$$

$$\text{s. t. } x_k^u(t) \in \{0, 1\} \quad (a)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K x_k^u(t) \leq 1 \quad (b)$$

$$c_k(1) = c_k(T) \quad (c)$$

$$\frac{\|c_k(t+1) - c_k(t)\|}{\delta} \leq V_{\max} \quad (d)$$

$$\|c_i(t) - c_j(t)\| \geq d_{\min}, \forall i \neq j \quad (e)$$

其中,  $\Omega = \{x_k^u(t), c_k(t)\}$ 。 $\alpha$  和  $\beta$  是无人机接收卸载任务和飞行能耗的加权系数。通过加权系数,可以在相同范围内衡量不同部分的能耗。

优化问题(14)中的式(a)和(b)对应地面设备和无人机之间的卸载决策参数值的约束条件。(c)、(d)和(e)对应无人机飞行轨迹的约束条件。

## 3 优化问题求解

可以看出,由于优化问题(14)为非线性的优化问题,同时其对应的约束条件非凸,所以该优化问题很难求解。基于文献[9]中的交替最小化算法,将优化问题(14)拆分为2个子优化问题:(1)给定  $k$  架无人机飞行轨迹的条件下求解卸载决策参数的问题;(2)给定卸载决策参数的条件下求解多无人机的最优飞行轨迹的问题。

### 3.1 卸载决策参数求解

首先,给定  $k$  架无人机的飞行轨迹  $c_k(t)$ ,求解地面设备与无人机之间的卸载决策参数  $x_k^u(t)$  的最优解。优化问题(14)可以转化为:

$$\min_{x_k^u(t) \in \{0,1\}} \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K p_k^u(t) x_k^u(t) \frac{l_k^u(t)}{R_k^u(t)} \quad (15)$$

由于变量  $x_k^u(t)$  的取值为0或1,不易求解。基于文献[19],引入辅助变量  $0 \leq y_k^u(t) \leq 1$ ,满足如下条件:

$$x_k^u(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_k^u(t) \neq 0 \\ 0 & \text{if } y_k^u(t) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

优化问题(14)可以转化为如下等价形式:

$$\min_{y_k^u(t)} \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K p_k^u(t) y_k^u(t) \frac{l_k^u(t)}{R_k^u(t)} \quad (17)$$

另外一方面,约束条件(a)和(b)可以转化为:

$$0 \leq y_k^u(t) \leq 1 \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K y_k^u(t) \leq 1 \quad (19)$$

在满足约束条件(18)和(19)的情况下,通过求解转化后的优化问题(17)可以得到  $y_k^u(t)$  的最优解,进而通过(16)就可以求得  $x_k^u(t)$  的近似最优解。

### 3.2 多无人机飞行轨迹求解

接下来,根据上面求得的卸载决策参数  $x_k^u(t)$  的最优解,求解多无人机飞行轨迹  $c_k(t)$ ,优化问题(14)可以转化为:

$$\min_{c_k(t)} \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^U \left( Y \frac{\|c_k(t+1) - c_k(t)\|}{T} + \sum_{k=1}^K p_k^u(t) x_k^u(t) \frac{l_k^u(t)}{R_k^u(t)} \right) \quad (20)$$

求解  $K$  架无人机的最优飞行轨迹,对应的约束条

件为(c)、(d)和(e)。其中,约束条件(e)非凸,导致优化问题(20)无法求解,基于文献[20],采用连续凸优化(successive convex optimization, SCA)的方法转化约束条件(e),因此对于任意给定的 $(c_i(t))^n$ 和 $(c_j(t))^n$ 的一阶泰勒展开式<sup>[20]</sup>,有如下不等式成立:

$$\|c_i(t) - c_j(t)\|^2 \geq -\|(c_i(t))^n - (c_j(t))^n\|^2 + 2((c_i(t))^n - (c_j(t))^n)^T((c_i(t)) - (c_j(t))) \quad (21)$$

其中, $n$ 为迭代步数。

根据上述分析,约束条件(e)可以转化为:

$$(d_{\min})^2 \leq -\|(c_i(t))^n - (c_j(t))^n\|^2 + 2((c_i(t))^n - (c_j(t))^n)^T((c_i(t)) - (c_j(t))) \quad (22)$$

即:

$$((c_i(t))^n - (c_j(t))^n)^T((c_i(t)) - (c_j(t))) \geq (d_{\min})^2 + \|(c_i(t))^n - (c_j(t))^n\|^2 \quad (23)$$

另外一方面,为了简化求解过程,由优化问题(20)可以看,第 $k$ 架无人机在时隙 $t$ 的坐标位置只与它前一个时隙 $t-1$ 的位置有关,可以将优化问题(20)分解为 $T-1$ 个子优化问题求解,逐步求解 $\{c_1(1)\dots c_k(1)\}, \{c_1(2)\dots c_k(2)\}, \dots, \{c_1(T-1)\dots c_k(T-1)\}$ ,对应需求解的子优化问题如下:

$$\min_{c_k(t)} \sum_{u=1}^K \left( Y \frac{\|c_k(t+1) - c_k(t)\|}{T} + \sum_{u=1}^U p_k^u(t) x_k^u(t) \frac{l_k^u(t)}{R_k^u(t)} \right) \quad (24)$$

其中, $t=1,2,\dots,T-1$ 。

### 4 仿真结果及分析

在本节,通过MATLAB中的CVX来验算所提无人机轨迹优化算法的性能。考虑 $D \times D$ 的平面区域, $K$ 架无人机飞行在恒定的高度 $H=10$  m,其中 $U$ 个地面设备随机分布在区域内,并且所有无人机都已知所有地面设备的位置。实验中系统参数设置如表1所示。

表1 系统参数设置

参数	符号	取值
区域范围/m	$D$	80
无人机飞行周期/s	$T_f$	40
无人机飞行时隙数	$T$	10
无人机的有效载荷/kg	$Y$	6
噪声功率/dBm	$\sigma^2$	-50
载波频率/GHz	$f_c$	2.5
信道损耗参数	$\eta_{\text{LoS}}$ 和 $\eta_{\text{NLoS}}$	20 和 1
信道环境参数	$a$ 和 $b$	9.61 和 0.16

续表1

参数	符号	取值
能耗权重因子	$\alpha$ 和 $\beta$	1 和 2
无人机最大飞行速度/(m/s)	$V_{\max}$	4
无人机防碰撞距离/m	$d_{\min}$	1
设备的发送功率/mW	$p_u^k(t)$	[50,100]
设备卸载的数据量/Mbit	$l_k^u(t)$	[0.04,0.1]
带宽/MHz	$B_k^u(t)$	[0.5,1]

实验主要考虑 $K=2$ 和 $K=4$ 两种情况分析 UAV 的飞行轨迹。当 $K=2$ 时,2架 UAV 的起始位置分别为: $(0,0)$ 、 $(D,D)$ 。当 $K=4$ 时,4架 UAV 的起始位置分别为: $(0,0)$ 、 $(0,D)$ 、 $(D,D)$ 、 $(D,0)$ 。

图2和图3分别展示了在网络中分别有2架和4架无人机时,不同数量地面设备条件下的无人机的飞行轨迹。由图可以看出,随着地面设备数量的增大,分布在区域中的范围变广,无人机的飞行距离也会相应变远,尽量地靠近设备,接收并完成卸载的任务。

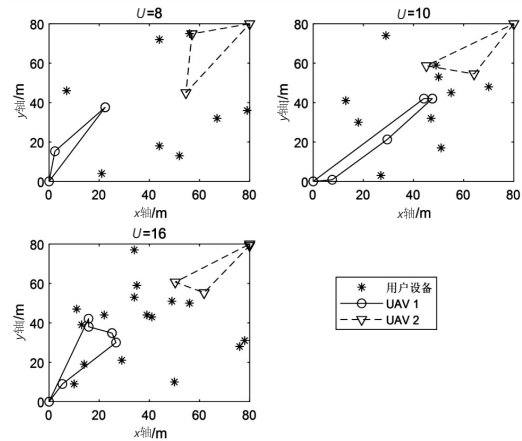


图2  $K=2$ 时,不同数量地面设备 $U=\{8,10,16\}$ 对应的飞行轨迹

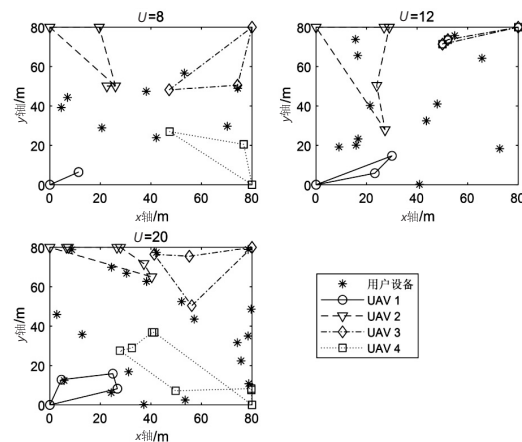


图3  $K=4$ 时,不同数量地面设备 $U=\{8,12,20\}$ 对应的飞行轨迹

图4和图5分别展示了在网络中有2架和4架无人机时,不同无人机最大飞行速度约束下的无人机的

飞行轨迹。由图可以看出,随着无人机最大飞行速度的上限值越来越大,无人机单步的可飞行距离越远,以便可以覆盖更广阔的区域。

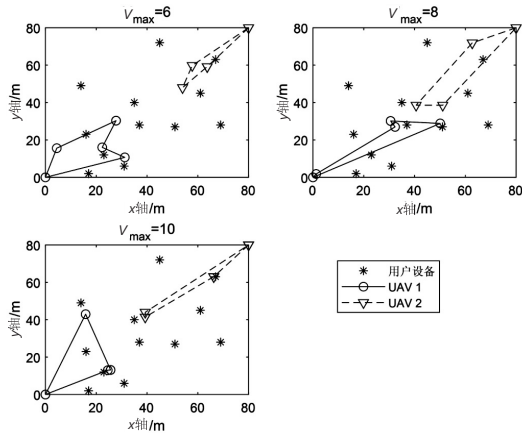


图 4  $K = 2$  时,不同无人机最大飞行速度  $V = \{6, 8, 10\}$  对应的飞行轨迹

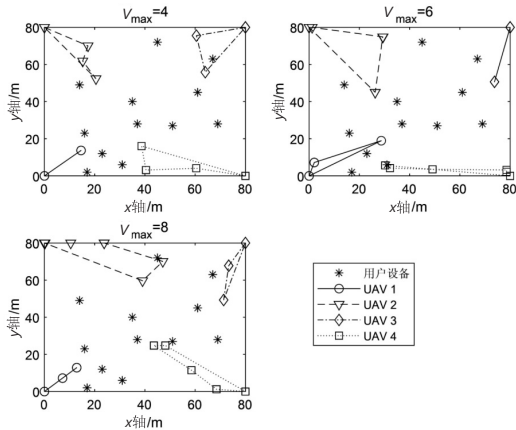


图 5  $K = 4$  时,不同无人机最大飞行速度  $V = \{4, 6, 8\}$  对应的飞行轨迹

图 6 和图 7 分别展示了在网络中有 2 架和 4 架无人机时,无人机在不同飞行时隙下的飞行轨迹。由图可以看出,随着无人机飞行时隙的增大,在总飞行周期时间固定的情况下,无人机的单步飞行距离在变短。

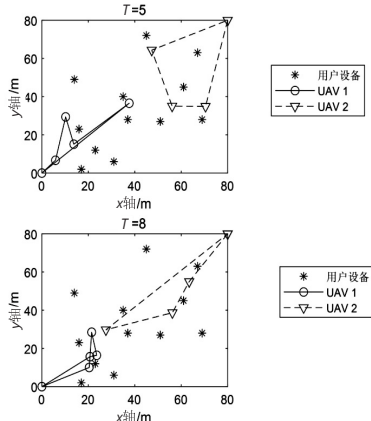


图 6  $K = 2$  时,不同无人机飞行时隙  $T = \{5, 8\}$  对应的飞行轨迹

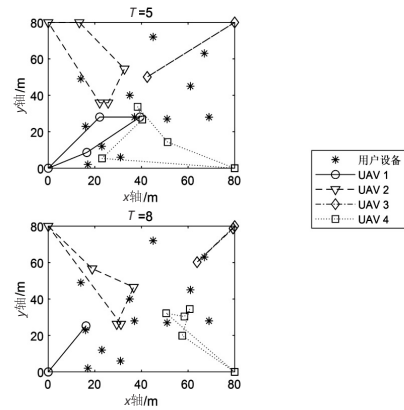


图 7  $K = 4$  时,不同无人机飞行时隙  $T = \{5, 8\}$  对应的飞行轨迹

图 8 和图 9 分别展示了在网络中有 2 架和 4 架无人机时,不同能耗权重因子条件下无人机的飞行轨迹。由图可以看出,卸载能耗的加权因子越大,无人机越接近地面设备的位置。飞行能耗的权重因子越大,无人机的单步步长越小,这是由于 UAV 的飞行能耗主要和无人机飞行距离有关,而 UAV 的卸载能耗主要和无人机与设备之间的距离有关。

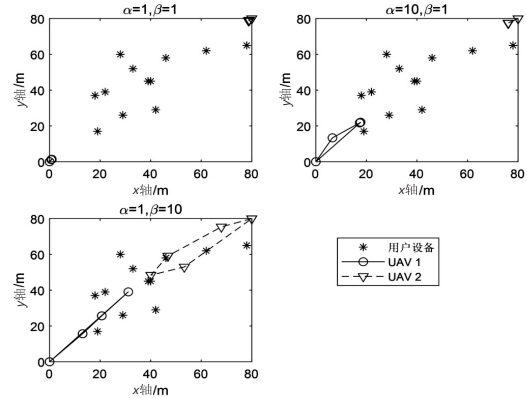


图 8  $K = 2$  时,不同能耗权重因子对应的飞行轨迹

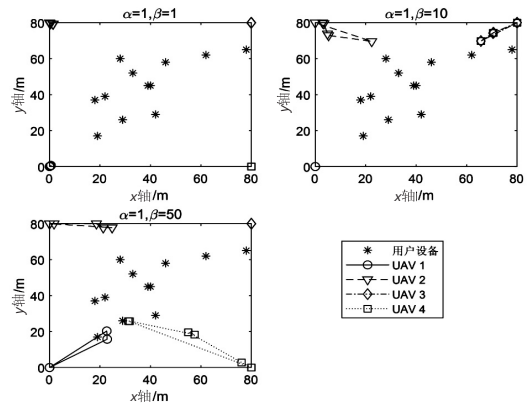


图 9  $K = 4$  时,不同能耗权重因子对应的飞行轨迹

图 10 分别展示了在网络中有 2 架和 4 架无人机时,在不同能量权重因子的条件下无人机的飞行能耗和卸载能耗的关系。由图可以看出,随着无人机飞行能耗权重增加,无人机对应的飞行能耗有所增加。随

着无人机卸载能耗的权重因子增加,无人机对应的卸载能耗有所增加。

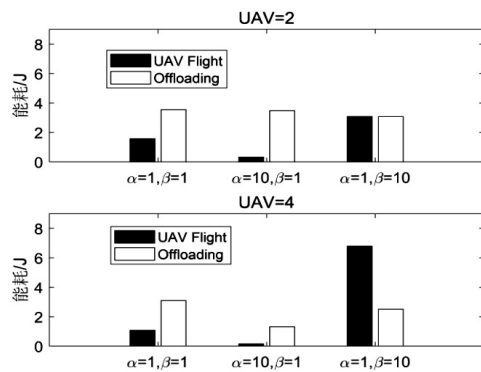


图10 不同权重因子对应的能耗关系

## 5 结束语

研究了多无人机辅助移动边缘计算系统,在满足无人机机械特性和多架无人机碰撞避免的条件下,以能耗最小化为目标,优化多无人机的飞行轨迹。为了解决非线性的优化问题和非凸的约束条件,引入辅助变量及转换优化问题为多个子优化问题求解。仿真结果验证了所提算法在得到多架无人机较优的飞行轨迹的同时,还明显改善了能耗。

### 参考文献:

- [1] ZHOU F H, HU R Q. Computation efficiency maximization in wireless-powered mobile edge computing networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(5):3170-3184.
- [2] ZHOU Y, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 57(5):20-27.
- [3] LI Peiming, XU Jie. Fundamental rate limits of UAV-enabled multiple access channel with trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(1):458-474.
- [4] 张广驰,陈 娇,崔 苗,等. 无人机交替中继通信及其轨迹优化和功率分配研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(12):3554-3562.
- [5] ONO F, OCHIAI H, MIURA R. A wireless relay network based on unmanned aircraft system with rate optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11):7699-7708.
- [6] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12):4983-4996.
- [7] ZENG Yong, XU Xiaoli, ZHANG Rui. Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4):2233-2246.
- [8] 郎 磊,王荆宁,王 一,等. 无人机辅助通信中基于用户轨迹的无线资源和航迹优化[J]. 通信学报, 2022, 43(3):225-232.
- [9] 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.
- [10] YUAN Xiaopeng, YANG Tianyu, HU Yulin, et al. Trajectory design for UAV-enabled multiuser wireless power transfer with nonlinear energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(2):1105-1121.
- [11] JI Jiequ, ZHU Kun, YI Changyan, et al. Energy consumption minimization in UAV-assisted mobile-edge computing systems: joint resource allocation and trajectory design[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(10):8570-8584.
- [12] ZHU Botao, BEDEER E, NGUYEN H H, et al. UAV trajectory planning in wireless sensor networks for energy consumption minimization by deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9):9540-9554.
- [13] LI Mushu, CHENG Nan, GAO Jie, et al. Energy-efficient UAV-assisted mobile edge computing: resource allocation and trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3):3424-3438.
- [14] INDU, SINGH R P, CHOUDHARY H R, et al. Trajectory design for UAV-to-ground communication with energy optimization using genetic algorithm for agriculture application[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(16):17548-17555.
- [15] 李 安,戴龙斌,余礼苏,等. 加权能耗最小化的无人机辅助移动边缘计算资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2022(11):3858-3865.
- [16] 崔高峰,徐媛媛,张尚宏,等. 基于最小能耗的多无人机无线网络数据安全数据卸载策略[J]. 通信学报, 2021, 42(5):51-62.
- [17] QIN Xintong, SONG Zhengyu, HAO Yuanyuan, et al. Joint resource allocation and trajectory optimization for multi-UAV-assisted multi-access mobile edge computing[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(7):1400-1404.
- [18] 嵇介曲,朱 琨,易畅言,等. 多无人机辅助移动边缘计算中的任务卸载和轨迹优化[J]. 物联网学报, 2021, 5(1):27-35.
- [19] WONG C Y, CHENG R S, LATAIEF K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10):1747-1758.
- [20] ZHANG Jiao, ZHOU Li, ZHOU Fuhui, et al. Computation-efficient offloading and trajectory scheduling for multi-UAV assisted mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2):2114-2125.