

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209129

# 基于效用函数的 UAV 辅助网络负载均衡算法研究<sup>\*</sup>

韩东升<sup>1,2</sup> 李新月<sup>1</sup> 史天浩<sup>1</sup>

(华北电力大学电子与通信工程系 保定 071003; 2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室 保定 071003)

**摘要:** UAV 由于具有高移动性、高视距通信概率等优点,在无线网络中发挥重要作用。然而在多 UAV 系统中,传统的用户关联策略无法满足 UAV 按需部署,存在着负载不均衡的问题。为此,首先构造了一个效用函数,综合考虑了用户的接收信干噪比、UAV 负载以及由同一 UAV 服务的用户集合在空间上的离散程度 3 种因素。其次,通过求解效用最大化问题实现网络负载均衡。为了求解这个混合整数非线性的非凸问题,提出了一个基于效用函数的负载均衡算法,将原始问题分解为用户关联和 UAV 位置优化两个子问题进行迭代求解。在给定 UAV 位置的情况下,提出了一种基于效用最大的用户关联算法来获得最佳的用户关联方案。基于当前最佳的用户关联方案,提出了一种改进的分布式按序位置优化算法来获得最佳的 UAV 位置。最后,通过连续迭代求解用户关联和 UAV 位置优化子问题,可以得到最优的用户关联方案和 UAV 位置。仿真结果表明,提出的算法在负载均衡水平上比最大 SINR 关联方法和“最大 SINR+UAV 位置优化”方法分别提升了 52.56% 和 7.63%,具有显著提升负载均衡效果的优势。

**关键词:** 负载均衡; UAV 通信; 用户关联; 位置优化; 用户离散程度

**中图分类号:** TN929.53 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Research on a load balancing algorithm based on utility function in UAV-assisted networks

Han Dongsheng<sup>1,2</sup> Li Xinyue<sup>1</sup> Shi Tianhao<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** UAV plays an important role in wireless networks due to the advantages of high mobility and high line-of-sight communication probability. However, in a multi-UAV system, the traditional user association method cannot meet the on-demand deployment of UAV, and there is a problem that the load is imbalanced. To this end, a utility function is first constructed, which comprehensively considers three factors: the user's received signal-to-interference-to-noise ratio, the UAV's load, and the spatial dispersion of the set of users served by the same UAV. Second, network load balancing is achieved by solving the utility maximization problem. In order to solve this mixed integer nonlinear non-convex problem, a load balancing algorithm based on utility function is proposed, which decomposes the original problem into two sub-problems of user association and UAV location optimization for iterative solution. Given the location of the UAV, a user association algorithm based on the maximum utility is proposed to obtain the best user association scheme. Based on the current best user association scheme, an improved distributed ordinal location optimization algorithm is proposed to obtain the best UAV location. Finally, by solving the user association and UAV location optimization sub-problems iteratively, the optimal user association scheme and UAV location can be obtained. The simulation results show that the proposed algorithm improves the load balancing level by 52.56% and 7.63% respectively compared with the maximum SINR association method and the "maximum SINR + UAV location optimization" method, which has the advantage of significantly improving the load balancing effect.

**Keywords:** load balancing; UAV communication; user association; location optimization; user discrete degree

### 0 引言

UAV 由于具有高移动性和灵活性等优势可以在无线

网络中按需部署<sup>[1]</sup>。同时其空对地信道的高视距概率特性也为高质量的空中服务提供保障<sup>[2]</sup>。基于这些优势,在最近几年中,许多工作都致力于 UAV 辅助无线网络的研究。

收稿日期:2022-03-02

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(61771195)、中央高校基本科研业务费专项资金(2020MS098)、河北省省级科技计划(SZX2020034)项目资助

例如,UAV 在不同应用场景下对地面网络的临时支持作用。在自然灾害后,UAV 可用于替代受损的地面基站以保障受灾区域的应急通信<sup>[3]</sup>。它们还可以用来对没有部署地面蜂窝网络的偏远地区提供覆盖<sup>[4]</sup>。在临时大型活动中,可以部署 UAV 以满足用户对移动数据的高需求并扩大网络容量。UAV 还可以充当动态中继进行数据采集。

尽管 UAV 辅助无线通信的应用很有吸引力,同时现有研究针对单 UAV 辅助无线通信也逐渐成熟,但由于单个 UAV 的服务能力有限,无法进行大面积的区域覆盖。因此,多 UAV 通信系统逐渐成为研究的焦点并得到越来越多的关注。但是对于多 UAV 系统,它们的高效部署仍然面临着两大基本挑战。一方面是如何寻找 UAV 的最佳位置来使 UAV 更接近用户密集区域,减少路径损耗和干扰以保障用户的服务质量<sup>[5]</sup>。文献[6]采用圆形堆积理论,确定 UAV 的最优位置,以最大化总覆盖区域和服务时间。UAV 的 3D 位置问题也在文献[7]中通过将水平和垂直坐标解耦来解决,其目标是最大化覆盖用户的数量。

另一方面,用户关联问题也是一个非常值得探究的部分。这是因为 UAV 辅助通信网络的整体性能是与关联的用户数目以及用户接收到的服务质量密切相关的<sup>[8]</sup>。在传统的用户关联方法中,用户被分配给能提供最大接收 SINR 的基站。但这种仅基于距离的用户关联方式可能造成有些基站高度拥挤而有些基站的资源得不到充分利用,进而导致负载均衡问题出现。值得注意的是,对于地面无线网络,许多文献已经研究了类似的用户关联问题,并且实现了负载均衡。在文献[9]中,作者考虑了最大和效用关联,它可以将低速率用户从高功率基站卸载到低功率基站,其中效用表示为长期速率的对数函数。但是地面基站具有位置固定的天然劣势,而 UAV 具有按需部署的优势。因此,通过联合考虑 UAV 位置与用户关联,就能更好地解决 UAV 辅助无线网络负载均衡的问题。

在现有的研究中,许多文献同时针对 UAV 位置以及用户关联问题展开了大量的研究。文献[10]和[11]通过联合优化 UAV 位置以及 UAV-用户的关联来最大化对用户的覆盖。在文献[10]中,作者提出一种解耦算法,该算法首先利用匹配理论确定用户关联方案,然后利用 K-means 算法将 UAV 置于最优 2D 位置。文献[11]提出了一种社交蜘蛛优化算法来确定 UAV 位置及用户关联方案。文献[12]针对传输功率最小化问题,在考虑每个用户的 SINR 约束的情况下联合优化了 UAV 位置以及用户关联策略。在文献[13]中,作者还同时考虑了功率控制和信道接入等因素,并采用一种基于块坐标下降算法的迭代机制达到最小的能源消耗。在时延和回程链路受限的情况下,文献[14]通过利用 K-means 算法和粒子群优化算法,联合优化用户关联策略和 UAV 位置来最大化用户的和对数速率。相似地,文献[15]在带宽和用户服务质量受限的情况下提出一个分布式算法,该算法允许 UAV 动态寻找他们

的最佳位置,并与地面用户关联,同时最大化网络和速率。其中,原始优化问题被分解为二维 UAV 定位、高度优化和用户关联优化 3 个子问题。再有,文献[16]在联合优化 UAV 位置以及用户关联的情况下,采用博弈论思想和子模块最大化方法来最大化和速率。文献[10-16]虽然都联合优化了 UAV 位置以及用户关联策略,但是没有综合考虑多个 UAV 之间的负载均衡以及 UAV 与其服务用户的密集程度问题。即使可以达到广覆盖、能耗最小或容量最大等性能的提升,但这都可能以出现 UAV 负载不均衡为代价获得的。同时 UAV 与服务用户的距离没有得到保证,在用户密集区域无法得到更佳的网络性能提升。

为此,该文提出了一种适用于多 UAV 系统的负载均衡方法。首先,该文综合考虑用户的接收 SINR、UAV 负载以及每个 UAV 所服务的用户集合在空间上的离散系数等 3 个因素来建立效用最大化问题。但由于用户关联变量的约束,该文研究的效用最大化问题是一个混合整数非线性问题,同时用户关联变量和 UAV 位置存在耦合,是非凸的,直接求解是很困难的。为此,该文将原始问题分解为两个子问题:用户关联子问题和 UAV 位置优化子问题,进而分别使用该文提出的基于效用最大的用户关联算法以及改进的分布式按序位置优化算法进行求解。

## 1 系统模型

如图 1 所示,该文考虑的是下行的基于 UAV 辅助无线网络。区域  $D$  包含  $N$  个 UAV 基站以及  $M$  个地面用户,为了降低系统的复杂度,它们均配备单天线。多天线的情况甚至是大规模 MIMO 系统<sup>[17-18]</sup>仅会使接收信号由数值形式转变为矩阵形式而对系统结构没有影响。因此,该文研究的内容对于 UAV 基站和地面用户均配备多天线的情况同样适用。UAV 基站共享相同的带宽为用户提供下行服务,为了减少干扰,每个 UAV 基站均采用正交频分多址方式进行数据传输。分别用  $I \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$  和  $J \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$  表示在区域  $D$  内随机分布的用户以及 UAV 基站集合。 $i \in I, j \in J$  分别表示任意用户  $i$  和 UAV 基站  $j$ 。假设所有 UAV 基站的高度均固定为  $H$ ,但可以进行水平移动来更接近用户密集区域。任意 UAV 基站  $j$  的水平坐标表示为  $\mathbf{q}_j = (x_j, y_j), \forall j \in J$ , 任意用户  $i$  的坐标表示为  $\omega_i = (x_i, y_i), \forall i \in I$ 。此外,设定 UAV 基站可以同时服务多个用户,而每个用户在同一时隙只能关联至一个 UAV 基站。在不考虑 UAV 基站负载上限的条件下,可以保证每一个用户均有 UAV 基站来为其提供服务。

为了表征 UAV 基站和地面用户之间的信道变化,采用常用的空对地信道模型<sup>[19]</sup>。在此模型中,通信链路主要由视距链路(LoS)和非视距链路(NLoS)两部分组成。它们的概率主要取决于 UAV 基站的高度以及 UAV 基站与地面用户之间的仰角  $\theta$ 。对于高度固定为  $H$  的 UAV 基站  $j$  和地面用户  $i$ ,LoS 的概率可以表示为<sup>[20]</sup>:

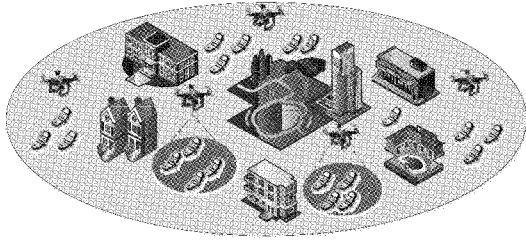


图 1 系统模型

$$p_{ij}^{LoS} = \frac{1}{1 + \epsilon \exp \left[ -\kappa \left( \frac{180}{\pi} \arctan \left( \frac{H}{r_{ij}} \right) - \epsilon \right) \right]} \quad (1)$$

其中,  $H$  是 UAV 基站  $j$  的固定高度,  $r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$  是 UAV 基站  $j$  到用户  $i$  的距离在地面上的投影。 $\epsilon$  和  $\kappa$  是取决于环境的常量, UAV 基站  $j$  的仰角表示为  $\theta = (180/\pi) \arctan(H/r_{ij})$ 。因此, UAV 基站  $j$  到地面用户  $i$  的大尺度衰落可以表示为:

$$h_{ij} = \left( \frac{4\pi f d_{ij}}{c} \right)^\alpha (\zeta_{LoS} p_{ij}^{LoS} + \zeta_{NLoS} (1 - p_{ij}^{LoS}))^{-1} \quad (2)$$

其中,  $f$  代表的是载波频率,  $c$  是光速,  $\alpha$  是路径损耗指数,  $d_{ij}$  是 UAV 基站  $j$  到地面用户  $i$  之间的距离, 参数  $\zeta_{LoS}$  和  $\zeta_{NLoS}$  分别表示 LoS 和 NLoS 链路的额外损失。式(2)表示为 dB 形式的路损为:

$$L_{ij}^{dB} = -10 \lg(h_{ij}) \quad (3)$$

设定 UAV 基站  $j$  发送给地面用户  $i$  的信号表示为  $s_{ij}$  且  $\mathbb{E}(|s_{ij}|^2) = 1$ , 那么地面用户  $i$  接收到的来自 UAV 基站  $j$  的信号为:

$$z_{ij} = \sqrt{P_j} h_{ij} g_{ij} s_{ij} + \sum_{l \in J, l \neq j} \sqrt{P_l} h_{il} g_{il} s_{il} + n_{ij} \quad (4)$$

其中, 第 1 项是用户  $i$  接收到的有用信号,  $P_j, \forall j \in J$  是 UAV 基站  $j$  的发射功率,  $\sqrt{h_{ij}} g_{ij}$  代表的是 UAV 基站  $j$  与用户  $i$  之间的信道增益,  $g_{ij}$  是小尺度衰落且  $\mathbb{E}(|g_{ij}|^2) = 1$ ; 第 2 项则是来自其他 UAV 基站的干扰; 第 3 项  $n_{ij}$  是高斯白噪声。当 UAV 基站  $j$  发射信号时, 用户  $i$  的接收功率为  $P_j h_{ij} |g_{ij}|^2$ 。假设 UAV 按序移动, 当它们悬停时, 任意 UAV 基站  $j$  与用户  $i$  之间的信道是已知且不变的。无线链路的质量以接收信号的 SINR 来评估, 则对于用户  $i$  接收到的来自 UAV 基站  $j$  的信号的 SINR 可以表示为:

$$\gamma_{ij} = \frac{P_j h_{ij} |g_{ij}|^2}{\sigma^2 + \sum_{l \in J, l \neq j} P_l h_{il} |g_{il}|^2} \quad (5)$$

其中,  $\sigma^2$  代表高斯白噪声的功率。此外, 设定关联过程中信道随时间平稳变化。SINR 在关联过程中取平均值, 在此忽略信道的快衰落变化且环境条件确定。根据香农公式, 用户  $i$  接收到的来自 UAV 基站  $j$  的单位带宽速率为:

$$R_{ij} = \log_2(1 + \gamma_{ij}) \quad (6)$$

假设用户  $i$  实际得到的来自 UAV 基站  $j$  的带宽为

$b_{ij}$ , 则其得到的来自 UAV 基站  $j$  的实际速率为:

$$R_i = b_{ij} R_{ij} \quad (7)$$

## 2 问题陈述

针对传统基站的位置固定以及传统的用户关联方法所产生的负载不均衡等问题, 该文综合考虑用户的接收 SINR 以及系统中每个 UAV 基站的负载情况两种因素。同时由于 UAV 基站可以改变水平位置来更接近用户密集区域, 因而由同一个 UAV 基站提供服务的用户可以得到更加公平且均衡的服务。为此, 该文引入用户离散系数来表征关联至同一个 UAV 基站的用户在空间上的离散程度。基于上面的 3 种因素, 该文提出一个联合 UAV 基站水平位置以及 UAV-用户关联的效用函数。具体的构造效用函数的过程如下。

### 1) UAV 基站的负载

该文定义关联指标  $a_{ij} \in \{0, 1\}$  表示用户  $i$  与基站  $j$  之间的关联情况, 当  $a_{ij} = 1$  时表示用户  $i$  关联到 UAV 基站  $j$ , 反之  $a_{ij} = 0$ 。由于用户在同一时隙至多只能关联到一个基站, 因此可以表示为  $\sum_{j \in J} a_{ij} = 1, \forall i \in I$ 。UAV 基站  $j$  的负载即关联至 UAV 基站  $j$  的用户数表示为  $S_j = \sum_{i \in I} a_{ij}, \forall j \in J$ , 其接入用户集合表示为  $U_j$ 。考虑到 UAV 基站  $j$  可能存在关联的用户数为 0 的情况, 因此该文重新定义 UAV 基站  $j$  的负载为  $\eta_j = S_j + 1$ 。

### 2) 关联至同一 UAV 基站的用户离散程度

该文使用变量  $\bar{d}_{ij}$  表示关联至同一 UAV 基站  $j$  的多个用户与 UAV 基站  $j$  之间距离的均值。其表示如下:

$$\bar{d}_{ij} = \frac{\sum_{i \in U_j} d_{ij}}{\eta_j} \quad (8)$$

该文使用标准差来表征关联至同一 UAV 基站  $j$  的用户在空间上的离散程度, 因此定义用户离散系数为:

$$\xi_j = \sqrt{\frac{\sum_{i \in U_j} (d_{ij} - \bar{d}_{ij})^2}{\eta_j}} \quad (9)$$

由式(9)可知, 当  $\eta_j > 1$  时, 用户离散系数  $\xi_j$  越大, 说明关联至 UAV 基站  $j$  的用户与 UAV 基站  $j$  的距离差异越大, 用户离散程度也越高, 因此用户得到的服务质量的差异也越大。反之, 则用户越密集, 用户得到的服务也会更加均衡。通过上面的分析, 该文构造的效用函数表达式为:

$$\varphi_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{\xi_j \eta_j} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 该文所构造的效用函数既反映了用户  $i$  接收到的来自 UAV 基站  $j$  的信号强度也反映了 UAV 基站  $j$  的负载情况, 同时还考虑了关联至 UAV 基站  $j$  的用户在空间上的离散程度。通过优化 UAV 基站的水平位置, UAV 基站可以定位到用户密集区域, 减小用户离散系数, 同时可以采用有效的用户关联算法, 提升用户的服务质量并促进 UAV 基站间的负载均衡。

该文的目标是通过联合优化 UAV 的水平位置  $\mathbf{q}_j = (x_j, y_j)$ ,  $\forall j \in J$  以及 UAV 基站-用户关联  $a_{ij}$  来最大化总的效用函数以实现负载均衡,因此问题如下:

$$\max_{a_{ij}, \mathbf{q}_j} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} a_{ij} \varphi_{ij} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in J} a_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (12)$$

$$a_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

$$x^{\min} \leq x_j \leq x^{\max}, \forall j \in J \quad (14)$$

$$y^{\min} \leq y_j \leq y^{\max}, \forall j \in J \quad (15)$$

式(12)表明同一时隙每个用户只能关联一个 UAV 基站。式(13)表明关联指标的取值为 0 或 1。式(14)和(15)表明 UAV 基站需位于目标区域  $D$  内。实际上,目标函数式(11)和(13)是非凸的,所以式(11)是一个混合整数非线性问题,这在数学上是很难直接处理的。

为了解决这个非凸问题,通过采用将原始的问题分解为用户关联子问题和 UAV 位置子问题的方法来寻求最优解。首先,给定 UAV 基站的位置来求解用户关联子问题。这个子问题的表达式如下:

$$(\mathbf{P1}) \max_{a_{ij}} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \frac{a_{ij} \gamma_{ij}}{\xi_j (S_j + 1)} \quad (16)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in J} a_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (17)$$

$$a_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, j \in J \quad (18)$$

其次,当用户关联方案  $\{a_{ij}\}$  固定时, UAV 位置子问题如下:

$$(\mathbf{P2}) \max_{\mathbf{q}_j} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \frac{a_{ij} \gamma_{ij}}{\xi_j (S_j + 1)} \quad (19)$$

$$\text{s. t. } x^{\min} \leq x_j \leq x^{\max}, \forall j \in J \quad (20)$$

$$y^{\min} \leq y_j \leq y^{\max}, \forall j \in J \quad (21)$$

### 3 基于效用函数的负载均衡算法

正如上一节所述,式(11)问题在数学上求解起来是非常困难的,利用经典的凸优化方法来直接求解几乎是不可能的。因此,该文将所研究的问题分解成为两个子问题(P1)和(P2),然后提出了两个低复杂度的算法分别求解用户关联子问题和 UAV 位置优化子问题并得到稳定的解。

#### 3.1 基于效用最大的用户关联算法

为了处理目标问题,首先,假设 UAV 基站的位置固定。当 UAV 基站的关联用户数  $S_j > 0$  时,用户与 UAV 基站之间效用函数表示为:

$$\varphi_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{\xi_j (S_j + 1)} \quad (22)$$

当 UAV 基站的关联用户数  $S_j = 0$  时,用户与 UAV 基站之间效用函数表示为:

$$\varphi_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{S_j + 1} \quad (23)$$

因此该文提出了一种用户关联算法为用户选择最佳的 UAV 基站,如算法 1 所示,基于最大效用的用户关联算法

为用户选择效用值最大的 UAV 基站进行关联。首先,初始化每个 UAV 基站所关联的用户列表(第 1 行)。其次,每一个用户根据式(22)和(23)计算关联至每一个 UAV 基站所能够得到的效用函数值的大小(第 5~6 行)。然后每一个用户根据计算的结果选择提供最大效用函数值的 UAV 基站进行关联(第 8 行),并更新所有 UAV 基站的关联用户(第 9 行)。因此,根据基于最大效用的用户关联算法,用户  $i$  选择的 UAV 基站为:

$$j^* = \operatorname{argmax}_{j \in J} \Phi_{ij}^N \quad (24)$$

其中,  $\Phi_{ij}^N$  表示存储用户  $i$  与所有基站的效用函数值的集合。当用户  $i$  关联至 UAV 基站  $j^*$  时,用户  $i$  可以获得最大的效用函数值。

---

#### 算法 1 基于效用最大的用户关联算法

---

1. 输入:初始关联指标、UAV 位置、用户位置
  2. 输出:用户关联方案  $\{a_{ij}\}$ ,  $\forall i \in I, j \in J$
  3. 对于任意 UAV 以及用户,  $\Phi_{ij}^N = \emptyset$
  4. 计算每个 UAV 服务的用户数  $S_j$
  5. for  $i \in I$  执行
  6.   for  $j \in J$  执行
  7.     if  $S_j > 0$  then  $\varphi_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{\xi_j (S_j + 1)}$
  8.     else  $\varphi_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{S_j + 1}$
  9.      $\Phi_{ij}^N = \Phi_{ij}^N \cup \varphi_{ij}$
  10.    $j^* = \operatorname{argmax}_{j \in J} \Phi_{ij}^N$
  11.    $a_{ij^*} = 1$
- 

#### 3.2 分布式按序位置优化算法

在得到用户关联方案后,进一步处理 UAV 位置子问题。该文的目标是在给定用户关联方案的条件下,通过优化 UAV 基站位置使得 UAV 更加接近用户密集区域以便用户的通信链路质量得以提升。为此,该文基于经典的 K-means 算法<sup>[21]</sup>提出了一种改进的分布式按序位置优化算法,如算法 2 所示。

---

#### 算法 2 分布式按序位置优化算法

---

1. 输入:用户分关联方案、用户位置
  2. 输出:每个 UAV 的位置
  3. 对于任意 UAV,  $\mathbf{U}_j = \emptyset$
  4. for  $j \in J$  执行
  5.   for  $i \in I$  执行
  6.     if  $a_{ij} = 1$  then
  7.        $\mathbf{U}_j = \mathbf{U}_j \cup \{i\}$
  8.      $x_j = \frac{\sum_{i \in \mathbf{U}_j} x_i}{|\mathbf{U}_j|}, y_j = \frac{\sum_{i \in \mathbf{U}_j} y_i}{|\mathbf{U}_j|}$
-

通过该算法,可以将 UAV 基站定位在其服务用户集合的重心上,保证 UAV 与其服务的用户的距离更近。首先,给定  $K=N$  个 UAV 基站的初始水平位置(第 1 行),该算法使用 3.1 节中求得的用户关联方案对用户进行分组即确定每一个 UAV 的接入用户集合(第 5 行)。其次,每个 UAV 基站的水平位置被更新为它的服务用户集合  $U_j$  的重心(第 6 行)。

### 3.3 基于效用函数的负载均衡算法

该文提出的基于效用函数的负载均衡算法如算法 3 所示。通过给定 UAV 位置,获得当前最佳的用户关联方案(第 3 行),再利用改进的分布式按序位置优化算法更新当前所有 UAV 位置(第 4 行)。直到用户关联方案或所有 UAV 基站的位置不再发生变化,则迭代停止(第 5 行),此时可以获得最大的效用函数值。

#### 算法 3 基于效用函数的负载均衡算法

1. 输入:初始关联指标、UAV 位置、用户位置
2. 输出:用户关联方案、UAV 最终位置
3. repeat
4. 给定 UAV 位置,根据算法 1 更新  $\{a_{ij}\}$
5. 给定用户关联方案  $\{a_{ij}\}$ ,根据算法 2 更新每个 UAV 水平位置
6. until 用户关联方案  $\{a_{ij}\}$  或 UAV 基站的水平位置不再发生变化。

## 4 仿真结果

为了研究该文提出的基于效用函数的负载均衡算法的性能,该文考虑的是一个面积为  $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}$  的城市区域  $D$ 。在区域  $D$  内,随机分布且能水平移动的 10 个 UAV 基站为同样随机分布且位置固定的 200 个地面用户提供服务。对于空对地信道,当 UAV 放置在一个足够高的高度时,可以设定其 LoS 概率为  $1^{[1]}$  即  $p_{ij}^{\text{LoS}} \approx 1$ 。该文余下的仿真参数设置如表 1 所示。为了进一步评估该文所提出的算法性能,将该文提出的负载均衡算法与传统的用户关联方法进行对比。其中,最大 SINR 关联方法与“最大 SINR+UAV 位置优化”方法的关联原理如下。

1)最大 SINR 关联方法:UAV 基站位置固定,用户选择能提供最大 SINR 的 UAV 基站进行关联。

2)“最大 SINR+UAV 位置优化”方法:首先,使用最大 SINR 关联方法将用户关联至能提供最大 SINR 的 UAV 基站,其次,通过采用该文提出的分布式按序优化算法优化 UAV 位置。最后连续迭代求解用户关联子问题和 UAV 位置子问题。

3)该文提出的算法:应用该文提出的基于效用函数的负载均衡算法来求解式(11)问题。

表 1 仿真参数

符号	参数	值
$H$	UAV 高度/m	100
$f$	UAV 载波频率/GHz	2
$P_j$	UAV 发射功率/dBm	30
$L^{dB}$	UAV 路损/dB	$128.1+37.6\lg(d)$
$\sigma^2$	噪声功率/dBm	-104
$B$	带宽/Hz	1

图 2 描述了在 UAV 位置固定时,基于最大 SINR 关联方法 UAV 与用户的关联情况。其中,正方形代表 UAV,黑点代表地面用户,实线表示 UAV 与地面用户关联。从图 2 可以看出,各个 UAV 基站之间的负载是很不均衡的,有的 UAV 基站服务的用户很多且用户与为其提供服务的 UAV 基站之间的距离差异较大。即使是距离为其提供服务的 UAV 基站较远且通信质量不能得到保障时,有些用户为了得到服务也只能选择与之关联。而有的 UAV 基站服务的用户则很少导致资源闲置。这是由于此时 UAV 的位置固定,不能根据用户的空间分布特点以及离散情况按需调整自身的水平位置。同时基于最大 SINR 关联方法,用户只根据接收到的 SINR 来选择关联的 UAV 但并不考虑 UAV 基站的负载情况以及系统的负载均衡度,这就使得大部分用户会选择相同的 UAV 为其提供服务,而部分 UAV 基站则只有少量用户与之关联。

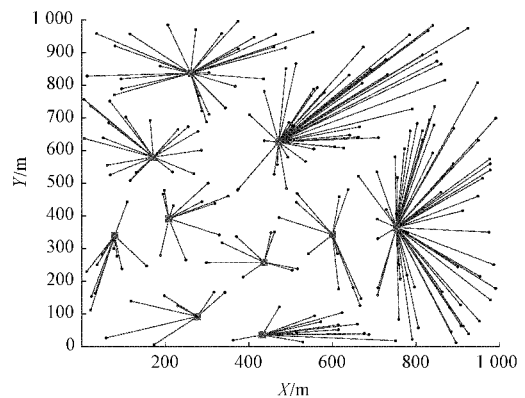


图 2 基于最大 SINR 关联方法中 UAV-用户关联图

图 3 描述了在联合应用最大 SINR 关联策略以及分布式按序位置优化算法的情况下 UAV 与用户的关联情况。通过与图 2 对比来看,UAV 之间的负载不均衡程度有所减小且用户与为其提供服务的 UAV 基站之间的距离差异减小,但依旧存在着有些基站负载过重,而有的基站所服务的用户相对较少的情况。这是由于 UAV 虽然可以水平移动来更加接近用户密集区域使得由同一 UAV 服务的用户的空间离散系数降低,但是 UAV 的位置更新是与关联至它的用户集合紧密相关的,而最大 SINR 关联策略依旧会造成较多的用户关联至相同的 UAV 基站。

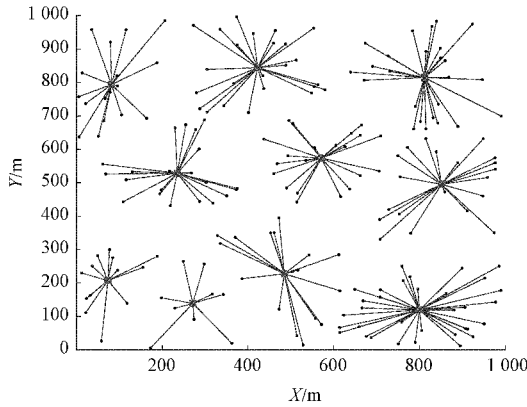


图 3 “最大 SINR+UAV 位置优化”方法中 UAV-用户关联图

图 4 描述了应用该文提出的基于效用函数的负载均衡算法通过优化 UAV 水平位置和用户关联,得到的 UAV 与用户的关联情况。从图 4 可以看出,各个 UAV 基站之间的负载均衡效果得到了很大地提升,同时 UAV 基站与其提供服务的用户集合之间的距离差异缩小,这意味着每个 UAV 基站服务的用户在空间上的离散系数相对较小,得到的服务质量更加公平且均衡。这是由于通过该文提出的分布式按序位置优化算法 UAV 可以更接近其服务的用户集合,缩小用户与为其提供服务的 UAV 基站之间的距离差异,而且基于效用最大的用户关联算法同时考虑了用户接收 SINR、UAV 的负载以及同一 UAV 服务的用户在空间上的离散程度 3 种因素使得 UAV 基站之间的负载更加均衡。

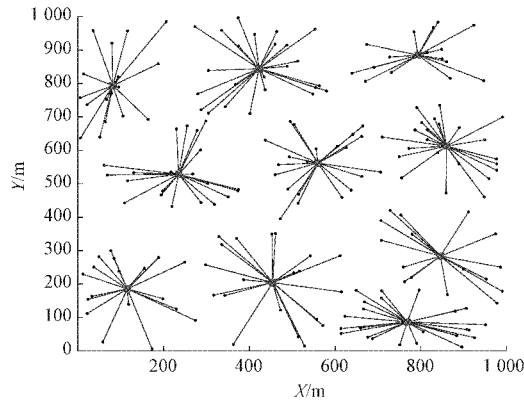


图 4 该文提出的算法中 UAV-用户关联图

图 5 描述了最大 SINR 关联策略、“最大 SINR+UAV 位置优化”方法以及该文提出的基于效用函数的负载均衡算法 3 种情况下,每个 UAV 基站的负载情况。图 5 更加直观地表明了最大 SINR 关联方法造成严重的负载不均衡问题,有些 UAV 基站负载过重(例如 UAV1 和 UAV6),而有些 UAV 基站却服务很少的用户(例如 UAV4 和 UAV8)。同时,在图 5 中,可以看出“最大 SINR+UAV 位置优化”方法在一定程度上将过载 UAV 基站上的用户转

移到了负载较轻的 UAV 上,但依旧存在负载不均衡的现象,比如 UAV9 的负载过重,而 UAV4 仍然服务很少的用户。而该文提出的基于效用函数的负载均衡算法将负载转移到服务用户过少的 UAV 基站,且转移后没有使原本负载较轻的 UAV 基站过载。这表明该文提出的算法进一步有效改善了负载不均衡现象。

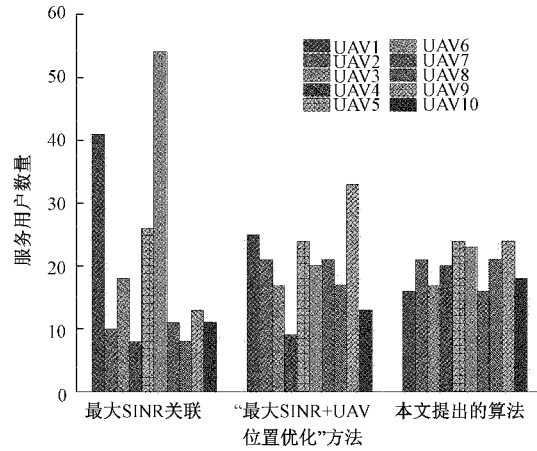


图 5 3 种情况下负载分配对比图

图 6 显示了 3 种不同情况下的负载均衡水平。最大 SINR 关联策略由于只考虑每个用户能得到的最大 SINR,完全不考虑 UAV 基站的负载情况以及用户所能得到的实际速率,所以相比于其他两种情况,当用户关联至能提供最大 SINR 的 UAV 基站且 UAV 基站的位置固定时,整个系统拥有最低的负载均衡水平,各个 UAV 基站服务的用户数量差异最大,负载均衡的效果最差。采用“最大 SINR+UAV 位置优化”方法虽然用户仍然选择能提供最大 SINR 的 UAV 基站进行关联,但可以通过优化 UAV 基站的位置使其移动至其服务用户集合的重心上,这样 UAV 基站距离用户密集区域更近,由同一 UAV 基站服务的用户的空间离散系数更小,所得到的服务质量就更加公平,因此,负载均衡水平更高。从数值结果上看,该文提出的基于效用函数的负载均衡算法比前两种方法在负载均衡水平上分别提升了 52.56% 和 7.63%,这不仅由于 UAV 基站的位置是可移动的,还因为基于效用最大的用户关联算法同时考虑了用户的 SINR、UAV 基站的负载以及关联至同一 UAV 基站的用户在空间上的离散程度,保障了系统的负载均衡水平以及用户的服务质量的均衡性。

图 7 对比了 3 种不同情况下用户的平均速率。从图中可以看出平均速率对比情况:最大 SINR 关联策略 < “最大 SINR+UAV 位置优化”方法 < 该文提出的算法。这是由于最大 SINR 关联策略不考虑 UAV 基站的负载只关注用户的接收 SINR,这种用户关联方法容易造成严重的负载不均衡,用户虽然能得到最大 SINR,但由于每个 UAV 基站的资源是有限的,当 UAV 基站过载时,关联至它的用户所能得到的实际速率并不高。“最大 SINR+UAV 位置优

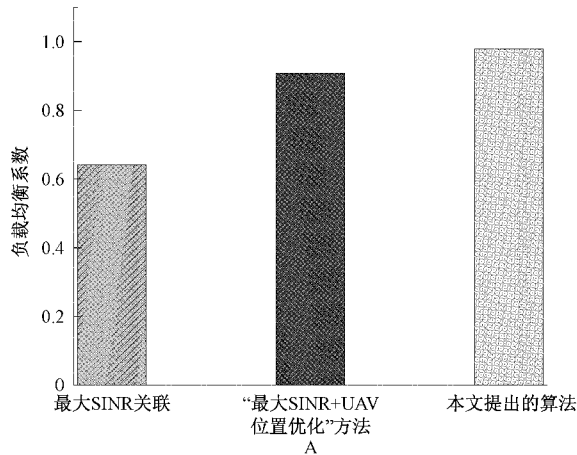


图 6 3 种情况下负载均衡水平对比图,负载均衡系数的表达式为  $v = (\sum_{j \in J} S_j)^2 / (N \sum_{j \in J} S_j^2), v \in [1/N, 1]$

化”方法的平均速率大约是最大 SINR 关联策略的 2 倍,这是因为每个用户均关联至能提供最大的 SINR 的 UAV 基站,同时 UAV 的按序移动一定程度上减小了系统的负载不均衡水平,使得用户能得到的实际速率有所提升。该文提出的算法联合考虑了用户的接收 SINR 以及系统的均衡水平,所以它的平均速率最大。

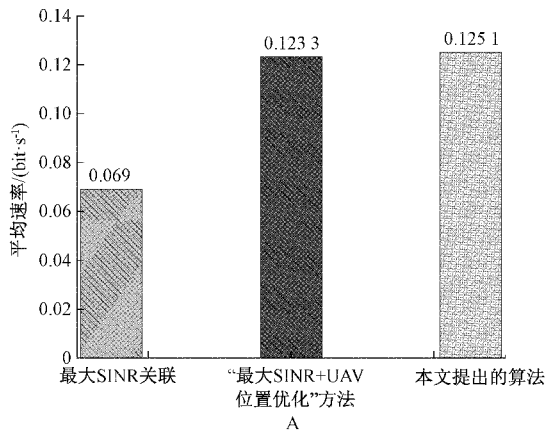


图 7 3 种情况下用户平均速率对比图

图 8 和 9 分别表示基于“最大 SINR+UAV 位置优化”方法和基于效用函数的负载均衡算法下 UAV 的初始和最终位置。UAV 从初始水平位置开始(圆圈),通过有限的步数到达最终位置(正方形),最终水平位置即为它们所服务的用户的重心。联合图 3 和 4,可以看出 UAV 可以按需移动到其服务用户集合的上方,这使得 UAV 可以更接近其服务的用户来保障更好的通信质量。同时每一个 UAV 基站所服务的用户集合在空间上也更为密集且负载也更加均衡。当采用“最大 SINR+UAV 位置优化”方法时,即使 UAV 可以动态的移动到用户密集的区域为用户提供服务,但是由于仍然有大量的用户选择了同一个提供最大 SINR 的 UAV 基站,负载均衡效果虽有提升但不是最佳。

相反的,从图 9 中可以看到,通过采用该文提出的基于效用函数的负载均衡算法,不仅可以按序动态部署 UAV 到用户更密集的区域,而且在考虑 UAV 负载的情况下,让用户选择服务质量较好的 UAV。联合考虑用户服务质量和网络负载均衡情况,达到网络整体性能更佳。

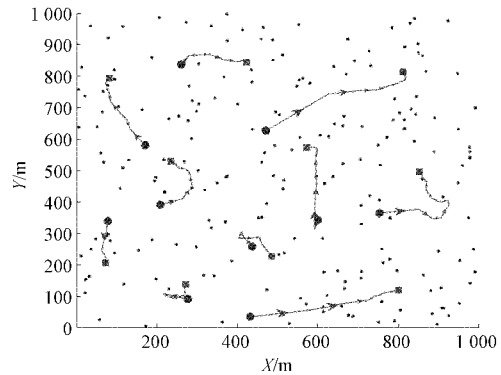


图 8 “最大 SINR+UAV 位置优化”方法中 UAV 始末位置移动图

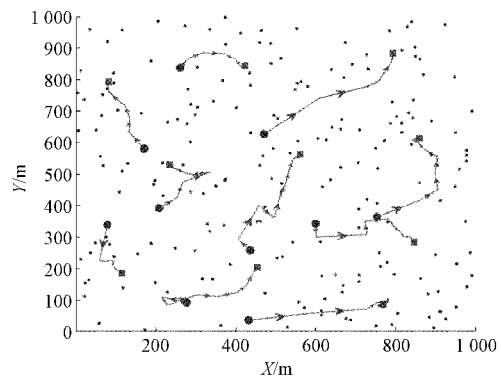


图 9 该文提出的算法中 UAV 始末位置移动图

图 10 分别给出了“最大 SINR+UAV 位置优化”方法和基于效用函数的负载均衡算法总效用函数值与迭代次数的变化曲线。可以看到,采用“最大 SINR+UAV 位置优化”方法网络的总效用值随迭代次数先急剧上升,之后缓慢下降,在第 15 次迭代后趋于稳定。基于该文提出的算法总

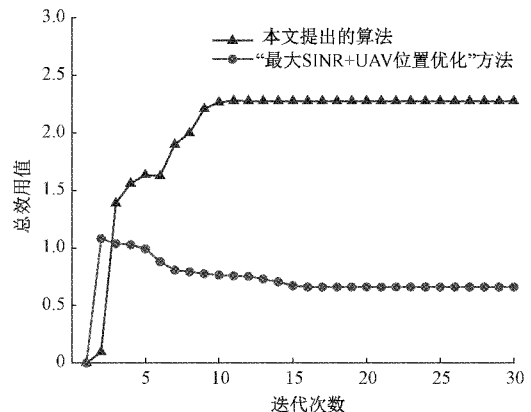


图 10 迭代图

效用值随着迭代次数先增加,在第 10 次迭代结束之后保持稳定。该文提出算法的总效用值大约是“最大 SINR+UAV 位置优化”方法的 3.5 倍。对比这两种算法可以看出,“最大 SINR+UAV 位置优化”方法收敛速度慢,同时随着迭代开始效用值有明显的下降的趋势,这对于网络性能提升是不利的。而该文提出的基于效用函数的负载均衡算法具有较快的收敛速度,同时可以保证网络达到较高的性能。

## 5 结 论

该文研究了一个 UAV 辅助无线通信网络的负载均衡问题。为了实现网络的负载均衡,该文利用 UAV 可以快速移动、按需部署的优势,综合考虑用户的接收 SINR、每个 UAV 的负载情况以及同一个 UAV 服务的用户集合在空间上的离散系数以最大化总效用函数。为了实现效用函数的最大化,同时避免由于问题的非凸性带来的求解困难,该文提出了基于效用函数的负载均衡算法,通过连续迭代求解用户关联子问题和 UAV 位置优化子问题获得最优的总效用值。其中,该文提出了低复杂度的基于效用最大的用户关联算法和分布式按序位置优化算法来分别求解这两个子问题,在保证最优解稳定的情况下降低求解算法的复杂度,提高了算法的收敛性。通过与最大接收 SINR 用户关联方法以及“最大 SINR+UAV 位置优化”方法对比,仿真结果表明该文提出的负载均衡算法可以使得 UAV 更加接近用户密集区域,提高用户的平均速率同时实现网络内 UAV 之间的负载均衡。

## 参考文献

- [1] WU Q Q, ZENG Y, ZHANG R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109-2121.
- [2] ZHOU Y, PAN C H, YEOH P L, et al. Secure communications for UAV-Enabled mobile edge computing systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(1): 376-388.
- [3] 马丁. 基于无人机辅助无线通信性能优化研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.
- [4] 王花. 无人机空中基站的覆盖部署方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [5] LAKEW D S, MASOOD A, CHO S. 3D UAV placement and trajectory optimization in UAV assisted wireless networks[C]. 2020 International Conference on Information Networking(ICOIN), 2020: 80-82.
- [6] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(8): 1647-1650.
- [7] 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.
- [8] GUAN X, HUANG Y, DONG C, et al. User association and power allocation for UAV-assisted networks: A distributed reinforcement learning approach[J]. *China Communications*, 2020, 17(12): 110-122.
- [9] YE Q Y, RONG B Y, CHEN Y D, et al. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6): 2706-2716.
- [10] FAROOQ M J, ZHU Q Y. A multi-layer feedback system approach to resilient connectivity of remotely deployed mobile internet of things [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2018, 4(2): 422-432.
- [11] CHAALAL E, REYNAUD L, SENOUCI S M. A social spider optimisation algorithm for 3D unmanned aerial base stations placement [C]. 2020 IFIP Networking Conference(Networking), 2020: 544-548.
- [12] LIU Y M, LIU K, HAN J L, et al. Resource allocation and 3-D placement for UAV-enabled energy-efficient IoT communications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(3): 1322-1333.
- [13] SHANG B D, LIU L J. Mobile edge computing in the sky: Energy optimization for air-ground integrated networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 7443-7456.
- [14] KALANTARI E, BOR-YALINIZ I, YONGACOGLU A, et al. User association and bandwidth allocation for terrestrial and aerial base stations with backhaul considerations [C]. 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications(PIMRC), 2017: 1-6.
- [15] HAMMOUTI H E, BENJILLALI M, SHIHADA B, et al. Learn-as-you-fly: A distributed algorithm for joint 3D placement and user association in multi-UAVs networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(12): 5831-5844.
- [16] HAMMOUTI H E, HAMZA D, SHIHADA B, et al. The optimal and the greedy: Drone association and positioning schemes for internet of UAVs[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(18): 14066-14079.
- [17] 何怡刚,程彤彤,FARHAN A,等. 大规模 MIMO 系统下的低复杂度迫零预编码技术[J]. *电子测量与仪器学*



- 报, 2021, 35(6): 140-146.
- [18] 翟银浩, 张本鑫. 大规模 MIMO 系统信道估计的自适应步长梯度算法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 18-22.
- [19] KHAWAJA W, GUVENC I, MATOLAK D W, et al. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2361-2391.
- [20] HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [21] 邓聪颖, 叶波, 苗建国, 等. 基于 K-means++ 聚类与概率神经网络的数控机床变位姿动态特性模糊评估[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 227-235.

#### 作者简介

韩东升, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信新技术、电力系统通信。

E-mail: handongsheng@nccpu.edu.cn

李新月, 工学硕士, 主要研究方向为无线通信新技术。

E-mail: lxy20201030@163.com

史天浩, 工程硕士, 主要研究方向为无线通信新技术。

E-mail: shitianhao@nccpu.edu.cn