

面向用户随机特性的联合无人机部署与 资源分配算法

王钦源^{1,2}, 柴 蓉^{1,2}, 孙瑞锦^{3*}, 陈前斌^{1,2}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆市移动通信技术重点实验室, 重庆 400065;
3. 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710126)

摘 要: 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)具有低成本、高灵活性和易操作等优点,可作为空中基站(Base Station, BS)或中继为地面用户(Ground User, GU)提供无线传输服务. 针对BS与GU之间无法直接通信的场景,可通过部署UAV作为空中中继实现BS与GU之间的信息交互. 本文针对GU位置不确定的UAV辅助通信系统,研究UAV的部署和资源分配策略. 首先将联合UAV部署、GU关联及功率分配问题建模为满足约束条件的系统平均能耗最小化问题. 为求解所建模优化问题,首先提出一种基于圆堆算法的UAV初始部署策略,进而将原优化问题转换为三个子问题,并采用交替迭代法求解. 具体而言,基于给定的UAV部署和GU关联策略,提出一种基于拉格朗日对偶方法的功率分配策略. 给定UAV部署和功率分配策略,基于Voronoi图迭代确定GU关联策略. 给定局部最优功率分配和GU关联策略,提出基于二次变换及一阶泰勒展开的UAV部署方案. 对各子问题进行迭代求解,以得到联合优化策略. 仿真结果验证了所提算法的有效性.

关键词: 用户随机特性; UAV部署; GU关联; 资源分配; 系统平均能耗

基金项目: 国家自然科学基金(No.62271097)

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)12-4015-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240091

Random User Characteristics-Oriented Joint UAV Deployment and Resource Allocation Algorithm

WANG Qin-yuan^{1,2}, CHAI Rong^{1,2}, SUN Rui-jin^{3*}, CHEN Qian-bin^{1,2}

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China;
3. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710126, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) can be deployed as aerial base station (BS) or relays to provide wireless transmission services for ground user (GU) leveraging their advantages of low cost, high flexibility, and maneuverability. In scenarios where direct transmission between the BSs and the GUs may be unavailable, UAVs can be deployed as aerial relays which forward data packets for the GUs. In this paper, we address the UAV deployment and resource allocation strategies in a UAV-assisted communication system with the knowledge of statistical GU positions. We first formulate the joint UAV deployment, GU association and power allocation problem as a constrained average energy consumption minimization problem. To solve the formulated problem, we first propose a circle packing-based initial UAV deployment algorithm, then transform the original optimization problem into three subproblems, which are solved by applying an alternating iterative algorithm. Specifically, based on the given UAV deployment and GU association strategy, we propose a power allocation strategy by applying the Lagrange dual method. Additionally, given UAV deployment and power allocation strategy, the GU association strategy is designed iteratively based on Voronoi diagram. Furthermore, based on locally optimal power allocation and GU association strategy, we design the UAV deployment strategy by using quadratic transformation and the first-order Taylor expansion. The subproblems are solved iteratively until the algorithm reaches convergence, and the joint

optimization strategy can be obtained. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithms.

Key words: random user characteristics; UAV deployment; GU association; resource allocation; average system energy consumption

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62271097)

1 引言

随着移动互联网技术的快速发展,无线通信需求呈爆炸性增长^[1].在基站(Base Station,BS)与地面用户(Ground User,GU)相距较远无法实现直接传输的区域,可以部署无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)作为空中中继,为GU提供无线通信服务^[2].在UAV辅助的通信场景中,联合优化设计UAV部署,GU关联及资源分配策略是提升系统性能的重要问题.

近年来,已有文献针对单架UAV辅助通信场景研究UAV部署及资源分配问题^[3-7].文献[3,4]设计UAV部署策略以实现UAV发送功率最小化^[3]及用户传输速率最大化^[4].文献[5,6]设计UAV部署和资源分配方案以实现用户速率最大化^[5]及最小速率优化^[6].文献[7]联合优化设计无人机部署、发送功率及带宽分配策略,以实现系统吞吐量最大化.

针对多UAV辅助蜂窝通信场景,文献[8,9]提出基于网络覆盖优化的UAV部署算法.针对多UAV多GU的场景,文献[10,11]分别基于系统吞吐量最大化^[10]及系统能耗最小化^[11]设计UAV部署及GU关联策略.文献[12]综合考虑UAV的部署数量及覆盖性能,优化设计UAV部署、GU关联及带宽分配算法.文献[13]提出一种UAV部署、GU关联、计算资源及通信资源分配算法,以实现系统任务卸载平均时延最小化.文献[14,15]以UAV能耗优化为目标设计UAV部署及资源分配策略.

文献[8~15]均假设GU的位置信息确定,未考虑GU位置不确定情况.然而,在部分实际应用场景中,系统可能无法获知GU的确切位置,如何设计UAV部署、GU关联及资源调度策略成为有待研究的重要问题.文献[16~18]针对GU位置信息不确定场景,分别以系统吞吐量最大化^[16]、发送功率最小化^[17]及平均任务延迟优化^[18]为目标设计UAV部署及GU关联策略,但未联合考虑UAV部署、GU关联和资源分配问题,导致系统性能受限.此外,文献[16~18]较少考虑UAV能耗优化问题,可能导致过高能量消耗,进而影响系统性能及用户体验.

本文针对GU位置不确定场景,研究UAV部署、GU关联及资源分配问题,将UAV部署、GU关联及功率分配问题建模为系统平均能耗最小化问题.为求解该问题,首先提出一种UAV初始部署策略,进而将原优化问题拆分为三个子问题,并采用交替迭代法,对各子问题

进行迭代求解,以确定联合优化策略.

2 系统模型

如图1所示,本文考虑一个UAV辅助的数据传输系统,其中多个GU需接收来自蜂窝BS的数据.由于GU处于蜂窝BS盲区,导致直接传输链路不可用,可部署多架UAV作为空中中继,接收来自BS的数据包并转发至GU.令 K 表示UAV数量, UAV_k 表示第 k 架UAV, $1 \leq k \leq K$.假设系统采用正交频分多址进行数据传输,将系统频谱划分成 N 个等长的正交子信道,令 B 表示子信道带宽.

不失一般性,将GU的分布区域离散化为多个二维矩形单元网格.令 X^{\max} 和 Y^{\max} 表示 x 轴和 y 轴上的最大网格数,网格 (i,j) 表示位于第 i 行、第 j 列的网格, $0 \leq i \leq X^{\max}$, $0 \leq j \leq Y^{\max}$.假设GU随机分布在网格区域,且一个网格中最多存在一个GU.令 $GU_{i,j}$ 表示位于网格 (i,j) 的GU, $p_{i,j}$ 表示 $GU_{i,j}$ 的出现概率.令 $S_{i,j}$ 表示 $GU_{i,j}$ 所需接收数据包大小, $q_{i,j}$ 表示 $GU_{i,j}$ 的位置.简单起见,假设UAV均部署在恒定高度 h_0 ,令 $q_k^u = (x_k, y_k)$ 表示 UAV_k 的二维位置.令 $\varphi_{i,j,k}$ 表示 $GU_{i,j}$ 与 UAV_k 之间的关联变量,若 $GU_{i,j}$ 与 UAV_k 关联,则 $\varphi_{i,j,k} = 1$,否则, $\varphi_{i,j,k} = 0$.令 $q^b = (x^b, y^b)$ 表示BS的位置.

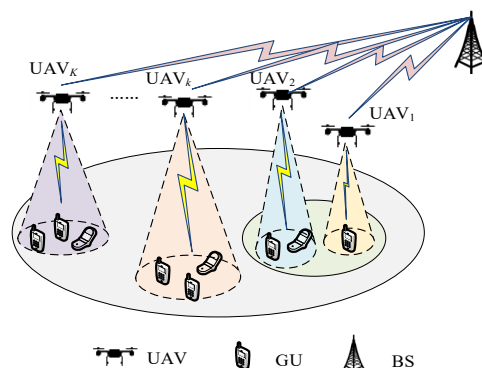


图1 系统模型图

3 问题建模

本节首先定义目标函数,进而将UAV部署、GU关联和功率分配问题建模为系统平均能耗最小化问题.

3.1 建模目标函数

本节对链路传输速率及系统平均能耗进行建模.

3.1.1 链路传输速率

令 R_k^b 表示 BS 与 UAV_k 之间的传输速率, 可表示为

$$R_k^b = B \log_2 \left(1 + \frac{P^b h_k^b}{N_0 B} \right) \quad (1)$$

其中, $P^b = P/K$ 表示 BS 的发送功率, P 为 BS 的最大发送功率; N_0 为噪声功率谱密度; h_k^b 表示 BS 与 UAV_k 之间的信道增益, 可表示为 $h_k^b = \left(\frac{c}{4\pi f_c d_k} \right)^2 \beta_k$, 其中, f_c 为载波频率, c 为光速, β_k 为信道衰落因子, 服从参数为 σ_0^2 的瑞利分布, d_k 为 BS 与 UAV_k 之间的距离.

令 $R_{i,j,k}$ 表示 UAV_k 发送数据至 GU_{i,j} 时对应的传输速率, 可表示为

$$R_{i,j,k} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,j,k} h_{i,j,k}}{N_0 B} \right) \quad (2)$$

其中, $P_{i,j,k}$ 表示 UAV_k 传输数据至 GU_{i,j} 时采用的发送功率; $h_{i,j,k}$ 表示 UAV_k 与 GU_{i,j} 之间的信道增益, 可表示为 $h_{i,j,k} = \left(\frac{c}{4\pi f_c d_{i,j,k}} \right)^2 \alpha_{i,j,k}$, 其中, $\alpha_{i,j,k}$ 为信道衰落因子, 服从参数为 σ^2 的瑞利分布, $d_{i,j,k}$ 为 UAV_k 与 GU_{i,j} 之间的距离.

3.1.2 系统平均能耗

令 E_{tot} 表示系统总能耗, 可建模为 BS 发送能耗、UAV 发送能耗及 UAV 悬停能耗的加权和, 即

$$E_{\text{tot}} = \omega_1 \sum_{k=1}^K E_k^b + \omega_2 \sum_{k=1}^K E_k^u + \omega_3 E^h \quad (3)$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为加权因子; E_k^b 表示 BS 向 UAV_k 传输数据包时的平均能耗, 可建模为

$$E_k^b = P^b \sum_{i=0}^{Y_{\text{max}}} \sum_{j=0}^{Y_{\text{max}}} p_{i,j} \varphi_{i,j,k} S_{i,j} / \mathbb{E}[R_k^b] \quad (4)$$

式(3)中, E_k^u 表示 UAV_k 的平均传输能耗, 可建模为

$$E_k^u = \sum_{i=0}^{Y_{\text{max}}} \sum_{j=0}^{Y_{\text{max}}} \varphi_{i,j,k} E_{i,j,k}^u \quad (5)$$

其中, $E_{i,j,k}^u$ 表示 UAV_k 向 GU_{i,j} 传输数据包时对应的平均传输能耗, 可表示为 $E_{i,j,k}^u = p_{i,j} \mathbb{E}[P_{i,j,k} S_{i,j}] / \mathbb{E}[R_{i,j,k}]$.

式(3)中, E^h 表示 UAV 的总悬停能耗, 可建模为 $E^h = K P^h T_0$, 其中, T_0 表示 UAV 的悬停时间, P^h 表示单架 UAV 的悬停功率, 为给定常数.

3.2 优化问题

本文综合考虑优化目标和约束条件, 将 UAV 部署、GU 关联及功率分配问题建模为满足约束条件的系统总能耗最小化问题, 即

$$\begin{aligned} & \min_{Q, \Phi, P, K} E_{\text{tot}} \\ & \text{s.t.} \quad \text{C1: } 0 \leq x_k \leq X_p, 0 \leq y_k \leq Y_1 \\ & \quad \text{C2: } \sum_{k=1}^K \varphi_{i,j,k} \leq 1, \forall i, j \\ & \quad \text{C3: } \sum_{i=0}^{Y_{\text{max}}} \sum_{j=0}^{Y_{\text{max}}} \sum_{k=1}^K \varphi_{i,j,k} \leq N \\ & \quad \text{C4: } \sum_{i=0}^{Y_{\text{max}}} \sum_{j=0}^{Y_{\text{max}}} p_{i,j} \varphi_{i,j,k} P_{i,j,k} \leq P^{\text{max}}, \forall k \\ & \quad \text{C5: } P(\gamma_{i,j,k} \leq \Theta_{\text{th}}^u) \leq \varepsilon_{\text{th}} \\ & \quad \text{C6: } |E^{\text{max}} - E^{\text{min}}| \leq E_{\text{th}} \\ & \quad \text{C7: } R_{i,j,k} \geq \varphi_{i,j,k} R_{\text{min}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $Q = \{q_k^u\}$ 表示 UAV 部署策略, $\Phi = \{\varphi_{i,j,k}\}$ 表示 GU 关联策略, $P = \{P_{i,j,k}\}$ 表示 UAV 的功率分配策略; C1 为 UAV 部署约束; C2~C3 为 GU 关联约束; C4 为 UAV 发送功率约束, 其中, P^{max} 为 UAV 的最大发送功率; C5 为中断概率约束, 其中, Θ_{th}^u 和 ε_{th} 分别为信噪比阈值和中断概率阈值; C6 为 UAV 的能耗均衡约束, 其中, E_{th} 为能耗差异阈值, $E^{\text{max}} = \max\{E_1^u, E_2^u, \dots, E_K^u\}$, $E^{\text{min}} = \min\{E_1^u, E_2^u, \dots, E_K^u\}$; C7 表示 GU 传输速率约束, 其中, R_{min} 为 GU 的最小传输速率阈值.

4 优化问题求解

式(6)所建模的优化问题为混合整数非线性规划, 难以直接求解. 本小节首先提出一种基于圆堆算法的 UAV 初始部署策略, 进而将原优化问题拆分为三个子问题, 并采用交替迭代法对各子问题进行迭代求解, 以确定联合优化策略.

4.1 基于圆堆算法的 UAV 初始部署策略

4.1.1 确定 UAV 最大覆盖半径

综合考虑 UAV 的最大发送功率和 GU 的最小传输速率需求, 可确定 GU 与其关联的 UAV 之间的最大通信距离. 令 d_{max} 表示 UAV 与 GU 之间的最大通信距离. 根据 GU 的传输速率公式, 可得

$$d_{\text{max}} = \sqrt{(\tau_0 P_{\text{max}} \sigma^2) / (2^{R_{\text{min}}/B} - 1) N_0 B} \quad (7)$$

其中, $\tau_0 = (c/4\pi f_c)^2$. 令 r_{max} 表示 UAV 的最大覆盖半径, 可得 $r_{\text{max}} = \sqrt{d_{\text{max}}^2 - h_0^2}$.

4.1.2 问题建模

不失一般性, 假设初始部署阶段 UAV 之间覆盖区域不重叠. 给定 GU 位置区域, UAV 应能实现最大覆盖, 因此, UAV 初始部署问题可建模为

$$\begin{aligned} & \max_{q_k^u} K\pi r_{\max}^2 \\ \text{s.t. C1: } & \|q_k^u - q_{k'}^u\|_2 \geq 2r_{\max} \\ & \text{C2: } x_k + r_{\max} - X_1 \leq 0 \\ & \text{C3: } y_k + r_{\max} - Y_1 \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, C1 确保 UAV 之间不重叠, C2 和 C3 确保 UAV 的部署位置在区域边界内, X_1 及 Y_1 分别表示 GU 所部署区域在 x 轴和 y 轴的最大值.

4.1.3 算法描述

可以证明, 式(8)中所建模的优化问题可等价于圆堆问题, 即给定区域内, 放置大小相同的, 互不重叠的圆, 以实现覆盖范围优化. 算法步骤如下:

(1) 初始化: 记 UAV 的部署区域为 $[0, X_1] \times [0, Y_1]$, 设置初始层数 $l=1$.

(2) 确定 x 轴和 y 轴方向可放置圆的最大数量: 设 N_x 和 N_y 分别表示部署区域 x 轴和 y 轴方向可放置圆的最大数量, 可得 $N_x = \lfloor X_1/2r_{\max} \rfloor$, $N_y = \lfloor Y_1/2r_{\max} \rfloor$.

(3) 首层放置圆: 将第一个圆放置在矩形区域的左下角, 使其与区域左边界和下边界相切.

(4) 首层放置其他圆: 若 $N_x=1$, 转至步骤(5), 否则, 沿 x 轴方向依次放置 N_x-1 个圆, 使相邻的圆彼此相切并与下边界相切. 若 $N_y=1$, 则算法结束, 否则, 设 $l=l+1$.

(5) 第 l 层放置第一个圆: 选择位于 $l-1$ 层左侧的前两个圆, 在第 l 层放置第一个圆, 使其与所选 $l-1$ 层的两个圆相切.

(6) 第 l 层放置其他圆: 判断第 l 层沿 x 轴方向的剩余区域是否足够放置其他圆, 若否, 则转至步骤(8), 否则, 在第 l 层沿 x 轴方向放置一个圆, 使其与 $l-1$ 层的圆相切并与 l 层相邻的圆相切. 重复此过程, 直到第 l 层在区域边界内无法放置其他圆.

(7) 确定两个相切圆的垂直距离: 令 Δ_h 表示两个邻近层相切圆的垂直距离, 即 $\Delta_h = \sqrt{(2r_{\max})^2 - (r_{\max})^2}$.

(8) 判断算法是否终止: 评估 y 轴的剩余区域是否可放置其他圆, 若是, 则令 $l=l+1$, 转至步骤(5), 否则, 算法结束.

4.2 基于拉格朗日对偶算法的功率分配策略

给定 UAV 部署和 GU 关联策略 $\{Q, \Phi\}$, 所建模优化问题(6)可简化为功率分配子问题. 由于不同 UAV 间互不干扰, 多 UAV 的联合功率分配问题可简化为单 UAV 的功率分配问题. 令 \tilde{q}_k^u 表示已确定的 UAV k 部署位置, $\tilde{\varphi}_{i,j,k}$ 表示 GU 关联策略, \tilde{E}_k^u 表示 UAV k 的平均传输能耗, UAV k 的功率分配问题可建模为

$$\begin{aligned} & \min_{P_{i,j,k}} \tilde{E}_k^u \\ \text{s.t. C1: } & P(\gamma_{i,j,k} < \Theta_{\text{th}}^u) \leq \varepsilon_{\text{th}} \\ & \text{C2: } \sum_{i=0}^{X_{\max}} \sum_{j=0}^{Y_{\max}} p_{i,j} \tilde{\varphi}_{i,j,k} P_{i,j,k} \leq P^{\max} \end{aligned} \quad (9)$$

为求解所建模优化问题, 本小节首先对约束条件 C2 进行转换, 设计相应的单链路功率分配策略, 进而判断所得功率分配策略是否满足 C2, 若否, 则进行策略调整. 单链路能耗最小化问题可转化为能效最大化问题, 即

$$\begin{aligned} & \max_{P_{i,j,k}} \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_{i,j,k} h_{i,j,k}}{N_0 B} \right) \right] / \mathbb{E} [P_{i,j,k}] \\ \text{s.t. C1: } & P(\gamma_{i,j,k} < \Theta_{\text{th}}^u) \leq \varepsilon_{\text{th}} \\ & \text{C2: } p_{i,j} P_{i,j,k} \leq P^{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\varsigma = 1/\mathbb{E}[P_{i,j,k}]$, 应用 Charnes-Cooper 变换方法对优化问题(10)进行转换, 可得

$$\begin{aligned} & \max_{P_{i,j,k}} \varsigma \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_{i,j,k} h_{i,j,k}}{N_0 B} \right) \right] \\ \text{s.t. } & \varsigma \mathbb{E} [P_{i,j,k}] \leq 1 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)的优化问题可采用拉格朗日乘子法求解, 对应拉格朗日函数可写为

$$L(P_{i,j,k}, \varsigma, \nu) = \nu \left(1 - \varsigma \mathbb{E} [P_{i,j,k}] \right) + \varsigma \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_{i,j,k} h_{i,j,k}}{N_0 B} \right) \right] \quad (12)$$

其中, $\nu \geq 0$ 为拉格朗日乘子. 令 $\partial L(P_{i,j,k}, \varsigma, \nu) / \partial P_{i,j,k} = 0$,

可得 $P_{i,j,k}$ 为 $P_{i,j,k} = \left[1/\nu \ln 2 - N_0 B/h_{i,j,k} \right]^+$.

根据优化问题(10)的约束条件 C1, 给定 ε_{th} , 可求得得到 $P_{i,j,k}$ 的下界 $\tilde{P}_{i,j,k}$, 即

$$\tilde{P}_{i,j,k} \geq N_0 B \Theta_{\text{th}}^u \left(\frac{4\pi f_c d_{i,j,k}}{c} \right)^2 / \sigma \sqrt{2 \ln \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{\text{th}}} \right)}.$$

根据优化问题(10)中的约束条件 C2, 可得 $\hat{P}_{i,j,k} \leq P_{\max}/p_{i,j}$. 综合考虑, 可得

$$P'_{i,j,k} = \min \left\{ \hat{P}_{i,j,k}, \max \left\{ P_{i,j,k}, \tilde{P}_{i,j,k} \right\} \right\} \quad (13)$$

进一步判断优化问题(9)的约束 C2. 若 $\sum_{i=0}^{X_{\max}} \sum_{j=0}^{Y_{\max}} p_{i,j} \tilde{\varphi}_{i,j,k} P'_{i,j,k} \leq P^{\max}$, 则 UAV 的功率分配策略可表示为 $P_{i,j,k}^* = P'_{i,j,k}$, 否则, 引入尺度因子 α , 使得 $\alpha \left(\sum_{i=0}^{X_{\max}} \sum_{j=0}^{Y_{\max}} p_{i,j} \tilde{\varphi}_{i,j,k} P'_{i,j,k} \right) = P^{\max}$, 即可得功率分配策略.

4.3 基于 Voronoi 图的迭代 GU 关联算法

4.3.1 算法基本思想

给定 UAV 部署和功率分配策略 $\{Q, P\}$, 联合优化问题(6)可简化为 GU 关联子问题, 可建模为

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{k=1}^K E_k^u \\ \text{s.t. C1: } & \sum_{k=1}^K \varphi_{i,j,k} \leq 1 \\ & \sum_{i=0}^{X^{\max}} \sum_{j=0}^{Y^{\max}} \sum_{k=1}^K \varphi_{i,j,k} \leq N \end{aligned} \quad (14)$$

为求解上述优化问题, 本文提出一种基于 Voronoi 图的迭代 GU 关联算法. 该算法基于一组生成点, 将 GU 的地理区域划分为不同的子区域, 每个子区域上空部署一架 UAV.

4.3.2 生成点位置更新

给定生成点的初始位置, 可计算生成点的驱动力, 并进行生成点的位置更新. 令 F_k 为第 k 个生成点的驱动力, 定义为 $F_k = \sum_{k' \neq k} F_{k',k}$, 其中, $F_{k',k}$ 表示生成点 k' 对生成点 k 的作用力, 可计算为

$$F_{k',k} = \text{sign}(E_{k'}^u - E_k^u) \frac{|E_{k'}^u - E_k^u|^t}{(r_{k',k})^s} \hat{r}_{k',k} \quad (15)$$

其中, t 和 s 分别为调节能耗差和距离差的参数, (\cdot) 为符号函数, $r_{k',k} = \|\mathbf{q}_{k'}^u - \mathbf{q}_k^u\|$ 表示生成点 k' 与 k 之间的距离, $\hat{r}_{k',k}$ 表示单位矢量.

令 $\mathbf{q}_k^{u,l}$ 和 F_k^l 分别表示第 l 次迭代时生成点 k 的位置及驱动力. 生成点 k 的位置更新方程为

$$\mathbf{q}_k^{u,l+1} = \mathbf{q}_k^{u,l} + \mu F_k^l \quad (16)$$

其中, μ 为扩散系数/黏滞系数.

4.3.3 算法步骤

本节所提出的基于 Voronoi 图的 GU 关联算法的第 l 次迭代过程的步骤如下:

(1) 令 $l=0$, 给定一组生成点 $\{\mathbf{q}_1^{u,l}, \mathbf{q}_2^{u,l}, \dots, \mathbf{q}_K^{u,l}\}$;

(2) 生成 Voronoi 图, 将 GU 的位置区域划分为 K 个子区域;

$$\zeta_k^{b,t} \geq \omega_1 (\mu_k^t)^2 Z_k^t - \omega_1 2\mu_k^t \sqrt{P^b \sum_{i=0}^{X^{\max}} \sum_{j=0}^{Y^{\max}} p_{i,j} \varphi_{i,j,k}^* S_{i,j}} - \omega_1 (\mu_k^t)^2 V_k^t \left(\|\mathbf{q}^b - \mathbf{q}_k^{u,t}\|^2 - \|\mathbf{q}^b - \tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t}\|^2 \right) = \tilde{\zeta}_k^{b,t} \quad (20)$$

其中, $\tilde{\zeta}_k^{b,t}$ 表示 $\zeta_k^{b,t}$ 的下界, V_k^t 和 Z_k^t 分别表示为

$$V_k^t = \mathbb{E} \left[\frac{\frac{P^b \tau_0 \beta_k}{N_0 \left(\|\mathbf{q}^b - \tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t}\|^2 \right)^2} \log_2 e}{1 + \frac{P^b \tau_0 \beta_k}{N_0 B \|\mathbf{q}^b - \tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t}\|^2}} \right] \quad (21)$$

(3) 判断能耗均衡约束条件 C6 是否满足, 若是, 则终止算法, 输出 GU 关联策略;

(4) 若否, 则根据式(16)更新生成点的位置, 令 $l=l+1$, 转至步骤(1);

根据本节提出的 GU 关联算法, 可确定 GU 的关联策略, 令 $\varphi_{i,j,k}^*$ 表示所得到的 GU _{i,j} 关联策略.

4.4 UAV 部署算法

给定 GU 关联和功率分配策略 $\{\Phi, P\}$, 联合优化问题(6)可转化为 UAV 部署子问题. 令 E_k 表示 UAV _{k} 从 BS 接收数据包并转发至所关联 GU 时所需的总传输能耗, 即 $E_k = \omega_1 E_k^b + \omega_2 E_k^u$, UAV _{k} 的部署问题可建模为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{q}_k^u} \quad & \omega_1 E_k^b + \omega_2 E_k^u \\ \text{s.t. C1: } & 0 \leq x_k \leq X_1 \\ & 0 \leq y_k \leq Y_1 \end{aligned} \quad (17)$$

上述优化问题是非凸和比优化问题. 为求解该问题, 将能耗最小化问题改写为负能耗最大化问题, 并提出一种基于二次变换的迭代算法. 在第 t 次迭代中, 采用二次变换对目标函数进行变换. 具体地, 以 $2y\sqrt{A} - y^2 B$ 表示式 A/B , 其中 $y = \sqrt{A}/B$. 令 $\zeta_k^{b,t}$ 表示 E_k^b 在第 t 次迭代中的加权负值, 即

$$\begin{aligned} \zeta_k^{b,t} = & -\omega_1 2\mu_k^t \sqrt{P^b \sum_{i=0}^{X^{\max}} \sum_{j=0}^{Y^{\max}} p_{i,j} \varphi_{i,j,k}^* S_{i,j}} \\ & + \omega_1 (\mu_k^t)^2 \mathbb{E} \left[B \log_2 \left(1 + \frac{P^b \tau_0 \beta_k}{N_0 B \|\mathbf{q}^b - \mathbf{q}_k^{u,t}\|^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\mathbf{q}_k^{u,t}$ 为 UAV _{k} 在第 t 次迭代中的位置, μ_k^t 可表示为

$$\mu_k^t = \frac{\sqrt{P^b \sum_{i=0}^{X^{\max}} \sum_{j=0}^{Y^{\max}} p_{i,j} \varphi_{i,j,k}^* S_{i,j}}}{\mathbb{E} \left[B \log_2 \left(1 + \frac{P^b \tau_0 \beta_k}{N_0 B \|\mathbf{q}^b - \mathbf{q}_k^{u,t}\|^2} \right) \right]} \quad (19)$$

由于对数函数的凹性, 可以证明 $\zeta_k^{b,t}$ 对 $\|\mathbf{q}^b - \mathbf{q}_k^{u,t}\|^2$ 是凸的. 任何凸函数均为其一阶泰勒展开式的全局下界. 给定一个局部点 $\|\mathbf{q}^b - \tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t}\|^2$, 在第 t 次迭代中, 可得

$$Z_k^t = \mathbb{E} \left[B \log_2 \left(1 + \frac{P^b \tau_0 \beta_k}{N_0 B \|\mathbf{q}^b - \tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t}\|^2} \right) \right] \quad (22)$$

采用类似的方法, 令 $\zeta_k^{u,t}$ 表示 E_k^u 在第 t 次迭代中的加权负值, 可得

$$\zeta_k^{u,t} \geq -\omega_2 \sum_{i=0}^{Y_{\max}} \sum_{j=0}^{X_{\max}} 2\lambda_{i,j,k}^t \sqrt{\varphi_{i,j,k}^* P_{i,j,k}^*} + \omega_2 \sum_{i=0}^{Y_{\max}} \sum_{j=0}^{X_{\max}} (\lambda_{i,j,k}^t)^2 D_{i,j,k}^t - \omega_2 \sum_{i=0}^{Y_{\max}} \sum_{j=0}^{X_{\max}} (\lambda_{i,j,k}^t)^2 A_{i,j,k}^t \cdot \left(\|\mathbf{q}_k^{u,t} - \mathbf{q}_{i,j}\|^2 - \|\tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t} - \mathbf{q}_{i,j}\|^2 \right) = \tilde{\zeta}_k^{u,t} \quad (23)$$

其中, $\tilde{\zeta}_k^{u,t}$ 表示 $\zeta_k^{u,t}$ 的下界; $\lambda_{i,j,k}^t$, $A_{i,j,k}^t$ 和 $D_{i,j,k}^t$ 分别表示为

$$\lambda_{i,j,k}^t = \frac{\sqrt{\varphi_{i,j,k}^* P_{i,j,k}^*}}{\mathbb{E} \left[B \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,j,k}^* \tau_0 \alpha_{i,j,k}}{N_0 B \|\mathbf{q}_k^{u,t} - \mathbf{q}_{i,j}\|^2} \right) \right]} \quad (24)$$

$$A_{i,j,k}^t = \mathbb{E} \left[\frac{\frac{P_{i,j,k}^* \tau_0 \alpha_{i,j,k}}{N_0 \left(\|\tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t} - \mathbf{q}_{i,j}\|^2 \right)^2 \log_2 e}}{1 + \frac{P_{i,j,k}^* \tau_0 \alpha_{i,j,k}}{N_0 B \|\tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t} - \mathbf{q}_{i,j}\|^2}} \right] \quad (25)$$

$$D_{i,j,k}^t = \mathbb{E} \left[B \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,j,k}^* \tau_0 \alpha_{i,j,k}}{N_0 B \|\tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t} - \mathbf{q}_{i,j}\|^2} \right) \right] \quad (26)$$

对于给定的局部点 $\tilde{\mathbf{q}}_k^{u,t}$ 以及下界 $\tilde{\zeta}_k^{b,t}$ 和 $\tilde{\zeta}_k^{u,t}$, 优化问题(17)可转化为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{q}_k^t} \quad & \tilde{\zeta}_k^{b,t} + \tilde{\zeta}_k^{u,t} \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } 0 \leq x_k \leq X_1 \\ & \text{C2: } 0 \leq y_k \leq Y_1 \end{aligned} \quad (27)$$

可证明上述问题为凸优化问题, 可通过标准的凸优化求解器(如 CVX)进行求解.

4.5 算法复杂度分析

针对功率分配子问题, 本文采用拉格朗日对偶方法进行求解, 算法复杂度为 $O(KX^{\max}Y^{\max}T)$, 其中, T 表示拉格朗日对偶方法的迭代次数. 针对 GU 关联子问题, 本文提出一种基于 Voronoi 图的迭代 GU 关联算法进行求解. 令 L 表示 GU 关联算法的迭代次数, 可得算法复杂度为 $O(KX^{\max}Y^{\max}L)$. 针对 UAV 部署子问题, 本文提出一种基于二次变换及一阶泰勒展开的迭代算法进行求解. 令 Q 表示算法迭代次数, 可得算法复杂度为 $O(KX^{\max}Y^{\max}Q)$.

5 仿真结果

本节对本文所提算法的性能进行仿真评估. 设定 GU 所在区域的大小为 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$, BS 的位置为 $(1\,500, 1\,000)$. 仿真使用的相关参数如表 1 所示.

图 2 所示为基于 K 均值算法及 Voronoi 图算法得到的 GU 关联策略结果, 其中用户分布分别为均匀分布及截断高斯分布. 从图 2 中可以看出基于 Voronoi 图算法中, 各子区域的用户数量更加均衡. 针对 GU 服从截断高斯分布的场景, GU 在热点区域出现的概率较大, 导

表 1 仿真参数设置

仿真参数	数值
x 轴上的最大网格数(X_{\max})	13
y 轴上的最大网格数(Y_{\max})	13
最小传输速率(R_{\min})	1×10^7 bit/s
光速(c)	3×10^8 m/s
带宽(B)	1 MHz
UAV 最大发送功率(P_{\max})	1 W
UAV 高度(h_0)	100 m
噪声功率谱密度(N_0)	-154 dBm/Hz
载波频率(f_c)	2 GHz
BS 最大发送功率(P)	1 W
权重因子($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)	1, 1, 1×10^{-5}

致该能耗增加. 为实现能耗相对均衡, 对应子区域面积减小.

图 3 描述了系统平均能耗与带宽的关系. 对比起见, 图中给出了本文所提算法、文献[17]及文献[18]中所提算法的性能. 从图中可看出, 系统平均能耗随着带宽的增加而降低. 原因是随着带宽增加, 传输速率提高, 因而数据传输时间较短, 所需能耗越低. 比较不同噪声功率谱密度对应的系统平均能耗可看出, 系统平均能耗随着噪声功率谱密度的减小而减小. 与文献[17, 18]中的算法相比, 本文提出的算法对应的系统平均能耗最低. 原因是文献[17, 18]分别以功耗及通信时延优化为目标设计 UAV 部署和 GU 关联策略, 且未考虑 UAV 的发送功率优化, 导致系统能耗较高.

图 4 绘制了系统平均能耗与数据包大小的关系. 图中给出了本文所提算法、文献[17]及文献[18]中所提算法的性能. 由图 4 可知, 系统平均能耗随着数据包大小的增加而增加. 这是因为数据包的传输量增加使数据传输时间增加, 因而 UAV 的传输能耗相应增加. 比较三种算法对应的能耗, 可以看出, 本文所提算法具有较好的性能.

图 5 描述了本文所提算法和文献[18]中所提算法的系统平均能耗与 UAV 数量的关系. 当 UAV 数量较少时, 系统平均能耗随着 UAV 数量的增加而降低. 然而, 当 UAV 数量进一步增加时, 系统平均能耗开始增加. 其原因是 UAV 的悬停能耗迅速增加, 导致总能耗增加. 比较不同权重因子 ω_3 对应的系统平均能耗, 可以看出, 随着权重因子 ω_3 增加, 系统平均能耗也随之增加.

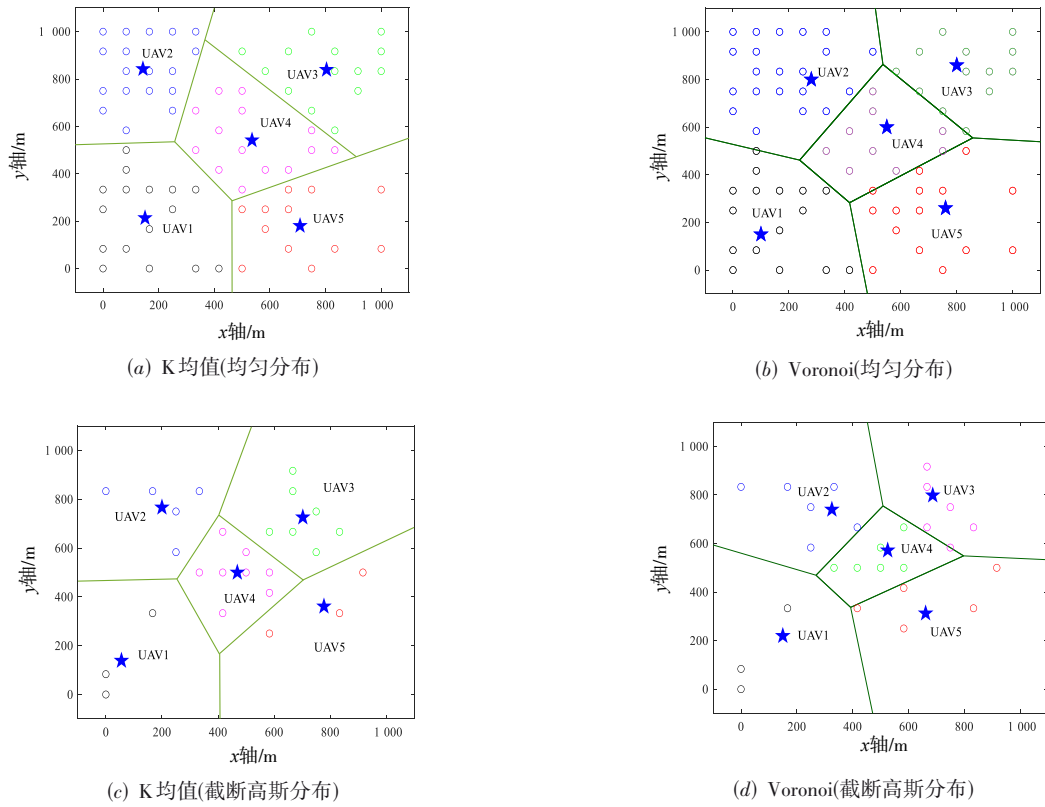


图2 不同GU关联方案

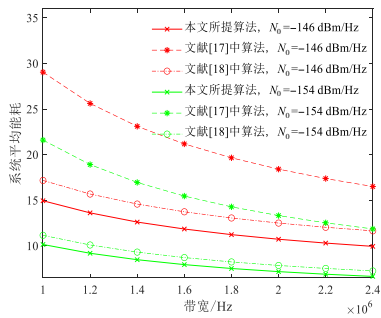


图3 系统平均能耗与带宽关系图

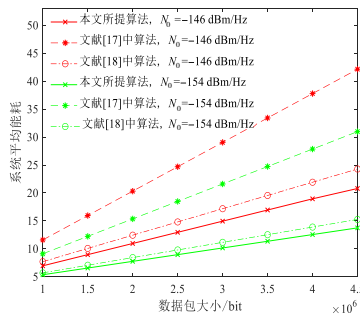


图4 系统平均能耗与数据包大小关系图

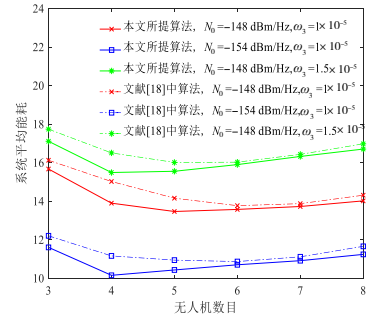


图5 系统平均能耗与UAV数量关系图

6 结论

本文考虑 UAV 辅助的无线通信场景,将联合 UAV 部署、GU 关联和功率分配问题建模为系统平均能耗最小化问题. 为求解所建模的优化问题,首先提出一种基于圆堆算法的 UAV 初始部署策略,进而将原问题拆分为功率分配子问题、GU 关联子问题及 UAV 部署子问题,并提出一种基于交替迭代算法对各子问题迭代求解,以确定联合优化策略. 仿真结果证明了与参考文献所提算法对比,本文所提算法具有更优的系统平均能耗,体现了算法的有效性.

参考文献

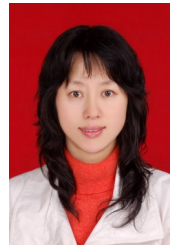
- [1] FOTOUHI A, QIANG H, DING M, et al. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3417-3442.
- [2] ZHAO N, LU W D, SHENG M, et al. UAV-assisted emergency networks in disasters[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 45-51.
- [3] ALZENAD M, EL-KEYI A, LAGUM F, et al. 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-

- BS) for energy-efficient maximal coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(4): 434-437.
- [4] NASR-AZADANI M, ABOUEI J, PLATANIOTIS K N. Single-and multiagent actor-critic for initial UAV's deployment and 3-D trajectory design[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(16): 15372-15389.
- [5] GUO Y J, YIN S X, HAO J J. Joint placement and resources optimization for multi-user UAV-relaying systems with underlaid cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12374-12377.
- [6] YI P F, ZHU L, ZHU L P, et al. Joint 3-D positioning and power allocation for UAV relay aided by geographic information[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 8148-8162.
- [7] BI S Z, YU J X, YANG Z Y, et al. Joint 3-D deployment and resource allocation for UAV-assisted integrated communication and localization[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(10): 1672-1676.
- [8] HUANG H L, SAVKIN A V. Deployment of heterogeneous UAV base stations for optimal quality of coverage[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(17): 16429-16437.
- [9] LIN N, LIU Y H, ZHAO L, et al. An adaptive UAV deployment scheme for emergency networking[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(4): 2383-2398.
- [10] MA B, ZHANG J L, ZHANG Z T, et al. Time-efficient joint UAV-BS deployment and user association based on machine learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(14): 13077-13094.
- [11] KUO Y C, CHIU J H, SHEU J P, et al. UAV deployment and IoT device association for energy-efficient data-gathering in fixed-wing multi-UAV networks[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(4): 1934-1946.
- [12] ZHANG C, ZHANG L Y, ZHU L P, et al. 3D deployment of multiple UAV-mounted base stations for UAV communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(4): 2473-2488.
- [13] ZHANG L, 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.
- [14] NAJMEDDIN S, AISSA S, TAHAR S. Energy-efficient resource allocation in multi-UAV networks with NOMA[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(4): 1906-1917.
- [15] LI Y, XU S Y, WU Y P, et al. Network energy-efficiency maximization in UAV-enabled air-ground-integrated deployment[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 13209-13222.
- [16] WANG L Y, ZHANG H X, GUO S S, et al. Learning to deployment: Data-driven on-demand UAV placement for throughput maximization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8007-8012.
- [17] WANG L Y, ZHANG H X, GUO S S, et al. Deployment and association of multiple UAVs in UAV-assisted cellular networks with the knowledge of statistical user position[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6553-6567.
- [18] HAN Z H, ZHOU T, XU T H, et al. Joint user association and deployment optimization for delay-minimized UAV-aided MEC networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(10): 1791-1795.

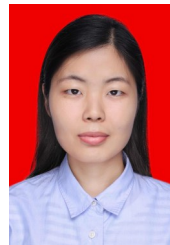
作者简介



王钦源 男, 1999年出生. 现为重庆邮电大学硕士研究生. 研究方向为空地一体化通信、无人机通信、通信感知一体化、无线资源分配等.
E-mail: s220101153@stu.cqupt.edu.cn



柴蓉 女, 1974年出生. 现为重庆邮电大学教授、博士生导师. 研究方向为空地一体化网络架构及关键技术、无线资源管理及移动性管理技术等.
E-mail: chairong@cqupt.edu.cn



孙瑞锦 女, 1992年出生. 现为西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 陕西省青年人才. 研究方向为知识驱动的资源调度等.
E-mail: sunruijin@xidian.edu.cn