

# 基于MIMO的多无人机辅助移动边缘计算系统时延优化设计

邹映琨 王钢\* 王金龙 刘浩洋

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 物联网数据的快速增长和物联网设备的计算限制催生了移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)解决方案。其中,无人机群的高机动性、易部署以及成本低的特点和多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术能够增强边缘计算网络的传输容量,缩短边缘计算网络的传输时延。该文在基于多无人机的多用户MIMO-MEC系统中通过联合优化无人机轨迹、地面用户卸载比、辅助无人机卸载比和辅助无人机数据分发比最小化整个周期的系统最大总时延。采用了连续凸优化技术和块坐标下降方法来解决其中的非凸问题。仿真结果讨论了影响系统时延的因素,并验证了算法的有效性及其收敛性。

**关键词:** 无人机通信; 移动边缘计算; 多输入多输出; 轨迹优化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)03-0881-09

DOI: 10.11999/JEIT211360

## Delay Optimization Design for Multi-UAVs Mobile Edge Computing Systems Based on MIMO

ZOU Yikun WANG Gang WANG Jinlong LIU Haoyang

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The rapid growth of data and the computing limitations of devices have spawned Mobile Edge Computing (MEC) solutions in Internet of Things. Among them, the high maneuverability, easy deployment and low cost of the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm and Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology can enhance the transmission capacity and shorten the transmission delay in the MEC network. In this paper, the maximum total delay of the system are minimized by jointly optimizing the UAV trajectory, ground users'ratio of data offloaded, assisted UAV's ratio of data offloaded and assisted UAV'sratio of data allocation in the multi-UAVs MIMO-MEC system, in which successive convex optimization technology and block coordinate descent method are used to solve the non-convex problem. The factors affecting the system delay are discussed, and the effectiveness and convergence of the algorithm is verified in the simulation results.

**Key words:** UAV communication; Mobile Edge Computing (MEC); MIMO; Trajectory optimization

### 1 引言

近年来无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)凭借其强大的机动性、较高的灵活性以及较低的采购和维护成本逐渐成为商业应用的实用选择<sup>[1,2]</sup>。其中,单个或多个无人机经常作为通信中继器或空中基站用于紧急情况下的网络供应、公共安全通信和辅助蜂窝网络通信<sup>[3-5]</sup>。固定部署的基础设施无法满足资源需求过载和高动态性的要求,无人机通过合理的轨迹设计能够有效缩减通信距离、规避障

碍物,提升通信质量、减少基础设施成本<sup>[6]</sup>。同时在移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)网络中,通过将计算任务卸载给物联网设备附近部署的计算资源(即在无线接入点或基站部署移动边缘计算服务器)能够有效地减少延迟并节省物联网设备上的计算资源<sup>[7,8]</sup>。

目前,涉及无人机辅助蜂窝网络的移动边缘计算延迟的优化研究包括:文献<sup>[9]</sup>通过优化卸载率、用户调度和无人机轨迹,最小化用户间最大延迟总和。文献<sup>[10]</sup>研究了UAV-MEC系统中的联合任务卸载与资源分配问题,其中UAV为无法连接基站的移动用户提供计算服务并连接到边缘云进行计算,旨在满足移动用户的计算和通信需求以及所有移动的总服务延迟的情况下最小化UAV的总能耗。文献<sup>[11]</sup>研究了一种支持UAV的边缘云系统,其中

收稿日期: 2021-11-30; 改回日期: 2022-02-25; 网络出版: 2022-03-01

\*通信作者: 王钢 gwang51@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62071146, 62071147)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62071146, 62071147)

边缘云系统为每个地面终端实现了虚拟化网络功能,即移动克隆(Mobile Clone, MC)以帮助执行其卸载的任务,旨在联合优化资源配置和无人机在3维空间中的轨迹,以最小化无人机的整体能耗。文献[12]提出了利用UAV作为计算节点和中继节点来改善UAV-MEC网络中的平均用户时延,并以最小化所有UE的平均时延为目标来描述UAV-MEC问题。值得注意的是,UAV作为中继可以将用户数据传输给远端的宏基站进行处理。

上述文献中地面用户与无人机均配备单天线,大多采用时分多址方案在每一个时隙内服务一个用户。单输入单输出不仅带来了调度问题,同时限制了系统容量。在无人机通信中,无人机的收发消耗能量远远小于飞行消耗能量,这意味着单输入单输出严重限制了通信效率,减小了通信能量的利用率。同时研究者为提升网络指标,UAV需要借助外部资源加速UAV-MEC系统的计算过程,如作为中继将用户上传数据传输给宏基站或者边缘云。但现实情况中,系统数据的传输时间相较于计算时间可能更大,宏基站或者边缘云对于无人机的距离相对较远,会产生较大延迟,同时消耗更多能量。同时,无人机群在数量以及覆盖范围上的优势,决定了无人机群在MEC系统中拥有强大优势。一方面,机群中多个无人机的计算资源总和有一定规模,无人机间的相互协作能够有效利用无人机群的闲置资源;另一方面,机群中无人机的距离相对较近,且为视距(Line Of Sight, LOS)信道,能够有效缩短数据传输时间,增强通信传输质量,降低无人机能耗。在本文中,我们提出了一种基于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)的多用户多无人机移动边缘计算系统。主要贡献概述如下:

(1)构建地面用户-辅助无人机-临近无人机的两层通信架构,减少数据传输时间,提高通信传输质量。

(2)用户信道模型采用莱斯信道,辅助无人机通过迫零检测解码用户信息,并采用迫零(Zero-Forcing, ZF)波束赋形和块对角化方案消除临近无人机干扰。

(3)基于两层通信结构,提出最小化系统最大总时延问题,包括地面用户到临近无人机的多条链路。

(4)考虑一个联合无人机轨迹、地面用户卸载比、辅助无人机卸载比和辅助无人机数据分发比的迭代优化算法,并采用连续凸优化技术和块坐标下降技术来解决其中的非凸问题。

本文的其余部分安排如下。第2节展示了系统模型。3.1节和3.2节基于MIMO的联合无人机轨迹、地面用户卸载比、辅助无人机卸载比和辅助无人机数据分发比的优化算法被提出。3.3节分析了算法的收敛性。第4节详细说明了仿真分析。第5节对全文进行了总结。

注意:对于一个矩阵 $\mathbf{A}$ , $\mathbf{A}^H$ 代表其共轭转置。 $\mathbf{I}_d$ 表示 $d \times d$ 单位阵。 $\mathbb{E}(\cdot)$ 代表统计期望。 $\mathcal{C}^{a \times b}$ 代表 $a \times b$ 复数矩阵的空间。 $\mathcal{N}(a, b)$ 表示均值 $a$ 和方差 $b$ 的高斯分布。 $\|\mathbf{A}\|_F$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的F范数。

## 2 系统模型

如图1所示,本文考虑了无人机辅助多地面用户的边缘计算过程。 $K$ 个装备单天线的用户上传数据后,装配有 $M$ 个天线的辅助无人机保留一部分计算任务的同时向附近 $J$ 个资源闲置的装配多天线的无人机传输剩余任务。注意:若将一个辅助无人机与其服务的多个地面用户组成一个单元,那么临近无人机实际上是周边相邻单元的辅助无人机。该系统设计能够扩展成为地面用户群和空中无人机群的数据交互过程。地面用户采用单天线设计有两点考虑:(1)本文旨在讨论双层通信架构对边缘计算系统性能提升的可行性。(2)在物联网地面传感器网络的边缘计算等场景中同样存在单天线场景。为消除接收端天线间的干扰,该系统在辅助无人机和临近无人机间采用了块对角化方法和迫零波束赋形技术,同时在地面用户和辅助无人机间的辅助无人机接收端采用迫零检测。假设无人机在用户周期 $T > 0$ 内使用相同带宽的不同频带进行通信。根据MIMO理论,系统的容量和 $\min(K, M)$ 成正比,因此为了方便讨论,本文假设 $K \leq M = J$ 。

### 2.1 无人机轨迹模型

本文采用3D笛卡儿坐标系,其中第 $k$ 个用户的位置可以表示为 $\mathbf{u}_k = [x_k, y_k, z_k]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 。为了便于分析,飞行过程被离散化。假设无人机的最大飞

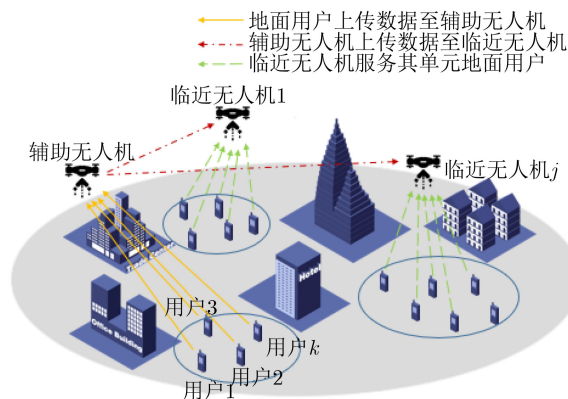


图1 系统模型

行速度为 $V_{\max}$ ，周期 $T$ 分为 $N$ 个时隙。离散化后辅助无人机和临近无人机 $j$ 在时刻 $n$ 的位置为 $\mathbf{q}(n) = [x(n), y(n), z(n)]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  和 $\mathbf{q}_j(n) = [x_j(n), y_j(n), z_j(n)]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 。在周期 $T$ 内无人机位置应满足以下条件

$$\|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\|^2 \leq \left(\frac{V_{\max}T}{N}\right)^2, \forall n \quad (1)$$

$$\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}_j[n]\|^2 \geq (d_{\min})^2, \forall n \quad (2)$$

其中， $d_{\min}$ 表示辅助无人机与临近无人机间的最小安全距离。同时，假定辅助无人机和临近无人机的飞行高度均固定。

## 2.2 通信模型

该系统通信模型分为2层结构，以辅助无人机—临近无人机的通信建模为例。辅助无人机装备的接收天线个数为 $M > 1$ ，用户 $k, k = 1, 2, \dots, K$ 的等效发射天线个数为 $K > 1$ ，装配有接收天线个数为 $I > 1$ 的临近无人机 $j, j = 1, 2, \dots, J$ 的等效发射天线个数为 $W = I \times J > 1$ 。我们假设采用线性波束赋形对临近无人机发射信息<sup>[13]</sup>。假设 $e_w \in \mathcal{CN}(0, 1)$ 表示传输给临近无人机 $j$ 第 $i$ 个天线的的数据符号( $w = j \times i$ )，无人机发射的数据矢量被表示为 $\mathbf{e} = [e_1, \dots, e_w, \dots, e_W]^H \in \mathcal{C}^{W \times 1}$ ，且 $\mathbb{E}[\mathbf{e}\mathbf{e}^H] = \mathbf{I}_W$ 。 $\mathbf{v}_w \in \mathcal{C}^{W \times 1}$ 表示临近无人机 $j$ 第 $i$ 个天线的传输波束赋形矢量。因此，第 $n$ 个时隙发射端的复基带传输信号被表述为

$$\mathbf{x}[n] = \sum_{w=1}^W \mathbf{v}_w[n] e_w[n], \forall n \quad (3)$$

本文假设辅助无人机—临近无人机信道采取LOS视距信道。 $\mathbf{H}_w \in \mathcal{C}^{W \times 1}$ 表示辅助无人机与临近无人机间的第 $w$ 个子信道的信道衰落矢量

$$\mathbf{H}_w = \sqrt{\frac{K_R}{1 + K_R}} \mathbf{H}_w^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{K_R}{1 + K_R}} \mathbf{H}_w^{\text{NLoS}} \quad (4)$$

其中， $\mathbf{H}_w^{\text{LoS}} \in \mathcal{C}^{W \times 1}$ 和 $\mathbf{H}_w^{\text{NLoS}} \in \mathcal{C}^{W \times 1}$ 分别表示LOS确定性分量和瑞利衰落分量， $K_R$ 表示莱斯因子。 $\mathbf{G}_w \in \mathcal{C}^{W \times 1}$ 表示辅助无人机与临近无人机间的第 $w$ 个子信道的信道增益矢量，信道增益矩阵被表示为 $\mathbf{G}_{\text{UAV}} = [\mathbf{G}_1^H, \mathbf{G}_2^H, \dots, \mathbf{G}_W^H]^H \in \mathcal{C}^{W \times W}$ 。因此第 $n$ 个时隙，辅助无人机与临近无人机 $j$ 第 $i$ 个天线的信道增益矢量以及该天线处的接收信号表示为

$$\mathbf{G}_w[n] = \sqrt{\frac{\rho_0}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}_j[n]\|^2}} \mathbf{H}_w^{\text{LoS}}, \forall n \quad (5)$$

$$y_w[n] = \mathbf{G}_w[n] \sum_{w=1}^W \mathbf{v}_w[n] e_w[n] + n_w[n], \forall n \quad (6)$$

其中， $\rho_0$ 表示参考距离 $d_0 = 1$  m处的信道功率， $n_w[n] \in \mathcal{CN}(0, \sigma_w^2)$ 表示第 $n$ 个时隙临近无人机 $j$ 第 $i$ 个天线处的天线噪声。在第 $n$ 个时隙，辅助无人机—临近无人机的第 $w$ 条子信道接收端的信干噪比及可达速率为

$$\gamma_w[n] = \frac{|\mathbf{G}_w[n] \mathbf{v}_w[n]|^2}{\sum_{d \neq w} |\mathbf{G}_d[n] \mathbf{v}_d[n]|^2 + \sigma_w^2} \quad (7)$$

$$R_{\text{near},w}[n] = B_{\text{UAV},w} \log_2(1 + \gamma_w[n]) \quad (8)$$

其中， $\sigma_w^2$ 是接收天线处加性高斯白噪声的功率， $B_{\text{UAV},w}$ 为第 $w$ 条子信道的带宽。地面用户—辅助无人机通信建模过程类似，下面阐述其不同之处：(1)地面用户—辅助无人机信道模型采用莱斯信道。(2)在辅助无人机接收端将每个用户的自由空间衰减系数和发射数据符号看作期望信号，采用迫零检测消除干扰产生 $K$ 个子信道(值得注意的是，迫零检测在消除干扰的同时会使得第 $k$ 个子信道的接收端噪声 $\sigma_k^2$ 变为 $\sigma_k^2/\lambda_k^2$ ， $\lambda_k^2$ 表示第 $k$ 个子信道的信道衰落矢量 $\mathbf{H}_k$ 的奇异值)<sup>[14]</sup>。在第 $n$ 个时隙，地面用户—辅助无人机间第 $k$ 条子信道的可达速率为

$$R_k[n] = B_{\text{user},k} \log_2(1 + \gamma_k[n]) \quad (9)$$

其中， $\gamma_k[n]$ 表示时隙 $n$ 第 $k$ 条子信道的信干噪比(参考式(7))， $B_{\text{user},k}$ 为第 $k$ 条子信道的带宽。

## 2.3 计算模型

在第 $n$ 个时隙内，假设 $D_k[n]$ 为第 $k$ 个用户的总计算量(单位为bit)， $l_k[n]$ 表示第 $k$ 个用户的卸载比。因此，第 $k$ 个用户的本地数据量为 $D_k[n] \cdot l_k[n]$ ，上传辅助无人机计算的数据量为 $D_k[n] \cdot (1 - l_k[n])$ 。假设 $c_k$ 为第 $k$ 个用户计算1bit数据所需的CPU周期数(单位cycle)， $f_{\text{user},k}$ 为第 $k$ 个用户的最大计算容量(单位cycle/s)， $a_k$ 表示第 $k$ 个用户芯片结构的有效电容系数。同理，假设 $m_1[n]$ 为辅助无人机的数据卸载比， $c_{\text{UAV}}$ 和 $c_{\text{near},j}$ 分别为辅助无人机和临近无人机 $j$ 计算1bit数据所需的CPU周期数(单位cycle)， $f_{\text{UAV}}$ 和 $f_{\text{near},j}$ 分别为辅助无人机和临近无人机 $j$ 的最大计算容量(单位为cycle/s)， $a_{\text{UAV}}$ 和 $a_{\text{near},j}$ 分别表示辅助无人机和临近无人机 $j$ 芯片结构的有效电容系数。同时，引入变量 $\mathbf{b} = \{0 \leq b_j[n] \leq 1, \sum_{j=1}^J b_j[n] = 1, \forall j, n\}$ 表示分配给临近无人机的数据比例。因此，在第 $n$ 个时隙内，用户—辅助无人机最大信息传输时间、用户 $k$ 本地计算时间和辅助无人机计算时间<sup>[9,10]</sup>分别为

$$T_{\text{user}}^{\text{trans}}[n] = \max \left\{ \frac{D_1[n] l_1[n]}{R_1[n]}, \dots, \frac{D_K[n] l_K[n]}{R_K[n]} \right\} \quad (10)$$

$$T_{\text{user},k}^{\text{comp}}[n] = \frac{D_k[n](1-l_k[n])c_k}{f_{\text{user},k}} \quad (11)$$

$$T_{\text{UAV}}^{\text{comp}}[n] = \frac{\sum_{k=1}^K D_k[n]l_k[n](1-m_1[n])c_{\text{UAV}}}{f_{\text{UAV}}} \quad (12)$$

因此, 用户最大本地计算时间为  $T_{\text{user}}^{\text{comp}}[n] = \max\{T_{\text{user},1}^{\text{comp}}[n], T_{\text{user},2}^{\text{comp}}[n], \dots, T_{\text{user},K}^{\text{comp}}[n]\}$ 。同理, 在第  $n$  个时隙内, 临近无人机与辅助无人机间的最大信息传输时间和临近无人机  $j$  的计算时间分别为

$$T_{\text{UAV}}^{\text{trans}}[n] = \max \left\{ \frac{\sum_{k=1}^K D_k[n]l_k[n]m_1[n]b_1[n]}{R_{\text{near},1}[n]}, \dots, \frac{\sum_{k=1}^K D_k[n]l_k[n]m_1[n]b_j[n]}{R_{\text{near},W}[n]} \right\} \quad (13)$$

$$T_{\text{near},j}^{\text{comp}}[n] = \frac{\sum_{k=1}^K D_k[n]l_k[n]}{f_{\text{near},j}} \cdot m_1[n]b_j[n]c_{\text{near},j} \quad (14)$$

因此, 临近无人机群的最大计算时间被表示为  $T_{\text{near}}^{\text{comp}}[n] = \max\{T_{\text{near},1}^{\text{comp}}[n], T_{\text{near},2}^{\text{comp}}[n], \dots, T_{\text{near},J}^{\text{comp}}[n]\}$ 。在周期  $T$  内, 用户  $k$  的本地计算消耗能量和传输数据消耗能量<sup>[11,12]</sup>分别为

$$E_{\text{user},k}^{\text{comp}} = a_k f_{\text{user},k}^2 \sum_{n=1}^N D_k[n](1-l_k[n])c_k \quad (15)$$

$$E_{\text{user},k}^{\text{trans}} = \sum_{n=1}^N \frac{D_k[n]l_k[n]p_k[n]}{R_k[n]} \quad (16)$$

在周期  $T$  内, 辅助无人机的本地计算消耗能量、传输数据消耗能量和飞行消耗能量<sup>[6]</sup>分别为

$$E_{\text{UAV}}^{\text{comp}} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K D_k[n]l_k[n](1-m_1[n]) \cdot a_{\text{UAV}} f_{\text{UAV}}^2 c_{\text{UAV}} \quad (17)$$

$$E_{\text{UAV}}^{\text{trans}} = \sum_{w=1}^W \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{D_k[n]l_k[n]m_1[n]}{R_{\text{near},w}[n]} \cdot b_j[n] |G_w[n]v_w[n]|^2 \quad (18)$$

$$E_{\text{UAV}}^{\text{fly}} = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{M_{\text{UAV}}N}{2T} \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\|^2 \quad (19)$$

其中,  $M_{\text{UAV}}$  表示无人机质量(包括其有效载荷)。周期  $T$  内, 临近无人机  $j$  的本地计算消耗能量为

$$E_{\text{near},j}^{\text{comp}} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K D_k[n]l_k[n]m_1[n]b_j[n] \cdot a_{\text{near},j} f_{\text{near},j}^2 c_{\text{near},j} \quad (20)$$

通过观察, 系统时延由3方面决定: (1)地面用户的本地计算时间  $T_{\text{user}}^{\text{comp}}[n]$ ; (2)地面用户的数据传输时间  $T_{\text{user}}^{\text{trans}}[n]$ +辅助无人机的计算时间  $T_{\text{UAV}}^{\text{comp}}[n]$ ; (3)地面用户数据传输时间  $T_{\text{UAV}}^{\text{trans}}[n]$ +辅助无人机数据传输时间  $T_{\text{UAV}}^{\text{trans}}[n]$ +临近无人机的计算时间  $T_{\text{near}}^{\text{comp}}[n]$ 。由于计算结果数据量很小, 本文不考虑计算结果返回地面用户的过程。因此, 周期  $T$  内系统最大时延被表示为

$$T_{\text{total}} = \sum_{n=1}^N \max\{T_{\text{user}}^{\text{comp}}[n], T_{\text{user}}^{\text{trans}}[n] + \max\{T_{\text{UAV}}^{\text{comp}}[n], T_{\text{UAV}}^{\text{trans}}[n] + T_{\text{near}}^{\text{comp}}[n]\}\} \quad (21)$$

为简化收发器的设计, 我们考虑最常见的波束赋形方案-迫零过程。辅助无人机轨迹、用户卸载比、辅助无人机卸载比和临近无人机任务分配系数分别为  $\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}[n], \forall n\}$ ,  $\mathbf{L} = \{l_k[n], \forall k, n\}$ ,  $\mathbf{M} = \{m_1[n], \forall k, n\}$ ,  $\mathbf{b} = \{b_j[n], \forall j, n\}$ 。假设地面用户和临近无人机的位置已知的条件下, 本文的目标是通过联合优化UAV轨迹、用户卸载比、辅助无人机卸载比和临近无人机任务分配系数最小化整个周期  $T$  内系统最大总时延。优化问题表示为

$$\min_{\mathbf{Q}, \mathbf{L}, \mathbf{M}, \mathbf{b}} T_{\text{total}} \quad (22a)$$

$$\text{s.t.} \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\|^2 \leq \left(\frac{V_{\text{max}}T}{N}\right)^2, \forall n \quad (22b)$$

$$\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}_j[n]\|^2 \geq (d_{\text{min}})^2, \forall n \quad (22c)$$

$$0 \leq l_k[n] \leq 1, \forall k, n \quad (22d)$$

$$0 \leq m_1[n] \leq 1, \forall n \quad (22e)$$

$$0 \leq b_j[n] \leq 1, \forall j \quad (22f)$$

$$\sum_j b_j[n] \leq 1 \quad (22g)$$

$$\sum_{k=1}^K D_k[n]l_k[n]m_1[n]b_j[n] \leq D_j, \forall j \quad (22h)$$

$$E_{\text{user},k}^{\text{comp}} + E_{\text{user},k}^{\text{trans}} \leq E_1, \forall k \quad (22i)$$

$$E_{\text{UAV}}^{\text{comp}} + E_{\text{UAV}}^{\text{trans}} + E_{\text{UAV}}^{\text{fly}} \leq E_2 \quad (22j)$$

$$E_{\text{near},j}^{\text{comp}} \leq E_3, \forall j \quad (22k)$$

式(22b), 式(22c)分别对应无人机最大飞行速度约束和飞行轨迹约束。式(22d)—式(22g)表示用户卸载比、辅助无人机卸载比和临近无人机任务分

配比约束。式(22h)一式(22k)分别表示临近无人机计算约束、地面用户、辅助无人机和临近无人机能量约束。问题式(22)由非凸的目标函数构成，因此很难被直接解决。

### 3 联合优化算法

首先利用迫零波束赋形引起的约束 $\widetilde{\mathbf{H}}_w^H[n]\mathbf{v}_w[n] = 0$ ,  $\forall w, n$ 简化问题。其中,  $\widetilde{\mathbf{H}}_w^H[n] \triangleq [\mathbf{H}_1[n], \dots, \mathbf{H}_{w-1}[n], \mathbf{H}_{w+1}[n], \dots, \mathbf{H}_W[n]]$ ,  $\forall w, n$ 。根据块对角化方法, 针对第 $n$ 个时隙的临近无人机 $j$ 第 $i$ 个天线, 有如下定义

$$\widetilde{\mathbf{v}}_w[n] \triangleq \frac{\mathbf{U}_w[n] \mathbf{U}_w^H[n] \mathbf{H}_w[n]}{\|\mathbf{U}_w[n] \mathbf{U}_w^H[n] \mathbf{H}_w[n]\|} \quad (23)$$

$$g_w[n] \triangleq |\mathbf{H}_w^H[n] \widetilde{\mathbf{v}}_w[n]|^2 \quad (24)$$

其中,  $\mathbf{U}_w[n]$ 表示 $\widetilde{\mathbf{H}}_w^H[n]$ 的零空间的规范正交基。定义在第 $n$ 个时隙, 第 $w$ 条子信道的对应发射功率为 $p_w[n]$ , 那么 $\mathbf{v}_w[n] = \sqrt{p_w[n]} \widetilde{\mathbf{v}}_w[n]$ 。当 $W > M$ 时, 辅助无人机发送符号并不能达到 $W$ 个, 因此我们将前 $M$ 个符号看作有效信息, 其他 $W - M$ 个符号看作零, 那么 $W$ 个子信道退化为 $M$ 个子信道。本文的目标是将剩余任务分发给附近多个无人机进行计算。因此, 我们将在块对角化和线性波束赋形的过程中分别在每一个处于资源闲置状态的临近无人机上仅选取1根天线作为接收天线, 而不是在资源闲置的单个无人机中选取多个天线。这种设计的出发点是临近无人机不但需要帮助辅助无人机处理任务, 同时需要处理本单元多个地面用户上传的数据, 因此并不能完全占用全部天线从而对应地面用户的数据传输。因此, 在选取接收天线时只需调整波束赋形矩阵中行向量的顺序就可以选取 $J$ 条子信道对应每个临近无人机中的1根天线, 那么

$$p_{\text{UAV}}[n] = \sum_{m=1}^M p_m[n] = \sum_{j=1}^J p_j[n], \forall n。$$

定义  $T_{\text{slot}}[n] = \max\{T_{\text{user}}^{\text{comp}}[n], T_{\text{user}}^{\text{trans}}[n] + \max\{T_{\text{UAV}}^{\text{comp}}[n], T_{\text{UAV}}^{\text{trans}}[n] + T_{\text{near}}^{\text{comp}}[n]\}\}$ ,  $\forall n$ , 那么 $T_{\text{total}} = \sum_{n=1}^N T_{\text{slot}}[n]$ 。因此, 将问题转化为

$$\min_{\mathbf{M}_1, \mathbf{b}, \mathbf{Q}, \mathbf{L}, T_{\text{slot}}} T_{\text{total}} \quad (25a)$$

$$\text{s.t. } T_{\text{user}, k}^{\text{comp}}[n] \leq T_{\text{slot}}[n], \forall k, n \quad (25b)$$

$$T_{\text{user}, k}^{\text{trans}}[n] + T_{\text{UAV}}^{\text{comp}}[n] \leq T_{\text{slot}}[n], \forall k, n \quad (25c)$$

$$T_{\text{user}, k}^{\text{trans}}[n] + T_{\text{UAV}, j}^{\text{trans}}[n] + T_{\text{near}, j}^{\text{comp}}[n] \leq T_{\text{slot}}[n], \forall k, j, n \quad (25d)$$

$$\begin{aligned} & \text{式(22b)(22c)(22d)(22e)(22f)} \\ & \text{(22g)(22i)(22j)(22k)} \end{aligned} \quad (25e)$$

由于目标函数、轨迹以及能量约束对于辅助无人机轨迹仍是非凸的, 因此, 优化问题式(25)无法用现有的凸优化方法解决。在这一节中我们将通过采用连续凸优化技术解决优化问题式(25), 并利用块坐标下降法为问题式(25)提出一种有效的迭代算法。

#### 3.1 用户卸载比、辅助无人机卸载比和临近无人机任务分配比优化

对于给定的变量集合 $\{\mathbf{Q}, \mathbf{M}_1, \mathbf{b}\}$ , 简化问题式(25)为优化问题式(26)

$$\min_{\mathbf{L}, T_{\text{slot}}} T_{\text{total}} \quad (26a)$$

$$\begin{aligned} & \text{s.t. 式(25b)(25c)(25d)(22d)} \\ & \text{(22h)(22i)(22g)(22k)} \end{aligned} \quad (26b)$$

对于变量 $\mathbf{L}$ , 优化问题式(26)是一个标准的线性优化问题, 能够采用现有优化工具有效地解决它。同理, 对于辅助无人机卸载比 $\mathbf{M}_1$ 和临近无人机任务分配比 $\mathbf{b}$ , 目标问题同样是线性优化问题, 形式分别为

$$\min_{\mathbf{M}_1, T_{\text{slot}}} T_{\text{total}} \quad (27a)$$

$$\begin{aligned} & \text{s.t. 式(25b)(25c)(25d)(22e)} \\ & \text{(22h)(22j)(22k)} \end{aligned} \quad (27b)$$

$$\min_{\mathbf{b}, T_{\text{slot}}} T_{\text{total}} \quad (28a)$$

$$\begin{aligned} & \text{s.t. 式(25b)(25c)(25d)(22f)} \\ & \text{(22g)(22h)(22j)(22k)} \end{aligned} \quad (28b)$$

#### 3.2 无人机轨迹优化

对于给定的变量集合 $\{\mathbf{L}, \mathbf{M}_1, \mathbf{b}\}$ , 简化问题式(25)为优化问题式(29)为

$$\min_{\mathbf{Q}, T_{\text{slot}}} T_{\text{total}} \quad (29a)$$

$$\begin{aligned} & \text{s.t. 式(25b)(25c)(25d)(22b)} \\ & \text{(22c)(22i)(22j)} \end{aligned} \quad (29b)$$

根据优化问题式(29), 式(22b)对于变量 $\mathbf{Q}$ 为凸, 其余关于 $\mathbf{Q}$ 的约束均为非凸非凹。以约束式(25c)为例,  $T_{\text{user}, k}^{\text{trans}}[n]$ 对于变量 $\mathbf{q}[n]$ 非凸非凹。定义 $Y_k[n] = D_k[n]l_k[n]$ 和 $\beta_k[n] = p_k[n]g_k[n]\rho_0/\sigma_k^2$ 。假设 $z_k[n] = \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{u}_k\|^2$ , 对于变量 $z_k[n]$ ,  $T_{\text{user}, k}^{\text{trans}}[n]$ 的2阶导数为负。因此,  $T_{\text{user}, k}^{\text{trans}}[n]$ 对于变量 $z_k[n]$ 是凹的。同理,  $T_{\text{UAV}, j}^{\text{trans}}[n]$ 对于变量 $z_k[n]$ 也是凹的。同时, 我们可以看出对于变量 $\mathbf{q}[n]$ ,  $z_k[n] = \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{u}_k\|^2$ 是凸的。因此, 我们可以采用连续凸优化技术。因为任意凸函数的任意点的1阶泰勒展开是该凸函数的全局下界, 所以我们将凸函数的一个本地点 $\mathbf{Z}^l$ 用1阶泰勒展开来近似原函数。假设在第 $l$ 轮迭代过程

中, 给定  $\mathbf{Z}^l = \{\|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{u}_k\|^2, \forall k, n\}$  和无人机轨迹  $\mathbf{Q}^l = \{\mathbf{q}^l[n], \forall n\}$ , 因此  $T_{\text{user},k}^{\text{trans}}[n]$  可以近似成为

$$\begin{aligned} T_{\text{user},k}^{\text{trans}}[n] &= \frac{Y_k[n]}{\log_2 \left( 1 + \frac{\beta_k[n]}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{u}_k\|^2} \right)} \\ &\leq T_{\text{user},k}^{\text{trans}}[n]|_{z_k[n]=z_k^l[n]} \\ &\quad + T_{\text{user},k}^{\prime\text{trans}}[n]|_{z_k[n]=z_k^l[n]} \cdot (z_k[n] - z_k^l[n]) \\ &= A_k[n] + B_k[n] \\ &\quad \cdot (\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{u}_k\|^2 - \|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{u}_k\|^2) \\ &\triangleq \tilde{T}_{\text{user},k}^{\text{trans}}[n], \forall k, n \end{aligned} \quad (30)$$

$$A_k[n] = \frac{Y_k[n]}{\log_2 \left( 1 + \frac{\beta_k[n]}{\|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{u}_k\|^2} \right)}, \forall k, n \quad (31)$$

$$\begin{aligned} B_k[n] &= \frac{Y_k[n]\beta_k[n]}{\log_2^2 \left( 1 + \frac{\beta_k[n]}{\|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{u}_k\|^2} \right) \ln 2} \\ &\quad \cdot \frac{1}{(\|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{u}_k\|^4 + \beta_k[n]\|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{u}_k\|^2)}, \forall k, n \end{aligned} \quad (32)$$

同理  $T_{\text{UAV},j}^{\text{trans}}[n]$ ,  $T_{\text{slot}}[n]$  和  $T_{\text{total}} = \sum_{n=1}^N T_{\text{slot}}[n]$  的上界分别为  $\tilde{T}_{\text{UAV},j}^{\text{trans}}[n]$ ,  $T_{\text{slot}}^{\text{up}}[n]$  和  $T_{\text{total}}^{\text{up}} = \sum_{n=1}^N T_{\text{slot}}^{\text{up}}[n]$ 。相应地  $E_{\text{user},k}^{\text{trans}}$  和  $E_{\text{UAV}}^{\text{trans}}$  对应的上界为  $\tilde{E}_{\text{user},k}^{\text{trans}}$  和  $\tilde{E}_{\text{UAV}}^{\text{trans}}$ 。对于约束式(22c), 在本地点  $\mathbf{q}^l[n]$  利用泰勒1阶展开将其近似为

$$\begin{aligned} \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}_j[n]\|^2 &\geq \|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{q}_j[n]\|^2 \\ &\quad + 2(\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{q}_j[n])^T \times (\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}^l[n]), \forall j, n \end{aligned} \quad (33)$$

优化问题式(29)转化为优化问题式(34), 形式为

$$\min_{\mathbf{Q}, T_{\text{slot}}^{\text{up}}} T_{\text{total}}^{\text{up}} \quad (34a)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\|^2 \leq \left( \frac{V_{\max} T}{N} \right)^2, \forall n \quad (34b)$$

$$\begin{aligned} \|\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{q}_j[n]\|^2 + 2(\mathbf{q}^l[n] - \mathbf{q}_j[n])^T \\ \times (\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}^l[n]) \geq (d_{\min})^2, \forall j, n \end{aligned} \quad (34c)$$

$$T_{\text{user},k}^{\text{comp}}[n] \leq T_{\text{slot}}^{\text{up}}[n], \forall k, n \quad (34d)$$

$$\tilde{T}_{\text{user},k}^{\text{trans}}[n] + T_{\text{UAV}}^{\text{comp}}[n] \leq T_{\text{slot}}^{\text{up}}[n], \forall k, n \quad (34e)$$

$$\tilde{T}_{\text{user},k}^{\text{trans}}[n] + \tilde{T}_{\text{UAV},j}^{\text{trans}}[n] + T_{\text{near},j}^{\text{comp}}[n] \leq T_{\text{slot}}^{\text{up}}[n], \forall k, j, n \quad (34f)$$

$$E_{\text{user},k}^{\text{comp}} + \tilde{E}_{\text{user},k}^{\text{trans}} \leq E_1, \forall k \quad (34g)$$

$$E_{\text{UAV}}^{\text{comp}} + \tilde{E}_{\text{UAV}}^{\text{trans}} + E_{\text{UAV}}^{\text{fly}} \leq E_2 \quad (34h)$$

优化问题式(34)是一个凸优化问题, 它可以用标准的凸优化求解器求解。注意, 优化问题式(34)求得的最优目标值是优化问题式(29)最优目标值的上界。

### 3.3 整体算法与收敛性

在前两小节中, 我们分析了所有变量对于优化问题的凸性。变量  $\mathbf{Q}$  的非凸非凹使得无法同时优化所有目标变量, 因此采用块坐标下降法对这一问题进行优化, 算法如表1所示。下面讨论整体算法的收敛性问题。首先, 定义  $T_{\text{total}}(\mathbf{L}^l, \mathbf{M}_1^l, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l)$  为第  $l$  轮迭代得到的系统总时延。定义  $T_{\text{total}}^{\text{up}}(\mathbf{L}^l, \mathbf{M}_1^l, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l)$  为第  $l$  轮迭代变量  $\mathbf{Q}^l$  近似得到的系统总时延上界。算法1步骤3-5可得

$$\begin{aligned} T_{\text{total}}(\mathbf{L}^l, \mathbf{M}_1^l, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l) &\geq T_{\text{total}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^l, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l) \\ &\geq T_{\text{total}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l) \\ &\geq T_{\text{total}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^l) \end{aligned} \quad (35)$$

因为第  $l$  轮迭代中, 目标函数  $\min(\cdot)$  优化后的最优值一定小于等于优化前。针对算法1步骤6可得

$$\begin{aligned} T_{\text{total}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^l) &\stackrel{\text{a}}{=} T_{\text{total}}^{\text{up}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^l) \\ &\stackrel{\text{b}}{\geq} T_{\text{total}}^{\text{up}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^{l+1}) \\ &\stackrel{\text{c}}{\leq} T_{\text{total}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^{l+1}) \end{aligned} \quad (36)$$

在式(36)中等式a表示1阶泰勒展开在给定局部点具有相同的目标值。不等式b是由目标函数  $\min(\cdot)$  决定。不等式c中, 1阶泰勒展开得到的  $T_{\text{total}}^{\text{up}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^{l+1})$  是  $T_{\text{total}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^{l+1})$  的上界。因此可以得到

$$\begin{aligned} T_{\text{total}}(\mathbf{L}^l, \mathbf{M}_1^l, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l) &\geq T_{\text{total}}(\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}, \mathbf{Q}^{l+1}) \end{aligned} \quad (37)$$

上述收敛性分析可知每次迭代后整体的目标值是不增的。同时, 因为问题式(25)的目标函数  $\min(\cdot)$  的目标值是有下界的, 因此算法1保证收敛。同时, 本文简化了现有的初始化方案<sup>[15]</sup>使得单无人机

表1 针对问题式(25)的优化算法

#### 算法1 问题式(27)的块坐标下降算法

- 1: 初始化变量集合  $\{\mathbf{L}^0, \mathbf{M}_1^0, \mathbf{b}^0, \mathbf{Q}^0\}$ , 使得  $l=0$ .
- 2: **repeat**
- 3: 给定  $\{\mathbf{M}_1^l, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l\}$  求解问题式(26), 求解最优情况  $\{\mathbf{L}^{l+1}\}$
- 4: 给定  $\{\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{b}^l, \mathbf{Q}^l\}$  求解问题式(27), 求解最优情况  $\{\mathbf{M}_1^{l+1}\}$
- 5: 给定  $\{\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{Q}^l\}$  求解问题式(28), 求解最优情况  $\{\mathbf{b}^{l+1}\}$
- 6: 给定  $\{\mathbf{L}^{l+1}, \mathbf{M}_1^{l+1}, \mathbf{b}^{l+1}\}$  求解问题式(34), 求解最优情况  $\{\mathbf{Q}^{l+1}\}$
- 7: 更新  $l = l + 1$ .
- 8: **until** 目标函数的增益小于一个阈值  $\epsilon > 0$ .

通过确定地面用户几何中心，从而确定无人机飞行初始轨迹，以覆盖每个时隙内所有服务用户。

### 4 数值分析

本节提供数据仿真去说明本文所提算法的有效性和收敛性并探讨对系统影响较大的因素。考虑存在  $K = 4$  地面用户、装备  $M = 4$  根天线的临近无人机和  $J = 4$  临近无人机的通信系统，其中所有地面用户的位置随机产生在一个  $1 \times 1 \text{ km}^2$  的区域内且满足每个时隙内用户的步行速度不超过  $2 \text{ m/s}$ 。基于随机生成的地面用户的位置如图2所示。辅助无人机和临近无人机的固定高度分别被假定为  $z[n] = 100 \text{ m}, \forall n$  和  $z_j[n] = 90 \text{ m}, \forall j, n$ 。临近无人机位置随机产生在相邻单元并满足最大飞行速度  $V_{\max}$  限制。由于临近无人机需要服务自身单元的地面用户，其可用电池能量设定为辅助无人机电池能量的10%。LoS分量  $\mathbf{H}_k^{\text{LoS}}$  为全1矢量，瑞利衰落分量  $\mathbf{H}_k^{\text{NLoS}}$  的每一个元素是期望为0和方差为1的循环复高斯随机变量，莱斯因子  $K_R$  置为5 dB，其余参数如表2所示。为探讨临近无人机计算频率、用户数据总量和信道对系统的影响，我们制定了5种方案(周期  $T = 30 \text{ s}$ ,  $N = 5$ ): (1)临近无人机计算频率2 GHz，数据总量  $3 \times 10^5 \text{ bit}$ ，莱斯信道；(2)临近无人机计算频率5 GHz，数据总量  $3 \times 10^5 \text{ bit}$ ，莱斯信道；(3)临近无人机计算频率5 GHz，数据总量  $3 \times 10^6 \text{ bit}$ ，莱斯信道；(4)临近无人机计算频率5 GHz，数据总量  $3 \times 10^5 \text{ bit}$ ，视距信道；(5)临近无人机计算频率5 GHz，数据总量  $3 \times 10^6 \text{ bit}$ ，视距信道。

图2中相较于方案1，方案2的轨迹小幅偏向于临近无人机群方向。由于临近无人机计算频率的增加，辅助无人机在不对用户信道造成较大影响的情况下通过缩短与邻近无人机的距离，以便将很多数据传输给临近无人机进行计算。相较于方案2，方案3的轨迹偏向于用户。这是因为随着数据量的激

增，用户信道状态成为制约数据传输的重要因素，缩短系统延迟的关键在于改善用户信道让更多的数据被卸载，无人机通过靠近用户缩短传输距离，从而改善信道。方案4和方案5也印证了这一观点。对比方案2和方案4以及方案3和方案5，均通过采取视距信道取代莱斯信道初步改善用户信道状态后，辅助无人机能够靠近临近无人机群方向，减小与机群的通信距离，提高通信传输速率，从而上传更多数据协同处理。

表3中相较于方案1，方案2随着临近无人机计算频率的增加，辅助无人机向临近无人机群靠近，以求将更多数据传输给临近无人机帮助计算，从表3可以看出用户卸载比和辅助无人机卸载比都有了一定提升，临近无人机获得更多计算数据量，并缩短了延迟。表4的方案1和方案2佐证了该结论。相较于方案2，方案3中辅助无人机和临近无人机获得的数据比重明显增加，说明随着数据量的增加，用户越来越不能满足计算的要求，必须将更多的数据上传给无人机辅助计算。方案4和方案5同样印证了这一点。对比方案2和方案4以及方案3和方案5，用户信道的改善显著增加了辅助无人机和临近无人机的计算数据量(在表4中计算数据的增加也体现在

表2 部分仿真参数列表

参数	参数数值	参数	参数数值
$B_{\text{user},k}$	1 MHz	$B_{\text{UAV},w}$	1 MHz
$D_k[n]$	$3 \times 10^5 \text{ bit}$	$l_k[n]$	$0.5\forall k, n$
$m_1[n]$	$0.5\forall n$	$b_j[n]$	$0.25\forall j, n$
$c_k$	$10^3 \text{ cycle/bit}$	$c_{\text{UAV}} c_{\text{near},j}$	$5 \times 10^2 \text{ cycle/bit}$
$f_{\text{user},k}$	0.5 GHz	$f_{\text{UAV}}$	4 GHz
$a_k$	$10^{-27}$	$a_{\text{UAV}} a_{\text{near},j}$	$10^{-27}$
$p_k[n]$	$0.01 \text{ W}, \forall k, n$	$p_j[n]$	$0.0125 \text{ W}, \forall j, n$
$\sigma_{j,k}^2[n]$	$-130 \text{ dBm}, \forall j, k, n$	$V_{\max}$	50 m/s
$\rho_0$	-60 dB	$\epsilon$	$10^{-4}$
$E_1$	3.6 kJ	$E_2$	360 kJ
$E_3$	36 kJ	$M_{\text{UAV}}$	9.65 kg

表3 5种方案的用户、辅助无人机、临近无人机计算数据量和系统总延迟对比

方案	用户计算数据量(bit)	辅助无人机计算数据量(bit)	临近无人机计算数据量(bit)	系统总延迟(s)
1	4250114	1146772	603114	2.1251
2	4244491	1133592	621917	2.12223
3	42411928	11356814	6231258	21.2060
4	3282420	1718374	999206	1.6412
5	32810611	17276719	9912670	16.4053

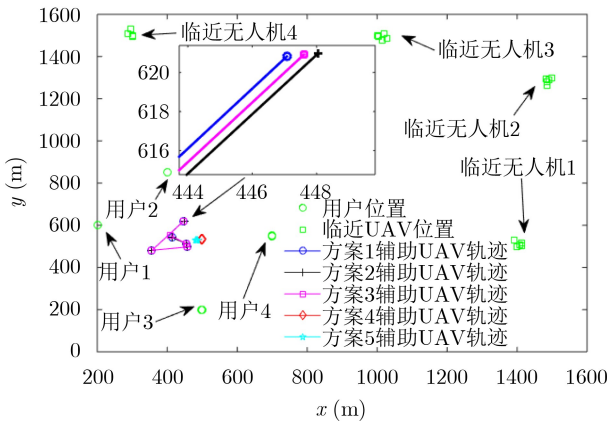


图2 5种方案的辅助无人机轨迹对比图

所有临近无人机上),从而大幅提升辅助计算效率,减小系统总延迟。表4中数据的分配量与辅助无人机—临近无人机的距离呈强相关,并且随着临近无人机计算数据的增加,这种分配关系将得到进一步的加强。表4对比方案2和方案3、方案4和方案5,只有临近无人机4的计算数据占比呈上升趋势,这说明当数据总量激增时,系统会优先将计算任务分发给最近的临近无人机,这也印证了数据分配量与距离的强相关。

为了更好地说明临近无人机计算频率与系统总时延的关系,6种方法的用户信道均采用视距信道、辅助无人机计算频率4 GHz和数据总量 $3 \times 10^5$  bit的条件:(1)本文算法;(2)辅助无人机悬停在用户几何中心上空;(3)辅助无人机采用初始化轨迹;(4)等卸载比等分配比方法(相等 $L$ ,  $m_1$ 和 $b$ );(5)无临近无人机方法;(6)无辅助无人机和临近无人机方法。图3表明本文方法的优势,同时说明了临近无人机计算频率的增加对系统总时延减小的趋势。方法1、方法2和方法3说明了无人机在每个时隙找寻最优点比大范围的规则轨迹更具优势,而MIMO技术会放大这种优势;方法4说明各层卸载比对缩减系统延迟起到决定性作用,卸载比的影响甚至超越辅助无人机轨迹优化的影响;方法5和方法6表明无人机对于边缘计算系统的性能带来显著提升。上述分析可以看出在无人机移动边缘系统中,辅助无人机对系统的影响最大,其次是卸载比和分配比,

表4 5种方案的各临近无人机计算量对比(时刻 $n=1$ )

方案	无人机1(bit)	无人机2(bit)	无人机3(bit)	无人机4(bit)
1	44850	28512	39401	50602
2	46543	29047	40617	52762
3	465139	290337	406029	527704
4	63817	35376	46059	54784
5	625691	349530	457020	551674

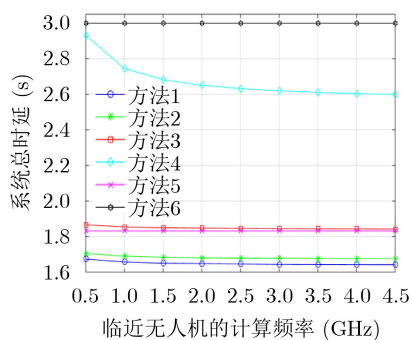


图3 不同方法下临近无人机计算频率与系统总时延关系的对比图(周期 $T=30s$ ,  $N=5$ )

但是无人机轨迹的优化和临近无人机群的辅助也具有较大影响和更深的潜力。图4中方法2在大约40次迭代处收敛,方法4则在20次迭代处收敛。

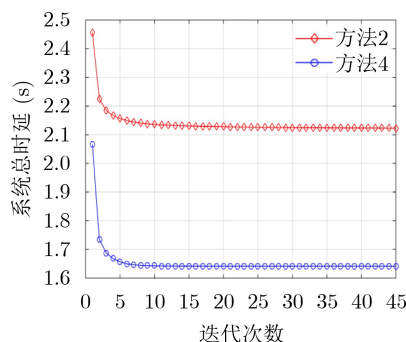


图4 方案2和方案4的收敛对比图

## 5 结束语

本文针对移动边缘计算系统计算资源不足的问题,构建了双层多无人机移动边缘计算系统。该系统通过MIMO技术和多临近无人机辅助计算,增强系统容量,减少系统总时延。其中,通过联合优化用户卸载比、辅助无人机卸载比、临近无人机任务分发比和辅助无人机轨迹从而最小化系统最大总时延。针对系统产生的非凸问题,我们采用连续凸优化技术和块坐标下降法将其转化为凸问题并求解。仿真部分针对不同因素对系统总时延的影响进行了讨论,并验证了本文算法的有效性和收敛性。

## 参考文献

- [1] ZHANG Shangwei, LIU Jiajia, and SUN Wen. Stochastic geometric analysis of multiple unmanned aerial vehicle-assisted communications over internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 5446–5460. doi: 10.1109/JIOT.2019.2902162.
- [2] YUAN Zhenhui, JIN Jie, SUN Lingling, et al. Ultra-reliable IoT communications with UAVs: A swarm use case[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(12): 90–96. doi: 10.1109/MCOM.2018.1800161.
- [3] HAYAT S, YANMAZ E, and MUZAFFAR R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2624–2661. doi: 10.1109/COMST.2016.2560343.
- [4] VALCARCE A, RASHEED T, GOMEZ K, et al. Airborne base stations for emergency and temporary events[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Personal Satellite Services, Toulouse, France, 2013: 13–25. doi: 10.1007/978-3-319-02762-3\_2.
- [5] ZENG Yong, ZHANG Rui, and TENG J L. Wireless communications with unmanned aerial vehicles:



- Opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36–42. doi: [10.1109/MCOM.2016.7470933](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933).
- [6] JEONG S, SIMEONE O, and KANG J. Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(3): 2049–2063. doi: [10.1109/TVT.2017.2706308](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2706308).
- [7] ZHANG Tiankui, XU Yu, LOO J, *et al.* Joint computation and communication design for UAV-assisted mobile edge computing in IoT[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(8): 5505–5516. doi: [10.1109/TII.2019.2948406](https://doi.org/10.1109/TII.2019.2948406).
- [8] MAO Yuyi, YOU Changsheng, ZHANG JUN, *et al.* A survey on mobile edge computing: The communication perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2322–2358. doi: [10.1109/COMST.2017.2745201](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2745201).
- [9] HU Qiyu, CAI Yunlong, YU Guanding, *et al.* Joint offloading and trajectory design for UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 1879–1892. doi: [10.1109/JIOT.2018.2878876](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2878876).
- [10] YU Zhe, GONG Yanmin, GONG Shimin, *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. doi: [10.1109/JIOT.2020.2965898](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2965898).
- [11] MEI Haibo, YANG Kun, LIU Qiang, *et al.* Joint trajectory-resource optimization in UAV-enabled edge-cloud system with virtualized mobile clone[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(7): 5906–5921. doi: [10.1109/JIOT.2019.2952677](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2952677).
- [12] ZHANG Liang and ANSARI N. Latency-aware IoT service provisioning in UAV-aided mobile-edge computing networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 10573–10580. doi: [10.1109/JIOT.2020.3005117](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3005117).
- [13] SHI Qingjiang, PENG Cheng, XU Weiqiang, *et al.* Energy efficiency optimization for MISO SWIPT systems with zero-forcing beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(4): 842–854. doi: [10.1109/TSP.2015.2489603](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2489603).
- [14] CHO Y S, KIM J, YANG W Y, 等, 孙锴, 黄威, 译. MIMO-OFDM无线通信技术及MATLAB实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- CHO Y S, KIM J, YANG W Y, *et al.*, SUN Kai, HUANG Wei, trans. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [15] WU Qingqing, ZENG Yong, and ZHANG Rui. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109–2121. doi: [10.1109/TWC.2017.2789293](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293).
- 邹映琨: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为无人机通信、移动边缘计算.
- 王 钢: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数据通信、物理层网络编码、通信网理论与技术.
- 王金龙: 男, 1986年生, 讲师, 研究方向为无人机通信、无线携能技术、海洋通信等.
- 刘浩洋: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为异构边缘计算与缓存.

责任编辑：陈 倩