

# 无人机骨干网分布式组网及接入选择算法

吴炜钰<sup>1)</sup> 赵海涛<sup>2)</sup> 王海军<sup>2)</sup> 王 玲<sup>1)</sup> 魏急波<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

<sup>2)</sup>(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

**摘 要** 用无人机充当空中基站并组成骨干网为地面用户提供通信服务,在临时大型活动、抗震救灾、应急通信等方面有广阔应用前景。在无人机骨干网研究中有两个重要问题:一是如何对无人机集群进行合理部署,使其能够在对地面用户进行覆盖的同时维持骨干网的连通性;二是如何引导用户进行合适的接入选择,该选择既能使用户接入无人机骨干网后满足通信需求,又能最大化网络的负载均衡和接入成功率。为此,该文提出无人机骨干网分布式组网以及接入选择算法。部署算法通过感知地面用户,在虚拟力牵引下实现按需覆盖并维持稳定的双连接拓扑结构,同时还能记录无人机的最终位置和运动轨迹;接入选择算法分别侧重于信干噪比和无人机接入度数(负载数),提出三种无人机网络接入选择算法:最大信干噪比接入、满足信干噪比的随机接入以及满足信干噪比的最小度数接入,旨在最大化网络负载均衡和接入成功率。该算法在仿真实验中得到了验证,在双连接、按需覆盖之上更提高了网络整体性能。部署算法适用于用户和无人机聚集或分散、动态用户以及障碍等场景,且静态部署时间平均不超过300s;三种接入选择方法都收获了不小于78%的接入公平性以及92%以上的接入成功率,其中最小度数接入方法以额外的交互代价换取了86%以上的接入公平性和95%以上的接入率。

**关键词** 无人机;骨干网;按需覆盖;双连接;接入选择

**中图法分类号** TP393 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2019.00351

## Distributed Deployment and Access Selection Algorithm for UAV Airborne Networks

WU Wei-Yu<sup>1)</sup> ZHAO Hai-Tao<sup>2)</sup> WANG Hai-Jun<sup>2)</sup> WANG Ling<sup>1)</sup> WEI Ji-Bo<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

<sup>2)</sup>(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** The flexible and intelligent flying nature of unmanned aerial vehicle (UAV) makes it able to act as flying base stations and construct airborne networks, to provide multi-hop communication service for user equipments (UEs) on the ground, which is promising during temporary activities, such as the earthquake relief and emergency military communications. There are two crucial problems in UAV airborne networks: (1) how can UAVs autonomously move to the desired locations to fulfill on-demand coverage for UEs on the ground while maintaining connectivity of UAV airborne networks; (2) how to guide UEs to make proper access selection, which can satisfy the communication requirement of UEs after accessing while maximizing the load balancing and successful rate of communication access. However, the deployment in terms of on-demand coverage and connectivity and access selection of UEs towards access fairness have not been well studied. To this end, we come up with a distributed deployment and access selection algorithm for UAV

收稿日期:2018-01-17;在线出版日期:2018-10-06。本课题得到国家自然科学基金(61471376)资助。吴炜钰,女,1994年生,硕士研究生,主要研究方向为无线通信网络。E-mail: weiyuwu@hnu.edu.cn。赵海涛(通信作者),男,1981年生,博士,副教授,主要研究方向为认知无线网络、自组织网络、协同通信。E-mail: haitaozhao@nudt.edu.cn。王海军,男,1993年生,博士研究生,主要研究方向为无人集群智能接入、组网。王玲(通信作者),女,1962年生,博士,教授,主要研究领域为网络与通信技术。E-mail: wl\_hunu@163.com。魏急波,男,1967年生,博士,教授,主要研究领域为无线网络协议、通信信号处理。

airborne networks in this paper. Given limited number of UAVs, the deployment algorithm uses virtual forces to drag UAVs to realize on-demand coverage while maintaining the stable bi-connected topology by sensing the UEs on the ground, when information of only 1-hop UAVs and sensed UEs is used. The attractive forces are used for gathering and covering and the repulsive forces are used for autonomous move and collision avoidance of UAVs. The stop condition is that all UAVs are bi-connected and the coverage outage proportion is restricted below a predefined threshold. At the meantime it can record not only the final positions of UAVs but also the motion tracks of them. Our access selection algorithm puts different emphasis on the signal to interference and noise ratio (SINR) and the degree (load number) of each UAV, proposing three access selection methods: access in maximum SINR, random access based on SINR requirement and minimum degree access based on SINR requirement, which aims at maximizing the load balancing and successful rate of access of the whole network at the same time. Simulations further validate our proposed algorithm that it improves the performance of the network based on bi-connect topology and on-demand coverage. Firstly, our deployment algorithm can be applied in multiple scenarios where there are UEs distributed randomly or in cluster, initial UAVs departing dispersedly or from a base, dynamic UEs and obstacles. Moreover, note that the static deployment time achieved is no more than 300 seconds on average. Secondly, the three access selection methods make great harvest in access fairness and successful ratio of access which are no less than 78% and 92% respectively, among which the minimum degree access reaps at least 86% access fairness and 95% ratio of access with extra interaction cost. Last but not least, it turns out that our algorithms are applicable to different interference models and we find the increase of complexity of the interference model will decrease the access fairness of the whole network.

**Keywords** unmanned aerial vehicle; airborne network; on-demand coverage; bi-connected; access selection

## 1 引 言

移动自组织网络 (Mobile Ad-hoc Network, MANET) 是由一组智能体组成、不依靠传统基站通信的自组网. 在智能体选择中, 无人机凭借其负载能力强、体型轻巧、灵活性高等特点, 吸引着越来越多的研究者开始关注无人机自组网.

无人机作为可装载多种传感器的移动智能体, 已广泛应用于安保防护、搜救行动、风力预测、灾难管理、土地边防监控以及通信中. 在通信应用中, 无人机可作为地面用户的临时基站. 尤其是在临时热点区域或紧急情况下, 不仅能扩大无线网络的覆盖面积, 更能提升网络的传输性能. 移动的无人机之间可以构建自组织网络, 而无人机和地面用户也可构建高效的通信链路, 于是地面上无法直接通信的用户节点可通过无人机网络实现多跳通信. 一方面, 无人机的飞行高度使其能够尽可能与地面用户建立视

距 (Line of Sight, LoS) 传输链路, 另一方面无人机移动的灵活性也能够实现快速和按需部署.

然而, 这同时也伴随着许多问题亟需解决, 例如拓扑覆盖范围、移动路径选择、防碰撞设置、通信干扰、用户分布的不确定性、稳定的拓扑连接、无人机能耗受限和骨干网负载均衡. 因此本文研究重点在于确定一种适用于多种场景 (用户分布、无人机初始分布、地理环境、动态需求) 的无人机部署和接入选择算法, 在无人机实现按需覆盖、跟踪用户的基础上确保无人机网络的稳定拓扑结构, 同时均衡无人机的接入负载并保证用户的接入率.

本文基于虚拟力设计了一种分布式无人机骨干网部署及接入选择算法, 一方面可以让无中心控制的无人机组自发地移动到合适位置, 并实现稳定的双连接组网通信和区域按需覆盖; 另一方面基于 SINR 和无人机接入用户数提出了三种用户接入控制方法, 并从接入比和负载均衡方面分析比较. 主要解决的问题归纳如下:

(1) 分布式组网. 本算法规定每个无人机只能利用通信范围内邻居无人机(一跳信息)和用户以及本身的坐标作为输入来控制飞行路径.

(2) 覆盖面积合理化. 无人机的拓扑半径  $R_t$  和通信距离  $R_c$  满足  $R_c \geq \sqrt{3}R_t$ , 理论证实此调整  $R_t$  可以实现多场景的合理覆盖.

(3) 稳定双连接拓扑. 要求每个无人机至少有两个邻居(可通信)无人机, 从而提高骨干网拓扑结构的稳定性和抗毁性.

(4) 用户接入最大化. 设计了三种基于信干噪比和接入度数的接入控制方法, 提高无人机负载公平性的同时也最大化用户接入骨干网的比例.

(5) 应用场景普适性. 设定不同的热点坐标、引力系数、斥力系数和拓扑半径就可以实现多场景的按需覆盖通信.

## 2 相关工作

无人机骨干网, 包括普通传感器自组网都吸引了大量学者的研究. 针对不同的应用目的, 各类文献也提出了不同的研究需求.

以接收信号强度<sup>[1]</sup>和可用频段<sup>[2]</sup>为根据的位置寻找算法都只针对单个无人机部署, 并没有应用于无人机自组网的实际背景中. 而自组织网络的部署可以分为三类, 第一类主要针对网络的最大面积覆盖<sup>[3-5]</sup>, 如 Liu 等人<sup>[3]</sup>基于虚拟力论证了覆盖面积的最大化和移动距离的最小化; Mozaffari 等人<sup>[4]</sup>提出基于圆圈紧凑理论的最小发送功率和最大面积覆盖; 半聚群移动控制方法<sup>[5]</sup>规定一部分节点用于探索未覆盖的目标, 但文献<sup>[3-5]</sup>专注的移动传感器网络并没有考虑无人机高度、用户接入和拓扑结构的合理稳定等问题, 且适用场景十分有限. 第二类则力求覆盖的同时减小发送功率, 如通过调整可用状态无人机数目<sup>[6]</sup>来节省地面目标追踪的能量消耗, 但其工作都基于目标位置预先已知, 并没有考虑地面的不确定性; 通过调整无人机覆盖范围和飞行高度进而提高能量利用率<sup>[7]</sup>, 然而二者中的发送功率能量远远小于未考虑的飞行能量消耗. 第三类则探究网络的拓扑结构, 其中一些算法要求最终拓扑结构网络实现互联<sup>[8-9]</sup>, 如基于最小权重生成树<sup>[9]</sup>的部署算法能够实现分布式部署, 且需要的节点数目相对于传统拓扑连接更少; 一些研究<sup>[10-11]</sup>提出具备容错性的双连接稳定拓扑, 即每两个无人机节点间至少有两条连通路; 节点之间存在间歇连接关系时, 如

何维持拓扑健壮性也是另一类研究方向<sup>[12-14]</sup>.

而现有的基于虚拟力的无人机网络研究基本可分为三类: (1) 无人机集群实现最大覆盖. 文献<sup>[3]</sup>中作者针对一个热点区域提出基于虚拟力的无人机网络最大覆盖, 文献<sup>[15]</sup>中同样利用虚拟力实现了三维空间的覆盖, 我们在之前也提出了按需覆盖<sup>[16]</sup>和规则拓扑的分布式构建<sup>[17]</sup>, 但都没有考虑地面用户的位置; (2) 跟踪、监控运动的用户. 在三维空间中可利用虚拟力指引无人机群追踪实时运动的目标<sup>[18]</sup>, 但没有达到 UAV 的连通性要求; (3) 群体移动. 研究者利用虚拟力帮助无人机在进行群体移动时保持连通性<sup>[19]</sup>, 但这类移动没有空与地的通信.

国内外学者对于网络接入选择算法的研究基本可以划分为基于接收信号强度 RSS、负载均衡和业务 QoS 三类. 第一类是由终端自主计算 RSS 从而接入高质量的基站, 如果备选基站 RSS 高于现有基站则进行相应的切换. Hanjin 等人<sup>[20]</sup>提出引入时延的 RSS 切换; Roy 等人<sup>[21]</sup>在时延 RSS 上加入信号强度比例, 收获更好的性能; 另有先基于用户距离再基于平均 RSS<sup>[22]</sup>进行接入选择. 这类接入选择算法复杂度低, 但只强调 RSS 性能, 选择效果不佳. 第二类的思想是把请求接入的用户分配给负载最少的基站. 如盛洁等人<sup>[23]</sup>提出基于用户移动和网络负载状态使用户转移至低负载基站; 而基于用户特殊需要的负载均衡接入选择方法<sup>[24]</sup>, 能够大大减少信息交互代价; Ma 等人<sup>[25]</sup>要求在发现网络资源不足以保证服务质量时, 中心控制端实时控制用户切换. 该类负载均衡的方法提高了资源利用率, 但是无法满足对于实时通信质量有要求的用户. 第三类旨在根据各基站性能参数的不同将用户划分, 从而满足各用户的 QoS 需求. Chen 等人<sup>[26]</sup>提出基于信道保护的实时接入方法, 能对多种业务进行 QoS 服务; Miao 等人<sup>[27]</sup>则将网络带宽分配和 QoS 支持相结合, 提供高质量业务的同时也能式资源利用最大化. 基于 QoS 的接入选择通常没有考虑负载均衡, 不适用于能耗有限的无人机网络.

本文针对无人机骨干网, 分别提出分布式组网和接入选择算法. 空中任意分布的无人机集群无需全局用户信息, 便可通过感知组成空中双连接骨干网并对地面实现按需覆盖, 期间能够实时监测所有无人机的运动轨迹以及最终位置; 部署完成后用户通过接入选择算法保证高质量通信, 并维持网络的负载均衡和接入比性能.

### 3 系统模型

#### 3.1 场景描述

在给定区域内有  $M$  个用户  $UE_1, UE_2, \dots, UE_M$  均匀或成簇分布, 区域中可能有位置随机的障碍(如高楼、山峰等). 给定  $N$  个无人机  $UAV_1, UAV_2, \dots, UAV_N$  实现所有用户的按需覆盖通信, 且无人机事先被告知用户集中的一个或多个热点中心位置. 无论何时, 每个无人机都可通过 GPS 设备获得自身位置, 而且当两个无人机  $UAV_i$  和  $UAV_j$  的距离小于通信距离  $R$ . 时即可建立直接视距通信. 文献[28]中对无人机实现最大覆盖的合适高度进行了理论分析, 本算法设置所有无人机都处在相同的合适高度. 用户可能均匀地或者成簇地分布, 对于前者, 算法需要无人机骨干网实现按需覆盖和稳定的双连接拓扑, 而后者则另外需要无人机在簇与簇的连接线上形成连接链路. 在向热点区域移动期间, 所有无人机会以固定时间间隔向空间广播自身位置的 Hello 消息, 其他无人机受到通信范围内的广播消息后更新邻居无人机信息, 与此同时收到满足信干噪比 SINR 的用户也存储无人机信息, 用户设备一旦收到满足信干噪比条件的 Hello 信号(一个或多个), 即能通过接入控制算法选择合适的无人机作为基站接入空中骨干网. 具体场景如图 1 所示.

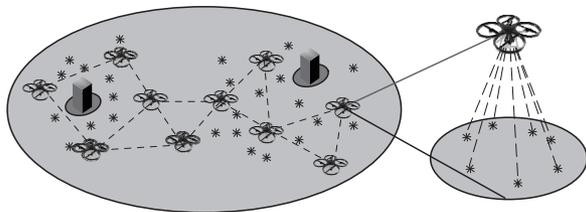


图 1 场景描述

#### 3.2 无人机与用户信道模型

对于无人机与用户之间的通信, 这里引入空地信道模型<sup>[12]</sup>. 无人机通过传感器感知地面用户, 当用户进入其感知范围内, 则无人机可通过视距或非视距与地面用户进行通信, 其中视距传输概率  $P(LoS, \theta)$  的模型如下:

$$P(LoS, \theta) = \frac{1}{1 + \alpha \exp(-\beta(\theta - \alpha))} \quad (1)$$

其中,  $\theta$  表示地面用户与空中无人机之间的仰角;  $\alpha$  和  $\beta$  是由地理环境所决定的环境参数, 包括城市、农村、高层建筑城市等环境. 同时, 非视距传输概率

满足  $P(NLoS, \theta) = 1 - P(LoS, \theta)$ .

无人机与用户间的路径损耗  $PL$  (dB) 如式(2):

$$PL(\text{dB}) = P(LoS, \theta) \times L_{LoS} + P(NLoS, \theta) \times L_{NLoS} \quad (2)$$

其中,  $L_{LoS}$  和  $L_{NLoS}$  分别表示视距传输和非视距传输下的平均路径损耗, 可用模型表达如下:

$$\begin{aligned} L_{LoS} &= 20 \log d + 20 \log f + 20 \log(4\pi/c) + \eta_{LoS}, \\ L_{NLoS} &= \underbrace{20 \log d + 20 \log f + 20 \log(4\pi/c)}_{\text{自由空间}} + \eta_{NLoS} \end{aligned} \quad (3)$$

其中前三项为基于全向发送接收天线下的 Friis 公式自由空间损耗,  $d$  是无人机与地面用户的欧氏距离,  $f$  是该信道载波频率,  $c$  表示光速;  $\eta_{LoS}$  与  $\eta_{NLoS}$  则分别表示视距与非视距下的其他自由空间损耗.

此处考虑网络节点分享公共信道, 借鉴蜂窝网络干扰模型, 地面用户会接收到多个无人机的广播信号, 从而产生叠加干扰. 本算法根据用户终端对不同无人机计算 SINR 来选择接入, 无人机只有提供大于用户设定阈值的 SINR 才能服务用户. 地面第  $k$  个用户接收到第  $i$  个无人机的信干噪比为

$$\gamma_{i,k} = \frac{p_{i,k} g_{i,k}}{\sum_{j \neq i} p_{j,k} g_{j,k} + N_{gw}} \geq \Lambda_{th} \quad (4)$$

这里, 分子为实际信号功率, 分母为噪声和其他无人机干扰功率之和.  $p_{i,k}$  表示无人机  $i$  分配给用户  $k$  的传输功率, 此处假设  $p_{i,k} = P_{\max} / \text{load}_{\max}$ , 其中  $P_{\max}$  为无人机总发射功率,  $\text{load}_{\max}$  为无人机最大接入用户数;  $g_{i,k}$  是二者的信道增益, 其满足  $PL_{i,k}$  (dB) =  $-10 \log(g_{i,k})$ , 由式(1)~(3)得到  $PL_{i,k}$  (dB) 后再做倍数-分贝转换;  $N_{gw}$  是 高 斯 白 噪 声 功 率;  $\Lambda_{th}$  为 预 先 设 定 的 用 户 信 干 噪 比 阈 值.

### 4 无人机骨干网分布式部署算法

本节我们对上文的无人机骨干网分布式部署算法进行阐述. 该算法无需事先了解用户的具体位置, 只需知道热点区域中心的坐标, 每个无人机根据虚拟合力的方向和大小飞行到合适的位置, 继而所有无人机构成稳定骨干网结构. 本算法设定无人机骨干网必须满足以下要求才可视为部署成功:

- (1) 为确保骨干网中各无人机已满足基本的受力均衡, 所有无人机最终移动步长小于临界值;
- (2) 所有无人机都至少有两个邻居无人机, 即满足双连接, 从而保证无人机骨干网的健壮性;
- (3) 在用户 QoS 方面, 用户接入比应大于要求值, 同时用户接入骨干网的 SINR 应在容忍范围;

(4) 部署过程中, 无人机网络能躲避障碍物。

#### 4.1 虚拟力设计

该部署算法中设计 4 种虚拟力: (1) 热点及引力

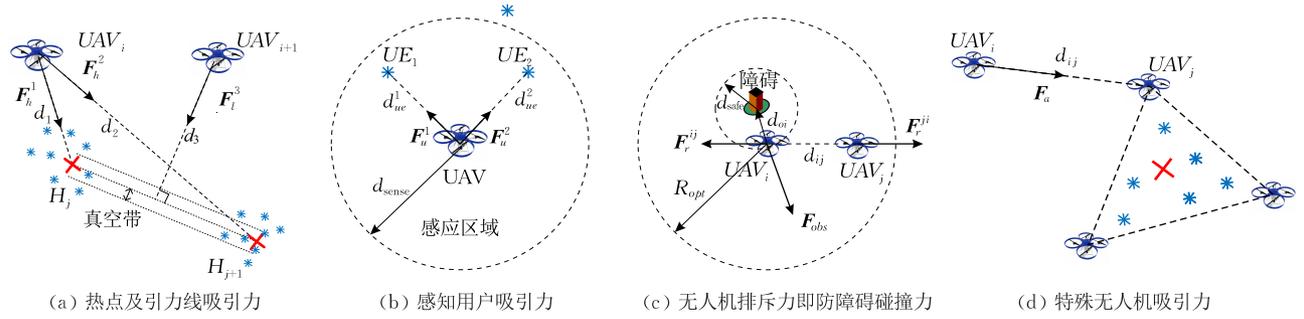


图 2 虚拟力示意图

##### 4.1.1 热点吸引力 $F_h$ 和引力线吸引力 $F_l$

热点吸引力采用物理中的库仑力模型, 这里只有无人机是移动电荷, 热点中心视为固定电荷, 并且事先为热点设置相应的吸引系数. 在热点吸引力的作用下, 由于库仑力大小与距离平方成反比, 方向永远指向热点中心, 因此随机分布的无人机会向最近的热点区域移动并聚集, 为之后进一步的用户按需覆盖奠定基础. 假设此时有一无人机  $UAV_i$ , 其受到第  $j$  个热点中心  $H_j$  的区域吸引力可表示为

$$F_h^j = K_h^j \times \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}^2} \quad (5)$$

其中,  $F_h^j$  方向由  $UAV_i$  指向该热点中心;  $K_h^j$  表示该热点中心的引力系数, 根据该区域用户聚集程度和优先级确定;  $d_{ij}$  表示  $UAV_i$  到该热点中心的距离;  $\Delta d_{ij}$  为  $UAV_i$  指向该热点中心的单位向量.

当用户成簇分布时, 无人机聚集在热点区域只能完成区域覆盖工作, 热点区域之间的通信链路并不能实现, 因此还需引入引力线引力  $F_l$ . 我们将热点中心之间的虚拟连线定义为引力线, 同样采用库仑力模型, 此时引力方向由无人机在引力线上的投影点决定. 本算法同时引入真空带的概念, 即当无人机与引力线距离小于某一设定值  $d_{vac}$  时, 无人机不受引力线吸引, 这样既可以保证引力线附近无人机的稳定部署, 同时也方便无人机拓扑的动态调整.

由图 2(a) 可见, 两个热点  $H_j$  和  $H_{j+1}$  之间有一条虚拟的引力线, 对于投影在引力线段上的无人机  $UAV_{i+1}$ , 会受到投影点  $P_{j,j+1}^i(x_p^i, y_p^i)$  的吸引, 故而被拉向投影点移动, 所受引力线引力  $F_l^{j,j+1}$  可用式(6)表示:

$$F_l^{j,j+1} = K_l \times \frac{\Delta d_i^{j,j+1}}{(d_i^{j,j+1})^2} \quad (6)$$

线吸引力, 如图 2(a); (2) 感知用户吸引力, 如图 2(b); (3) 邻居无人机排斥力及防障碍碰撞力, 如图 2(c); (4) 特殊无人机吸引力, 如图 2(d).

其中,  $F_l^{j,j+1}$  方向由  $UAV_{i+1}$  指向其在引力线的投影点  $P_{j,j+1}^i$ ;  $K_l$  表示引力线的吸引系数;  $d_i^{j,j+1}$  是  $UAV_i$  到投影点的水平距离;  $\Delta d_i^{j,j+1}$  为  $UAV_i$  指向其投影的单位向量.

为简化热点和引力线两种吸引力组合模型并使之协调配合, 算法遵从以下规定: 每个无人机在移动时只受最近引力线吸引, 因此首先需要判断最近的引力线位置. 再者, 如果无人机在最近引力线上的投影不在引力线线段上时(位于延长线), 则视为不受引力线吸引, 只受热点吸引力作用, 反之只受引力线吸引. 空间组合引力势图如图 3 所示(此处真空带未画出), 不难发现, 平面上投影在引力线的点只有向投影点下滑的趋势, 投影在引力线段外的点则趋于滑向最近的热点引力坑, 并且距离热点或引力线越近, 其下滑趋势越明显.

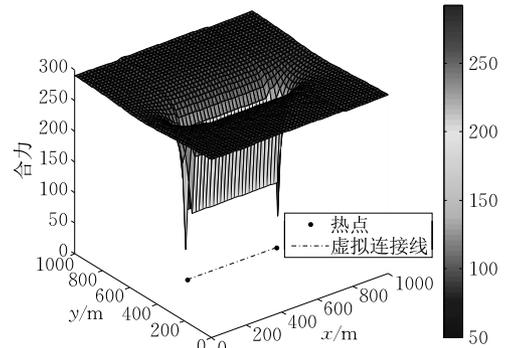


图 3 三维引力势图

##### 4.1.2 感知用户吸引力 $F_u$

在热点吸引力的作用下, 无人机会在热点区域中心汇集. 为了进一步使无人机飞向地面用户的上空, 本算法同样借鉴库仑力模型进一步引入用户吸引力  $F_u$ , 由于用户位置的随机性, 所以只有当用户在无人机的感知范围内时, 无人机才能得到用户吸

引指令. 无人机  $UAV_i$  受到用户  $UE_k$  的吸引力  $\mathbf{F}_u^k$  可表示为式(7):

$$\mathbf{F}_u^k = K_u \times \frac{\Delta d_{ik}}{d_{ik}^2}, \quad dis(UAV_i, UE_k) < d_{sense} \quad (7)$$

同理,  $\mathbf{F}_u^k$  方向由  $UAV_i$  指向该用户;  $K_u$  表示用户吸引系数, 为了维持无人机间稳定拓扑,  $K_u$  须小于热点吸引系数  $K_h$ ;  $d_{ik}$  表示用户与无人机的平面距离;  $d_{sense}$  是由无人机传感器性能决定的感知距离.

#### 4.1.3 邻居无人机排斥力 $\mathbf{F}_r$ 和防障碍碰撞力 $\mathbf{F}_{obs}$

不难发现, 在上述三种吸引力的作用下, 无人机会迅速向最近的热点、引力线或用户聚集, 如此一来就难以维持稳定的拓扑结构, 也会形成不必要的堆积现象. 因此, 本算法在吸引力作用同时也引入无人机斥力  $\mathbf{F}_r$ , 该斥力同样借助库仑力模型, 在避免无人机发生碰撞的同时, 更能使无人机两两之间保持合适的距离. 本算法学习文献[7]中对无空洞覆盖的分析, 可提前由热点区域的特征设置拓扑半径  $R_t$ , 且确保通信距离  $R_c \geq \sqrt{3}R_t$ , 则无人机间的合适距离为  $\sqrt{3}R_t$ .

对于无人机  $UAV_i$ , 其受到邻居无人机  $UAV_j$  排斥力  $\mathbf{F}_r^j$  可表示为

$$\mathbf{F}_r^j = \begin{cases} K_r \times \frac{\Delta d_{ji}}{d_{ji}^2}, & \text{当 } d_{ji} < \sqrt{3}R_t, \quad i \neq j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $d_{ji}$  是两无人机间的空间距离, 只有当  $d_{ji} < \sqrt{3}R_t$  时, 才存在相互的排斥力;  $\mathbf{F}_r^j$  方向由  $UAV_j$  指向  $UAV_i$ , 同时由于相互作用力效果,  $UAV_j$  也一定受到等大反向的斥力影响;  $K_r$  是预先设好的斥力系数, 为了保证合适距离不被其他吸引力破坏, 同时也避免无人机间发生碰撞,  $K_r$  应大于  $K_h$ ;  $R_t$  是预先设置的无人机拓扑距离, 根据热点数目和热点区域大致范围设置更加合理.

该斥力模型可类似地应用于障碍场景. 无人机感知到障碍小于事先设计好的安全距离  $d_{safe}$  后, 即可根据该斥力模型产生  $\mathbf{F}_{obs}$ , 使无人机与障碍保持在安全距离以外.

$$\mathbf{F}_{obs} = \begin{cases} K_r \times \frac{\Delta d_{oi}}{d_{oi}^2}, & \text{当 } d_{oi} < d_{safe} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

#### 4.1.4 特殊无人机吸引力 $\mathbf{F}_a$

基于热点吸引力、引力线吸引力、用户吸引力以及邻居无人机斥力, 分布式无人机骨干网已经基本完成按需覆盖要求. 由图连通几何知识, 每个通信节

点必须至少有两个可通信邻居节点才能确保拓扑结构具有良好的抗毁性和健壮性. 因此, 在按需覆盖的基础上, 本算法加入特殊无人机吸引力来强化拓扑结构.  $UAV_i$  受到  $UAV_j$  吸引力可表示成公式:

$$\mathbf{F}_a^j = K_a \times \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}^2}, \quad i \neq j, \quad \text{当 } d_{ji} \leq R_c \quad (10)$$

其中,  $UAV_i$  是实现双连接的一方, 因此当距离  $d_{ji} \leq R_c$ , 且  $UAV_i$  获知  $UAV_j$  已实现双连接时,  $\mathbf{F}_a^j$  作用于  $UAV_i$ , 并由  $UAV_i$  指向  $UAV_j$ ;  $K_a$  是无人机间的引力系数, 应小于热点引力系数.

每个无人机在移动过程中通过广播 Hello 消息不断更新可通信邻居相关信息, 一旦自身邻居数目小于 2, 则会被邻居吸引, 向通信范围内的双连接无人机靠拢, 经过热点、引力线以及邻居无人机共同吸引的一系列连锁反应就能达到双连接目的.

## 4.2 部署算法实现

部署前, 每个无人机会被预先告知热点位置, 位于区域任意位置的无人机都会受到虚拟力的影响. 根据给定区域建立  $x$ - $y$  坐标系, 借鉴物理学中矢量相加定理, 则无人机  $UAV_i$  的合力  $\mathbf{F}$  可以表示为  $x$  和  $y$  方向矢量和的形式:

$$\text{合力:} \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_x + \mathbf{F}_y \quad (11)$$

$X$  方向:

$$\mathbf{F}_x = \begin{cases} \sum_h \mathbf{F}_{hx} + \sum_{UE} \mathbf{F}_{ux} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{rx} + \mathbf{F}_{obsx} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{ax}, & \text{UAV}_i \text{ 投影不在引力线上} \\ \sum_l \mathbf{F}_{lx} + \sum_{UE} \mathbf{F}_{ux} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{rx} + \mathbf{F}_{obsx} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{ax}, & \text{UAV}_i \text{ 投影在引力线上} \end{cases} \quad (12)$$

$Y$  方向:

$$\mathbf{F}_y = \begin{cases} \sum_h \mathbf{F}_{hy} + \sum_{UE} \mathbf{F}_{uy} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{ry} + \mathbf{F}_{obsy} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{ay}, & \text{UAV}_i \text{ 投影不在引力线上} \\ \sum_l \mathbf{F}_{ly} + \sum_{UE} \mathbf{F}_{uy} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{ry} + \mathbf{F}_{obsy} + \sum_{UAV} \mathbf{F}_{ay}, & \text{UAV}_i \text{ 投影在引力线上} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{F}_h$  表示热点吸引力,  $\mathbf{F}_l$  表示引力线吸引力,  $\mathbf{F}_u$  表示感知用户吸引力,  $\mathbf{F}_r$  表示邻居无人机排斥力,  $\mathbf{F}_{obs}$  表示防障碍碰撞力,  $\mathbf{F}_a$  表示特殊无人机吸引力.

算法中合力的大小和方向均可以由  $\mathbf{F}_x$  和  $\mathbf{F}_y$  表示, 但虚拟合力由各系数和距离决定, 其数值较大, 不能直接用来作为无人机的实际移动距离. 故引入最大移动距离  $L_{max}$  进行归一化处理, 同时由于需要无人机移动到合适位置附近能趋于稳定, 最大移动距离可以设置成随着算法迭代次数而单调递减:

$$l = \arctan \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \times \frac{2}{\pi} \times L_{\max} \quad (14)$$

其中,  $l$  表示  $UAV_i$  的实际移动距离,  $L_{\max}$  表示距离归一化的最大距离, 同时本文设置迭代间隔为 1 s, 则  $V_{\max} = L_{\max}$ . 这里利用反正切函数具有最大值  $\pi/2$ , 使较大的合力对应于  $L_{\max}$  以内的移动距离, 同时此处依照余弦滚降特性,  $L_{\max}$  设置为

$$L_{\max} = \frac{iter_{\max} - iter}{60} \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{iter}{iter_{\max}}\right) \quad (15)$$

这里  $iter_{\max}$  为最大迭代次数,  $iter$  为当前迭代次数. 式中  $L_{\max}$  会随着  $iter$  增大而减小, 且余弦特性使之变化曲线更光滑.

迭代结束的理想情况下, 所有无人机将在各自的合适位置计算出自身合力为 0, 于是形成最终稳定拓扑结构. 但实际上所有无人机可能会在合适位置附近震荡, 因此算法需事先设定一个移动停止门限  $l_{\text{stop}}$ , 当所有无人机实际移动距离  $l < l_{\text{stop}}$  时, 该算法视为部署完成. 另外在监测、跟踪等情况下, 在部署完成后地面用户可能会改变所在位置, 这时需要无人机骨干网重新调整拓扑结构, 从而实现实时按需覆盖通信. 这时无人机通过计算实际移动距离发现  $l \geq l_{\text{stop}}$ , 于是无人机重新开始更新位置. 具体部署过程见算法 1.

#### 算法 1. 无人机骨干网分布式部署算法.

输入: 给定区域范围, 热点中心集合  $H$ , 无人机集合  $UAV$  及其初始位置

输出: 所有无人机最终位置及运动轨迹

1. 初始化设置: 初始邻居无人机集合  $N(n)$  和感知用户集合  $S(k)$ , 无人机拓扑半径  $R_i$ 、感知距离  $d_{\text{sense}}$  和无人机通信距离  $R_c$ , 各虚拟力系数, 初始最大移动距离  $L_{\max}$ , 以及移动停止门限  $l_{\text{stop}}$ .
2. FOR  $UAV_i \in UAV$ 
  - 线程 A: 广播和感知
  3. a. 发送 Hello 消息, 将可通信邻居无人机加入  $N(n)$  并记录其相关信息
  4. b. 感知地面用户加入  $S(k)$
  5. c. 感知障碍距离
  - 线程 B: 位置更新
  6. IF  $l > l_{\text{stop}}$  或者  $UAV_i$  邻居数小于 2
  7. 判断并计算热点引力/引力线引力
  8. FOR  $UE_k \in S(k)$
  9. 计算感知用户合力
  10. END FOR
  11. FOR  $UAV_j \in N(n)$
  12. IF  $distance(UAV_i, UAV_j) < \sqrt{3}R_i$ ,
  13. 计算邻居无人机排斥力

14. END IF
15. IF 自身邻居数小于 2
16. 计算  $UAV_j$  特殊无人机吸引力
17. END IF
18. END FOR
19. 判断并计算障碍碰撞力
20. 统计计算合力并更新位置
21. END IF
22. END FOR

在上述过程中, 线程 A 和线程 B 可同时工作、互不冲突, 因此每个无人机在线程 A 中都能不断更新自身以及通信邻居的地理位置和连接状态, 这些在线程 B 中作为虚拟力的判定和计算依据, 从而实现无需中心控制、适应动态变化的智能无人机骨干网组网, 并保持稳定健壮的拓扑结构.

## 5 用户接入选择算法

上节对无人机骨干网分布式部署算法进行了说明, 本节基于无人机骨干网部署之上, 提出三种用户接入控制算法. 根据无人机与用户通信的信干噪比以及无人机度数(已接入用户的数量), 本文提出以下三种用户接入算法: 最大信干噪比接入、满足信干噪比的随机接入以及满足信干噪比的最小度数接入.

在无人机部署过程中, 无人机实时向地面用户广播自身序号及位置. 用户可根据接收信号强度以固定时间间隔更新无人机信干噪比列表  $SINRList$  (包括无人机序号、信干噪比、位置等), 通过合适的接入控制方法竞争选择某一无人机接入骨干网. 在无人机动态部署过程中, 每次迭代都需用户更新信干噪比列表, 以确保用户接入骨干网的通信质量. 本算法从用户通信质量以及无人机负载均衡角度分别提出以下 3 种用户接入控制方法:

#### (1) 最大信干噪比接入

用户此时将高于信干噪比阈值的无人机选项加入信干噪比列表, 并按照 SINR 对选项进行降序排序. 用户选择最大 SINR 无人机接入, 如果此时该无人机已接入用户数未达到限制值, 则用户可成功接入, 该无人机接入用户数加 1; 否则接入超时, 用户将拒绝无人机, 并从列表删除, 继而选择次大信干噪比无人机接入. 如此往复, 直至成功接入. 该接入方式只需用户终端进行选择接入, 无需无人机与用户进行交互.

#### (2) 满足信干噪比的随机接入

与上述方法相似, 用户同样以固定间隔更新

*SINRList*. 不同在于,用户无需对列表进行排序,而是在满足信干噪比的所有无人机中随机选择其一接入. 如果此时请求的无人机已达到接入限制,则用户接入失败,同样将该无人机从列表删除,然后再次从列表中随机选择接入,直至成功接入. 该接入方法同样无需信息交互.

### (3) 满足信干噪比的最小度数接入

该接入控制方法在以上两种方法基础增加交互信息. 用户更新 *SINRList* 后,向列表中所有满足信干噪比的无人机询问已接入用户数,即度数. 在接收到询问消息后,无人机回复自身度数,之后用户再将回复消息置于列表中,并从中选择未达到接入限制的最小度数无人机接入. 该方法不同在于,由于用户会判断无人机的接入情况并选择最小度数接入,该方法将度数和信干噪比进行综合考量. 具体实现过程见算法 2.

#### 算法 2. 用户接入选择算法.

输入: 无人机和用户部署位置

输出: 用户选择接入的无人机信息和各无人机度数

1. 初始化设置: 各无人机最大接入用户数  $load_{max}$  和初始度数  $degree=0$ , 各用户信干噪比阈值  $\Delta_n$  和初始 *SINRList*.

线程 A: 无人机广播

2. FOR  $UAV_i \in UAV$

3.  $UAV_i$  向地面感知用户广播其序号  $i$  及位置

4. END FOR

线程 B: 用户选择接入

5. FOR  $UE_k \in UE$

6. 由广播信号将信干噪比大于  $\Delta_n$  的无人机添加至 *SINRList* (包括无人机序号  $i$ 、位置和信干噪比值  $SINR_i$ ), 并以固定间隔更新 *SINRList*

(a) 最大信干噪比接入:

7. 对 *SINRList* 按 SINR 进行降序排序

8. FOR  $UAV_i \in SINRList$

9.  $UE_k$  选择最大 SINR 无人机  $UAV_i$  接入

10. IF  $degree_i < load_{max}$

11.  $UE_k$  成功接入  $UAV_i$

12. BREAK

13. ELSE

14. 将  $UAV_i$  从 *SINRList* 中删除

15. END IF

16. END FOR

(b) 满足信干噪比的随机接入:

17. FOR  $UAV_i \in SINRList$

18.  $UAV_r = random(SINRList)$

19.  $UE_k$  选择无人机  $UAV_r$  接入

20. IF  $degree_r < load_{max}$

21.  $UE_k$  成功接入  $UAV_r$

22. BREAK

23. ELSE

24. 将  $UAV_r$  从 *SINRList* 中删除

25. END IF

26. END FOR

(c) 满足信干噪比的最小度数接入:

27. FOR  $UAV_i \in SINRList$

28. 向  $UAV_i$  询问  $degree_i$  并更新 *SINRList*

29. END FOR

30. FOR  $UAV_i \in SINRList$

31.  $UE_k$  选择最小度数的  $UAV_{min}$  接入

32. IF  $degree_{min} < load_{max}$

33.  $UE_k$  成功接入  $UAV_{min}$

34. BREAK

35. ELSE

36. 将  $UAV_{min}$  从 *SINRList* 中删除

37. END IF

38. END FOR

39. END FOR

上述算法中,线程 A 和 B 各自进行,每个用户以固定间隔由线程 A 中的接收信号强度更新信干噪比列表,将其作为线程 B 中接入选择的依据.

这里针对每个用户,给出三种接入选择方法的复杂度分析. 给定总无人机数量为  $N$ ,某一个用户满足 SINR 大于阈值的无人机数量为  $T$ ,则接入之前用户对所有无人机的 SINR 进行计算,即初始判断的复杂度为  $O(N)$ ;之后,随机接入无需排序,最小度数接入需要获知度数信息,因此对于满足 SINR 的最大 SINR 接入、随机接入和最小度数接入,复杂度分别为  $O(T^2)$ 、 $O(1)$  和  $O(T^3)$ ;最后,如果接入 UAV 失败 (UAV 度数已达到临界值),则将该 UAV 从 *SINRList* 中删除,因此复杂度为  $O(T)$ . 故三种接入选择的总复杂度分别为  $O(NT^3)$ 、 $O(NT)$  和  $O(NT^4)$ .

## 6 算法仿真

本文采用 Java 对分布式无人机骨干网部署及接入选择算法进行仿真分析,在每次迭代中无人机和用户都会分别动态更新位置与动态重新连接,由于两算法只是基于相同的位置,不会干扰冲突,故以下仿真分析分别从无人机骨干网部署和用户接入控制两方面分析.

### 6.1 无人机骨干网部署仿真

为使结果更直观清晰,在骨干网部署仿真分析

中我们只采用上述的满足信干噪比的最小度数用户接入控制方法. 在给定  $2000\text{ m} \times 2000\text{ m}$  的正方形区域内, 200 个 UE 随机分布, 其中 UAV 和 UE 分别用“ $\Delta$ ”和“ $*$ ”表示, UAV-UAV 和 UAV-UE 连接分别用粗直线和细直线表示. 为检验该部署算法对环境的普适性, 这里按无人机和用户的初始分布设置多种场景, 具体如下:

(1) UAV 初始分布. 由于无人机初始分布会影响最终部署效果, 故这里设置两种分布模式: 分散 UAV 和基地 UAV. 前者即无人机分散在给定区域内任意位置; 后者即所有无人机统一从某一基地出发.

(2) UE 分布. 这里依据用户之间是否存在集群关系, 设置成随机 UE 和分簇 UE. 前者表示所有用户在给定区域内随机分布; 后者情况下用户则在区域内汇聚成多个用户簇, 每个簇的中心即视为热点.

(3) UE 移动. 为验证该算法下无人机骨干网对地面用户的追踪能力, 此处给定区域内的用户从随机 UE 状态变换为分簇 UE 状态, 期间每个用户移动的路线都不相同.

(4) 障碍场景. 在给定区域的某一处设置障碍,

其高度高于无人机的飞行高度.

各虚拟力参数的设置与区域范围、热点数、节点拓扑半径等相关, 主要仿真参数在表 1 中列出.

表 1 部署仿真参数设置

参数	符号	数值
总用户数	$M$	200
无人机最大接入用户数	$load_{\max}$	20
无人机高度	$H$	100 m
无人机通信距离	$R_c$	500 m
无人机感知距离	$d_{\text{sense}}$	500 m
无人机拓扑半径	$R_t$	220 m
无人机斥力系数	$K_r$	3500
用户吸引系数	$K_u$	7
引力线吸引系数	$K_l$	7
真空带距离	$d_{\text{vac}}$	10 m
接入比门限	$\tau$	0.98
最大迭代次数	$iter_{\max}$	720
移动停止门限	$l_{\text{stop}}$	8 m

### 6.1.1 用户随机分布仿真

图 4 和图 5 分别描绘了用户在给定区域呈现相同随机分布的情况下, 不同无人机初始状态带来的不同部署效果. 此时用户分布于区域中的各个角落, 故将热点设置成区域中心, 热点引力系数  $K_h = 800$ .

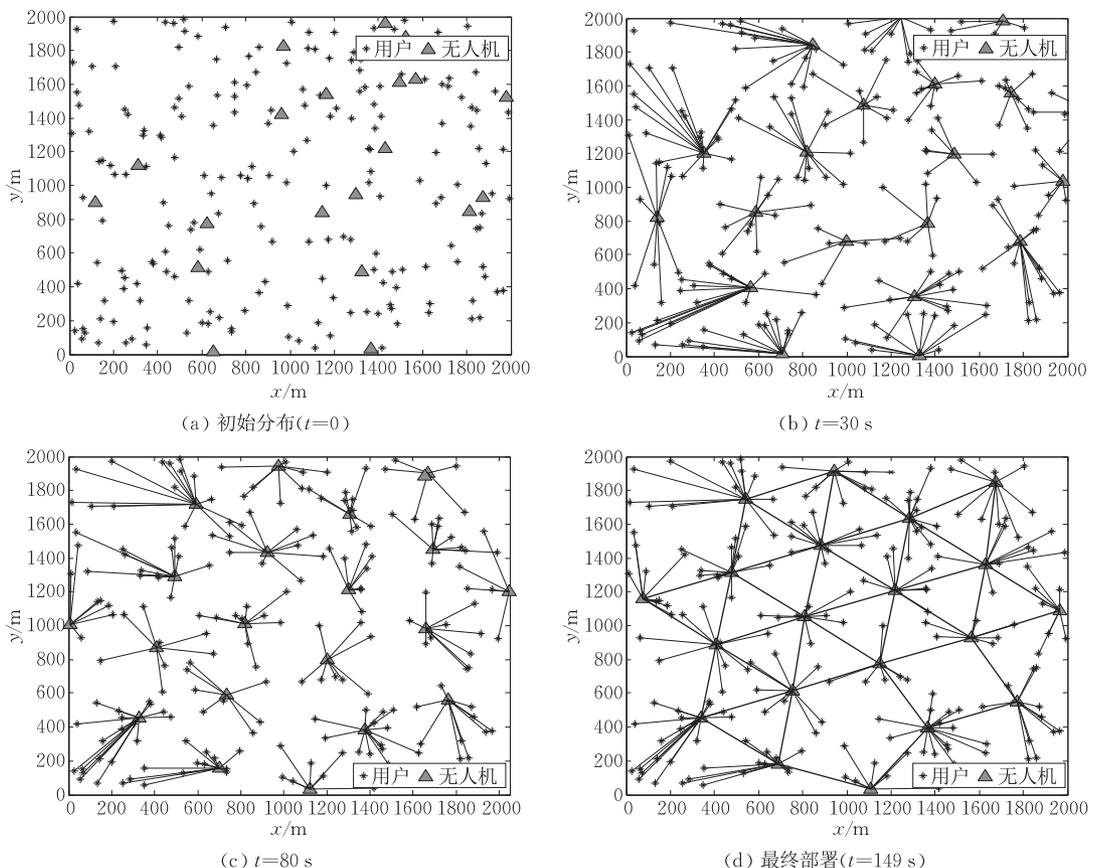


图 4 动态部署过程(200 个随机用户, 20 个分散无人机)

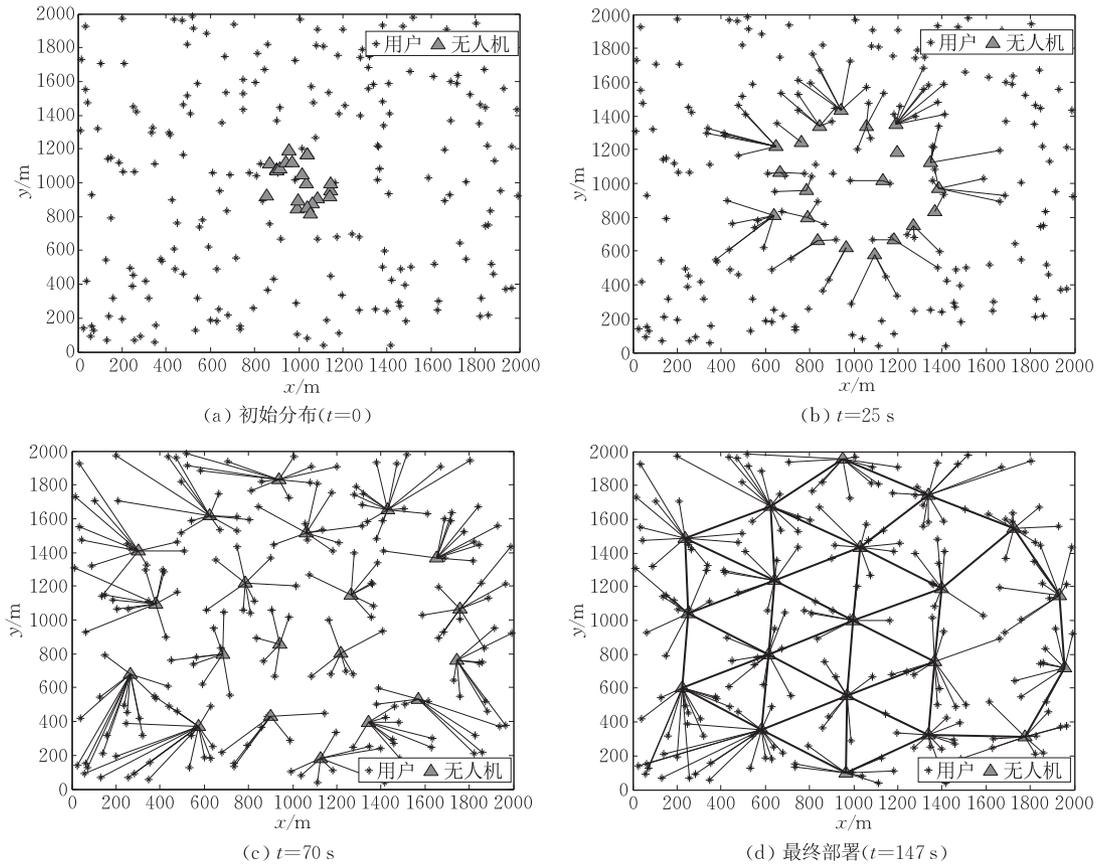


图 5 动态部署过程(200 个随机用户, 20 个基地无人机)

图 4(a)中给出了 200 个用户在区域的随机分布以及 20 个无人机的初始分散效果, 可以看到无人机分布无规律, 区域左上角过于稀疏而右上角过于紧密. 随着每秒迭代进行, 紧密分布的无人机在虚拟斥力的作用下分散开来, 同时无人机被感知范围的地面用户吸引从而填补空洞区域. 经过 149 s 后, 20 个无人机实现在给定的区域按需覆盖, 同时达到预期要求的双连接拓扑结构, 且骨干网中形成了大面积的三角形互联结构, 增强了空中网络的健壮性和稳定性.

图 5 中用户分布与图 4 相同, 不同在于 20 个无人机从区域中心的某一基站出发, 这就意味着在迭代初期, 无人机集群能感知的用户数量较之图 3 场景会大大减少, 从而使按需覆盖的难度进一步提升. 随着迭代进行, 距离小于拓扑半径的无人机将分散开, 同时也被地面新感知到的用户所吸引. 最终(图 5(d))也达到了图 3 中的预期效果, 即对整个区域的按需覆盖, 并维持双连接三角拓扑结构.

比较发现, 虽然基地分布(图 5)的无人机部署过程较之分散分布(图 4)更为复杂, 但两种场景却收获了几近相同的部署时间. 这是因为无人机在基

地分布时虽然对地面的感知信息较少, 但从区域中心以相似的速度向四周散开, 散开后较之图 4(a)的初始分布更均匀, 之后的部署调整过程也随之简化.

### 6.1.2 用户分簇分布仿真

图 6 和图 7 引入用户分簇场景, 此处 200 个用户分成数量为 60、70 和 70 的三个簇群, 各簇的中心视为热点中心, 热点位置预先告知所有进行覆盖的 20 个无人机, 各热点中心的吸引系数设置为  $K_{h_i} = 20 \times UEnum$ , 即用户数越多的热点吸引力越强. 此时, 无人机在完成各簇按需覆盖的同时也要实现簇与簇之间连通功能, 该场景的部署步骤较于随机用户场景更为复杂.

图 6(a)~(c)描绘了无人机覆盖 3 个用户簇的过程. 不难发现, 初始无人机的位置绝大部分都分布在热点簇区域以外, 且投影大都在相应的引力线线段上, 因此多数无人机会先向距离最近引力线移动. 随后在排斥力的作用下, 引力线上堆积的无人机挤向引力线的两头, 从而实现热点区域的覆盖. 图 6(d)验证了该算法在用户分簇时同样适用, 同时可以发现无人机在热点区域形成了较规则的六边形结

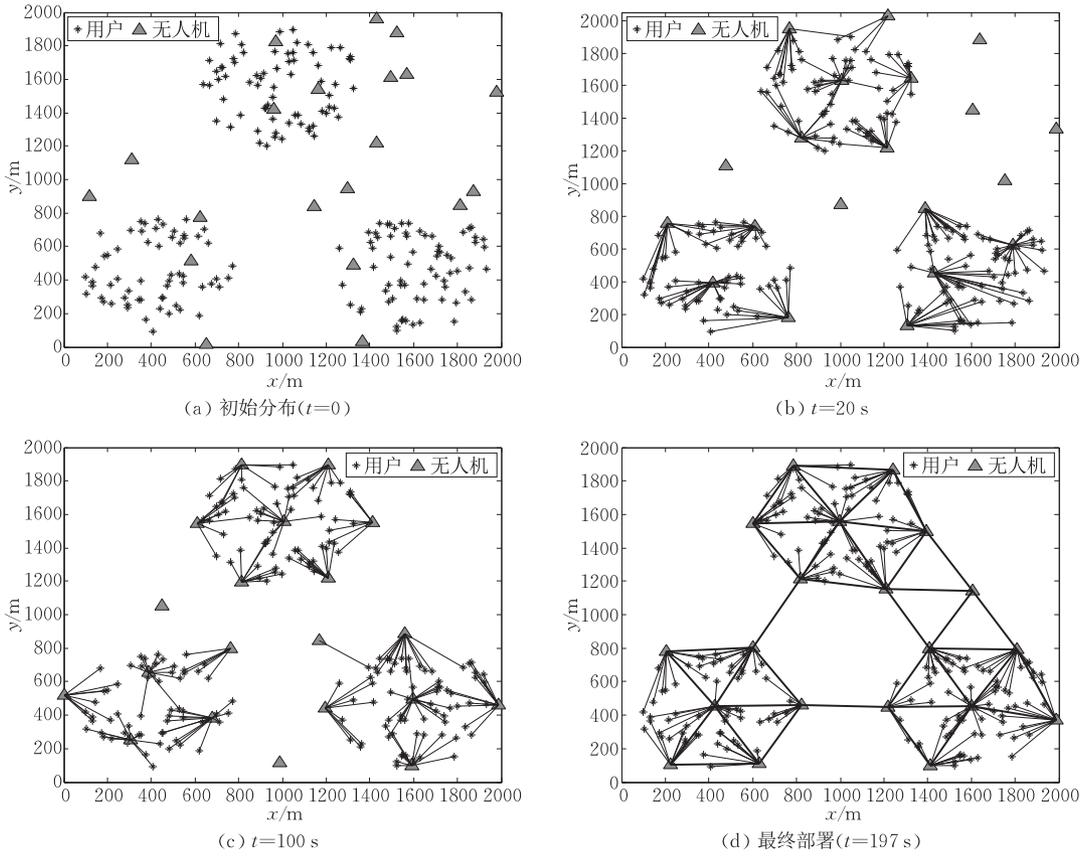


图 6 动态部署过程(200 个分簇用户,20 个分散无人机)

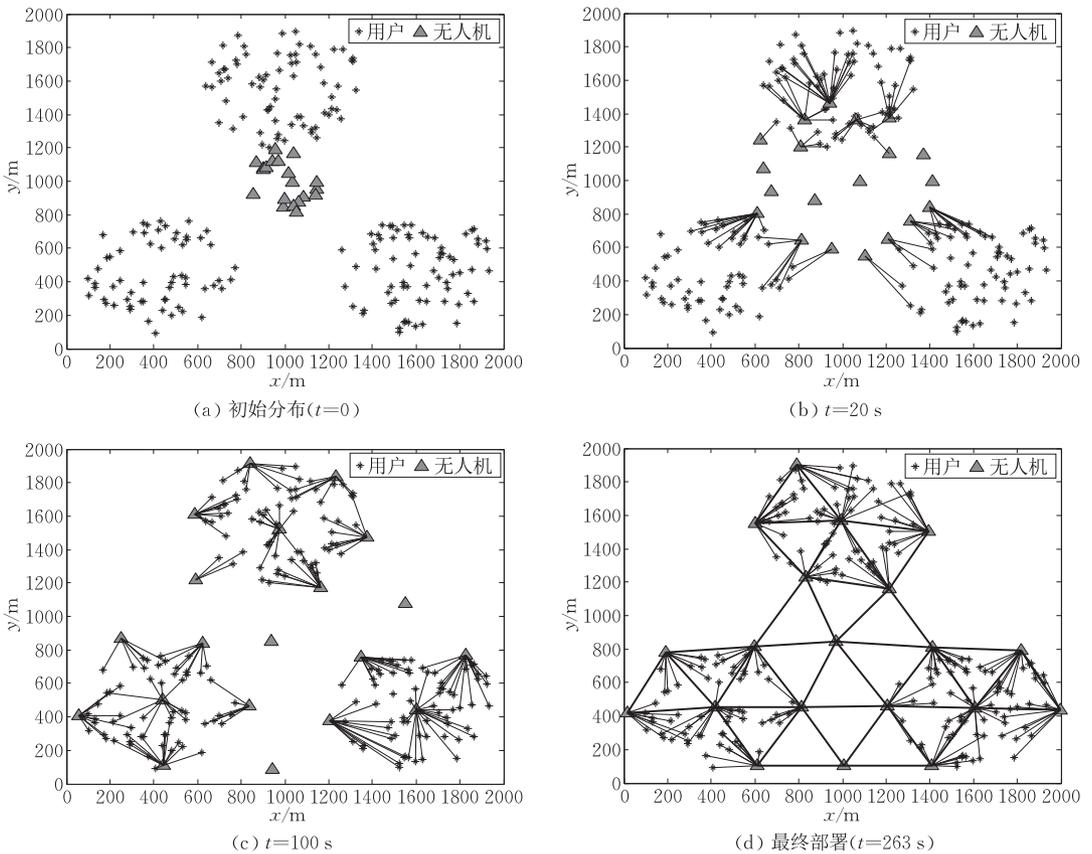


图 7 动态部署过程(200 个分簇用户,20 个基地无人机)

构,这是因为拓扑半径依照热点区域的大致半径进行合理设置,从而提升了空中骨干网的负载均衡性能.

图 7 在相同的用户簇分布下验证无人机集群从基地出发的效果. 如上述场景类似,20 个无人机同样实现了 200 个用户的按需覆盖,同时每个无人机都至少可与两个邻居无人机通信. 此外,簇之间的连接部分也都由三角形拓扑构成,使得骨干网的抗毁性大大加强.

在分簇用户场景仿真中,部署耗时要长于用户随机分布场景. 原因有两个方面,一方面是引力线引力的引入使得无人机合力的组成更复杂,使得归一化后的移动距离更远(速度更快),从而需要更多时间将移动距离稳定在移动停止门限  $l_{\text{stop}}$  以内;另一方面则是簇与簇之间的连通问题带来的额外部署工作量也相应的增加了部署时间.

### 6.1.3 动态用户仿真

在实际应用中,地面用户往往并不是静止不动

的,于是空中骨干网需要实时对移动用户进行追踪覆盖. 故本小节验证在用户移动过程中该部署算法的调整和应变能力.

如图 8 所示,200 个用户最初都随机分布在给定区域内,无人机已完成静态按需覆盖,各用户收到集合指令后立即向各自的热点中心以平均 5 m/s 的速度靠拢,最终形成三个集合簇,期间各用户的移动轨迹互不相同. 最初,用户整体呈现向中心聚拢的趋势(图 8(b)),故骨干网在用户吸引力作用下也随之向区域中心聚拢;之后无人机跟随用户移动形成三角形的排布(图 8(c));最终所有用户到达各自的集合地点,空中骨干网同样实现了预期的按需覆盖双连接结构. 本小节成功验证了该算法同样适用于动态用户的场景,同时可以发现空中骨干网在追踪覆盖的同时也维持着双连接和三角形拓扑结构,体现了该算法具有优秀的普适性和稳定性.

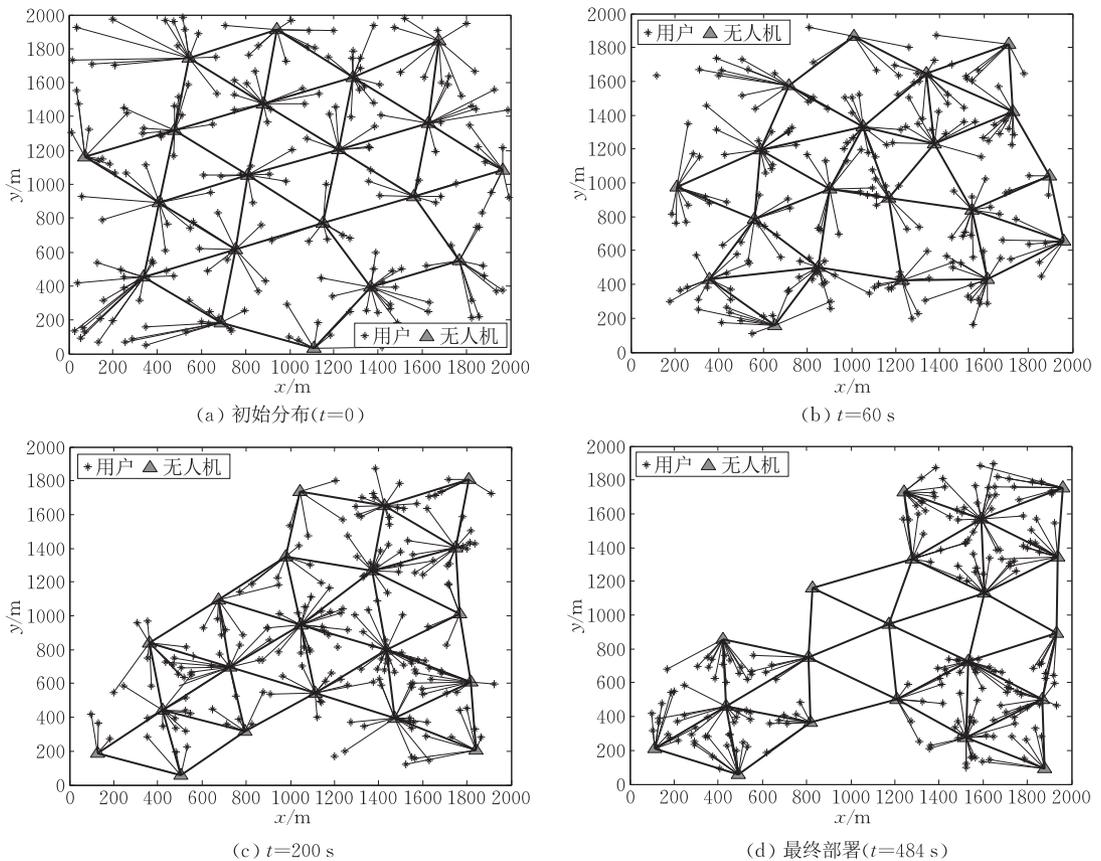


图 8 动态部署过程(200 个动态用户,20 个已部署无人机)

### 6.1.4 障碍场景仿真

图 9 是该算法在障碍场景的仿真,这里只给出用户随机、无人机分散的场景(其他场景类似),其中给定区域设置一处障碍(圆圈),其高度高于无人机飞行高度,因此无人机不能飞入圆形障碍区域. 在障

碍场景引入障碍排斥力,当无人机感知到前方障碍的距离已小于设定的安全距离  $d_{\text{safe}}$ ,则在障碍排斥力作用下远离障碍飞行. 由图 9(d)可以看到,空中骨干网在障碍区域形成空洞,对无障碍区域实现了覆盖,同时依然保持稳定的双连接结构.

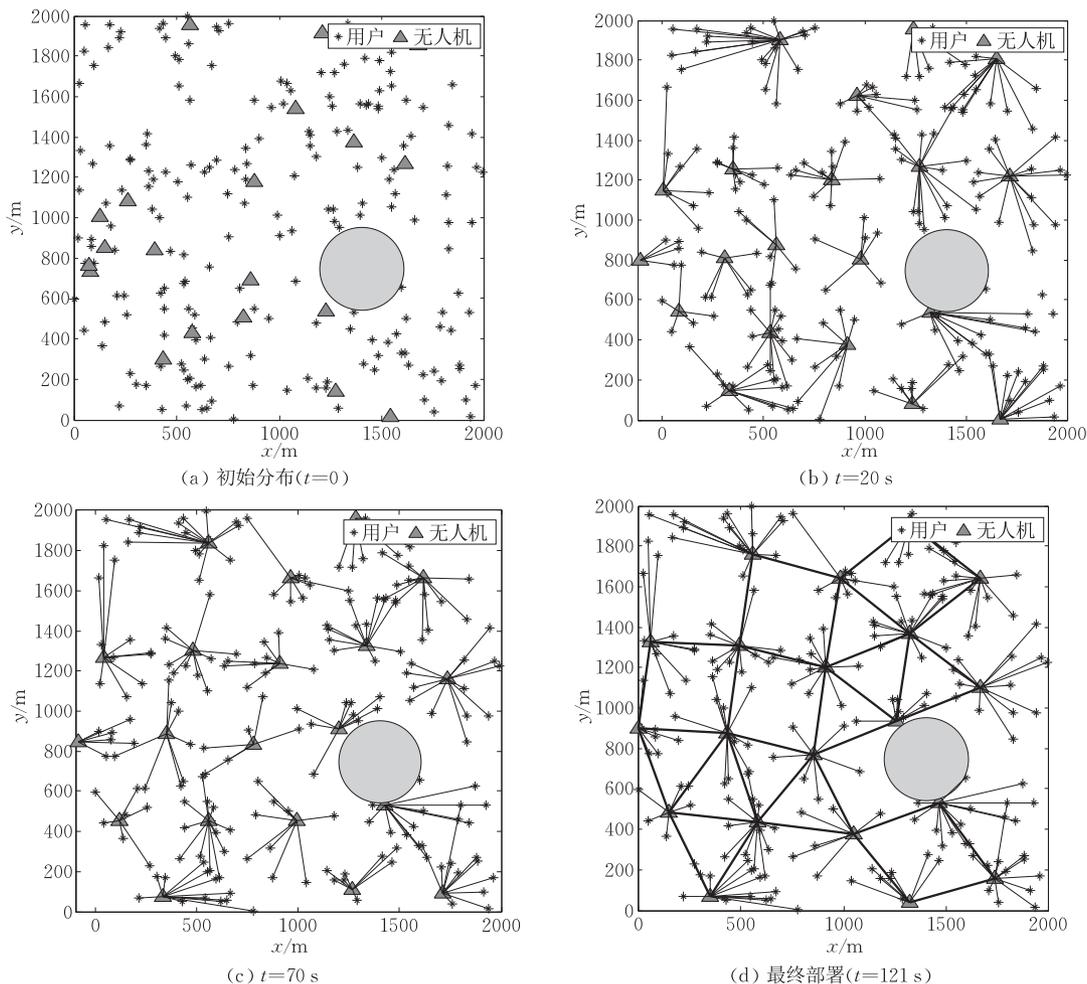


图9 动态部署过程(200个随机用户,20个分散无人机,障碍场景)

### 6.1.5 部署性能分析

上述仿真部分说明本文提出的部署算法在各类场景的部署效果方面收获了不错的成果,本小节将从无人机移动时间和移动公平性两方面入手,定量分析4种场景下该部署算法的性能:(a)分散无人机,随机用户;(b)基地无人机,随机用户;(c)分散无人机,分簇用户;(d)基地无人机,分簇用户。

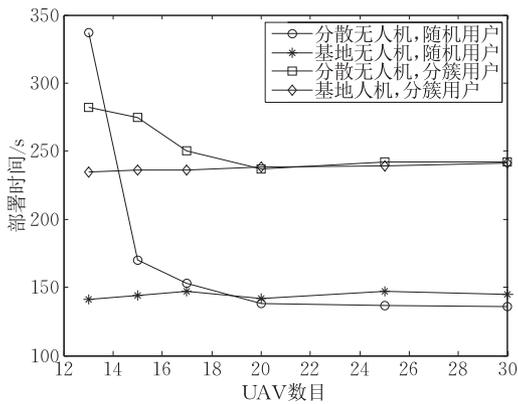
(1) 移动时间  $T$ . 由于无人机能源有限,因此部署时间直接决定了部署算法的优劣程度. 本文所有仿真的迭代间隔都为1s,同时所有无人机每次迭代的最大移动距离  $L_{\max}$  从12m开始呈余弦滚降递减,最终的移动结束条件由两个因素决定:(a)所有无人机的移动距离小于移动停止门限  $l_{\text{stop}}$ ;(b)所有无人机都满足双连接结构。

(2) 移动公平性  $f_{\text{UAV}}$ . 该部署算法能够动态记录所有无人机的飞行轨迹,于是用Jain氏公平性指数来表示移动距离的公平性

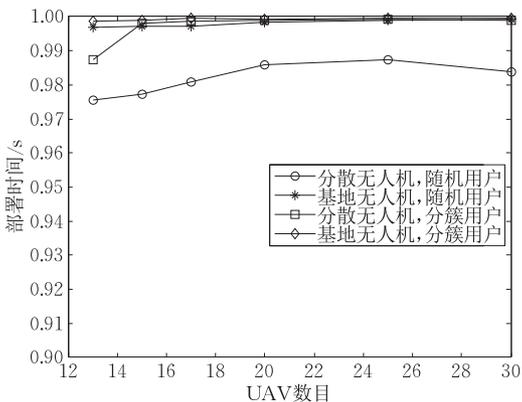
$$f_{\text{UAV}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N D_i\right)^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N (D_i)^2} \quad (16)$$

其中  $N$  表示无人机数目,  $D_i$  表示各个无人机在整个部署过程的移动距离. 各无人机移动距离相差越小时,公平性指数越高。

图10(a)描述了4种场景下移动时间  $T$  随无人机数目  $N$  变化的曲线图. 从图中可看出基地无人机两种场景下的  $T$  对无人机数目  $N$  的变化不敏感,然而分散无人机的两种场景的移动时间  $T$  在  $N < 20$  时随之减小,而在  $N > 20$  后趋于稳定. 这是因为从基地出发的各无人机运动速度接近,始终以环形向四周均匀扩展;但无人机从区域的四面八方往热点汇聚时,无人机数量越少则越难实现区域的按需覆盖以及双连接结构. 另一方面,分簇用户需要花费更多的移动时间,这也是由分簇用户伴随的额外部署工作量所决定的。



(a) 移动时间与无人机数目之比



(b) 移动公平性与无人机数目之比

图 10 部署性能曲线(200个用户)

图 10(b)则分析了 4 种场景下无人机移动公平性  $f_{UAV}$  随无人机数目  $N$  变化的结果. 不难发现, 4 种场景下公平性都高于 97%, 即整个无人机集群的飞行耗能十分均衡. 同时, 分散无人机的两种场景在无人机数目较少时存在上升趋势, 这也是分散导致的无人机密集程度差异所引起的, 稀疏区域的无人机则需要飞行更远的距离加入骨干网.

## 6.2 用户接入控制仿真

本节对上文提出的三种接入控制方法进行仿真分析. 2000m×2000m 的区域内分布 200 个用户(随机/分簇), 并分别在相同的用户场景下以 13~30 个的分散无人机进行部署, 部署后依次采用: (a) 最大信干噪比接入; (b) 满足信干噪比的随机接入; (c) 满足信干噪比的最小度数接入三种方法. 为使仿真结果更清晰直观, 此处引入如下衡量指标:

(1) 接入公平性. 依照 Jain 氏公平性指数, 对每个无人机接入用户的数量(度数)进行公平性分析. 另外, 由于簇连通线上的无人机通常只起到连通作用, 故这里将零度数连通无人机排除后进行计算.

(2) 用户接入比. 每个无人机接入度数受到

$load_{max}$  的限制, 因此用户根据先后顺序竞争接入骨干网. 用户接入比即成功接入的用户数与用户总数之比.

为探究三种接入选择方法的用户接入比性能, 此处取消用户接入比的限制(区别于表 1). 相关全局参数设计如表 2.

表 2 接入控制仿真参数设置

参数	符号	数值
总用户数	$M$	200
无人机最大接入用户数	$load_{max}$	20
无人机对每个用户发射功率	$p_{i,k}$	40 dBm
空对地信道载波频率	$f$	2 GHz
$\alpha$	—	9.6
$\beta$	—	0.28
LoS 下其他路径损耗	$\eta_{LoS}$	1 dB
NLoS 下其他路径损耗	$\eta_{NLoS}$	20 dB
高斯白噪声功率	$N_{gw}$	-174 dBm/Hz
SINR 门限	$\Delta_{th}$	-7 dB

图 11(a)、(b)分别反映了 200 个随机用户和分簇用户分布下, 不同数目无人机对接入公平性的影响. 可以看出, 两种用户分布模式下三种接入方法的公平性指数都高于 78%, 其中最小度数接入(方块曲线)更是高于 85%, 在图 11(a)和(b)中与另外两种接入选择方法相比分别平均高出 6% 和 9%, 意味着无人机接入用户的公平性较高, 负载均衡效果较理想. 这个结果是由第三种接入方法的合理调配决定的, 将网络资源的平均分配最大化. 两图中无人机接入公平性随着无人机数目增多都呈现缓降的趋势, 这是由于无人机增多的同时用户数不变, 度数的较小差异被公平性中的平方求和计算放大.

图 11(c)、(d)分别画出了随机和分簇用户分布下, 用户接入比与无人机数目比较的性能曲线. 两种用户模式下, 三种接入方法都收获了高于 92% 的用户接入比. 图 11(c)反映出随机用户模式下, 当无人机数不超过 20 时, 用户接入比成上升趋势, 而  $N > 20$  后呈现略微下降趋势. 这是因为无人机数目增多使用户接入竞争程度变小, 因而接入比升高; 而无人机过于紧密排布对用户的信号干扰增大, 通信 SINR 无法满足便会使接入比减小. 在图 11(d)中, 最大 SINR 接入(圆形虚线)和随机接入(三角形虚线)在  $N < 20$  时同样成上升状态,  $N > 20$  后接入比几乎都接近 100%, 而最小度数接入(方块虚线)采取的资源调配方法使其始终稳定在最大接入比状态. 结合公平性分析可以发现, 最小度数的接入在提高无人机接入公平性的同时, 也大大降低了用

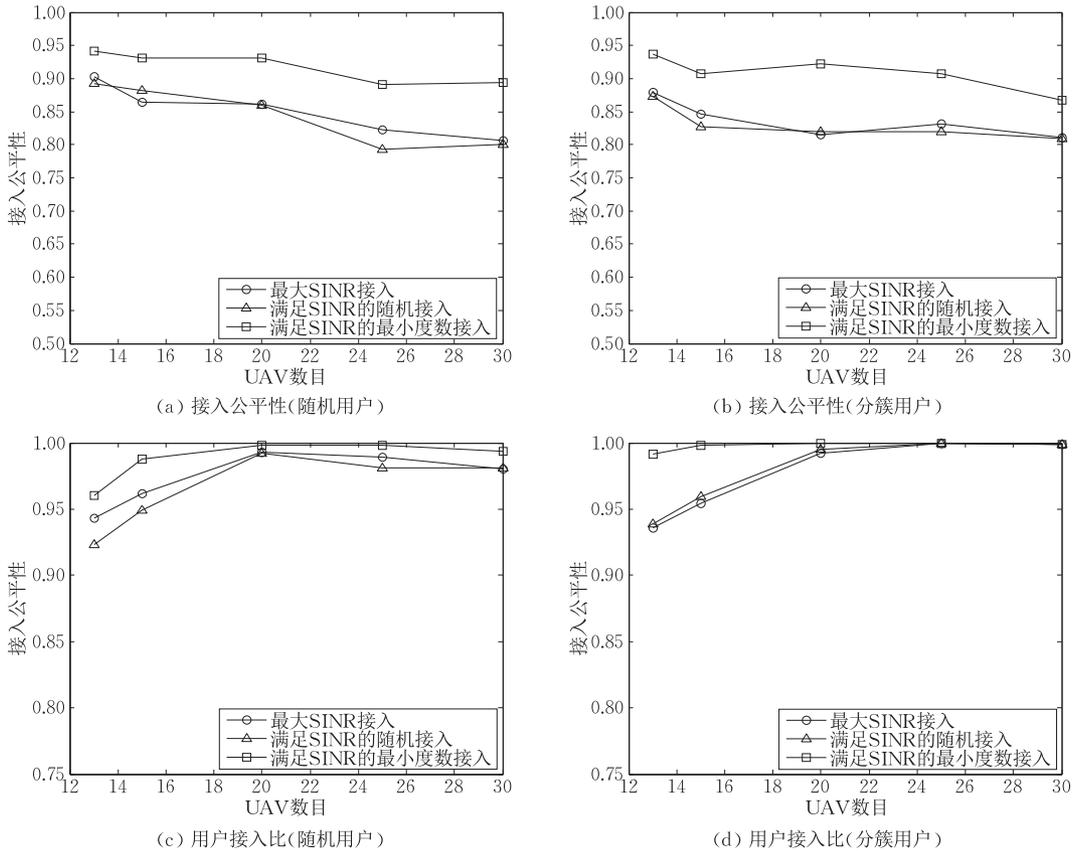


图 11 接入控制性能曲线(200 个用户, 20 个分散无人机)

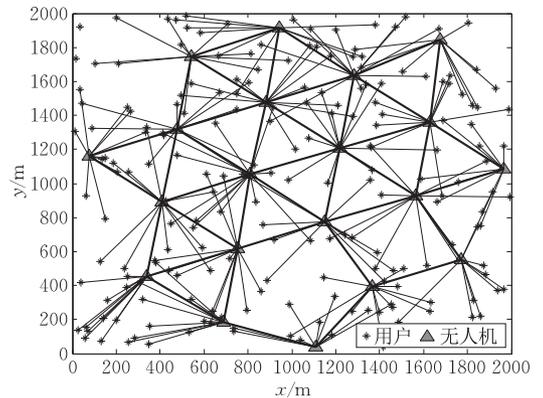
户竞争接入的激烈程度, 用户以无人机度数信息的交互代价换取了整个区域的负载均衡和接入成功率。

### 6.3 干扰模型分析

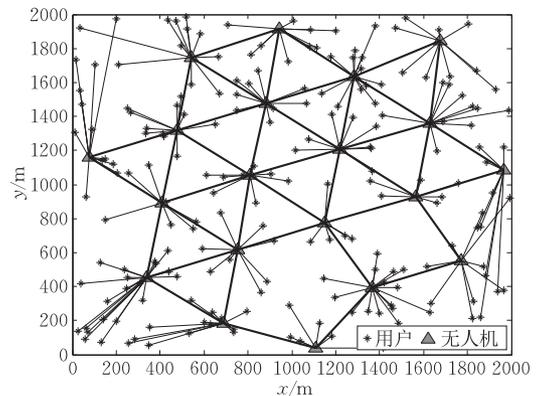
本文干扰模型借鉴蜂窝网络干扰模型, 每个用户会受到所有无人机广播干扰叠加. 为了分析不同干扰模型下本文算法的适应性, 此部分我们考虑另外两种常用的干扰模型: (1) 不考虑其他无人机的广播干扰: 只要  $UE_k$  接收到  $UAV_i$  的信噪比 SNR 大于某个阈值,  $UE_k$  即可以接入该无人机; (2) 只考虑相邻无人机的干扰:  $UE_k$  只受到  $UAV_i$  邻居无人机的广播干扰。

为了便于比较, 在这两种干扰模型下, 用户统一采取最小度数接入方法, UAV 和 UE 分布仍采用如图 4(d) 的结果, 仿真结果以及相应阈值设置如图 12。

对比图 12(a)、(b) 以及图 4(d), 随着干扰情况愈加严重, 用户只能就近选择无人机接入. 其中图 12(a)、(b) 以及图 4(d) 的无人机接入公平性分别为 0.996、0.904 和 0.903. 由此我们得到如下结论: (1) 本文所提算法可以适应不同的干扰模型; (2) 干扰叠加会降低整个网络的接入公平性。



(a) 无干扰接入(SNR&gt;38 dB)



(b) 邻居无人机干扰接入(SINR&gt;-5 dB)

图 12 干扰模型对比分析

## 7 总 结

本文提出了基于虚拟力的分布式无人机部署算法以及最大 SINR 接入、满足 SINR 随机接入和满足 SINR 最小度数接入三种骨干网接入控制,在实现按需覆盖并维持骨干网稳定双连接结构的同时,也最大化了整个骨干网的负载均衡和用户接入. 分布式部署算法引入虚拟力的概念,无人机集群无需中心控制即可在虚拟力牵引下智能移动到合适位置,适用于感知设备齐全的未知地面情况部署. 三种接入控制方法以用户 SINR 和无人机接入度数的侧重不同各具特点,将接入的选择权交予用户手中. 另外,本文进行的深入仿真分析证实该分布式部署算法适用于多种无人机、用户分布场景,甚至包括动态用户和障碍环境;同时在三种接入方法仿真中,满足 SINR 最小度数接入以交互代价换取了骨干网负载均衡和用户接入成功率的最大化,在 SINR 容忍范围提高了整个骨干网的服务质量.

## 参 考 文 献

- [1] Ullah H, McClean S, et al. An optimal UAV deployment algorithm for bridging communication//Proceedings of the 15th International Conference on ITS Telecommunication. Warsaw, Poland, 2017: 1-7
- [2] Kwon J, Hailes S. Scheduling UAVs to bridge communication in delay-tolerant networks using real-time scheduling analysis techniques//Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration. Tokyo, Japan, 2014: 363-369
- [3] Liu Hai, Chu Xiao-Wen, et al. Simple movement control algorithm for bi-connectivity in robotic sensor networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2010, 28(7): 994-1005
- [4] Mozaffari M, Saad W, et al. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. IEEE Communication Letters, 2016, 20(8): 1647-1650
- [5] Semnani S H, Basir O A. Semi-flocking algorithm for motion control of mobile sensors in large-scale surveillance systems. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(1): 129-137
- [6] Zorbas D, Razafindralambo T, Guerriero F, et al. Energy efficient mobile target tracking using flying drones. Procedia Computer Science, 2013, 19: 80-87
- [7] Mozaffari M, Saad W, et al. Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles//Proceedings of the IEEE International Conference on Communication. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1-6
- [8] Orfanus D, de Freitas E P, Eliassen F. Self-organization as a supporting paradigm for military UAV relay networks. IEEE Communication Letters, 2016, 20(4): 804-807
- [9] Che Nan, Li Zhi-Jun, Jiang Shou-Xu. Relay deployment algorithm in heterogeneous wireless networks. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 905-918(in Chinese)  
(车楠, 李治军, 姜守旭. 异构无线网络中 Relay 节点部署算法. 计算机学报, 2016, 39(5): 905-918)
- [10] Das S, Liu H, Nayak A, Stojmenovic I. A localized algorithm for bi-connectivity of connected mobile robots. Telecommunication System, 2009, 40(3-4): 129-140
- [11] Liu H, Wan P J, Jia X. On optimal placement of relay nodes for reliable connectivity in wireless sensor networks. Journal of Combinatorial Optimization, 2006, 11: 249-260
- [12] Zhang Long, Zhou Fan, Bai Chun-Hong, Xu Hai-Tao. Analytical model for predictable contact in intermittently connected cognitive radio ad hoc networks. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12(7): 1-12
- [13] Zhang Long, Zhou Xian-Wei. Joint cross-layer optimized routing and dynamic power allocation in deep space information networks under predictable contacts. IET Communications, 2013, 7(5): 417-429
- [14] Zhang Long, Zhuo Fan, Xu Hai-Tao. A cross-layer optimization framework for congestion and power control in cognitive radio ad hoc networks under predictable contact. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, (1): 57-79
- [15] Boufares N, Khoufi I, Minet P, et al. Three dimensional mobile wireless sensor networks redeployment based on virtual forces//Proceedings of the Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Valencia, Spain, 2017: 1628-1633
- [16] Zhao Hai-Tao, Mao Ling-Chu, Wei Ji-Bo. A simple motion control algorithm for autonomous robotic sensor networks. Computer Networks, 2018, 135: 190-200
- [17] Zhao Hai-Tao, Wei Ji-Bo, Huang Sheng-Chun, et al. Regular topology formation based on artificial forces for distributed mobile robotic networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, DOI: 10.1109/TMC.2018.2873015
- [18] Tan Li, Yang Chao-Yu, Tang Xiao-Jiang, Jiao Yao-Yao. A target tracking algorithm based on path virtual force//Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Guangzhou, China, 2017: 512-517
- [19] Zhao Hai-Tao, Liu Hai, Leung Yiu-Wing, Chu Xiao-Wen. Self-adaptive collective motion of swarm robots. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(4): 1533-1545
- [20] Hanjin L, Dongwook K, Byungchun C, et al. Adaptive hysteresis using mobility correlation for last handover. IEEE Communication Letters, 2008, 12(2): 152-154
- [21] Roy S D, Reddy S R V. Signal strength ratio based vertical handoff decision algorithms in integrated heterogeneous networks. Wireless Personal Communications, 2014, 77(4): 2565-2585

- [22] Ahuja K, Singh B, Khanna R. Network selection algorithm based on link quality parameters for heterogeneous wireless networks. *Optik*, 2014, 125(14): 3657-3662
- [23] Sheng Jie, Tang Liang-Rui, Hao Jian-Hong. Hybrid load balancing algorithm based on service transformation and admission control in heterogeneous wireless networks. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(2): 321-328(in Chinese)  
(盛洁, 唐良瑞, 郝建红. 异构无线网络中基于业务转移和接入控制的混合负载均衡. *电子学报*, 2013, 41(2): 321-328)
- [24] Gerasimenko M, et al. Characterizing performance of load-aware network selection in multi-radio (WiFi/LTE) heterogeneous networks//Proceedings of the IEEE GLOBECOM Workshops. Atlanta, USA, 2013: 397-402
- [25] Ma D, Ma M. Proactive load balancing with admission control for heterogeneous overlay networks. *Wireless Communication & Mobile Computing*, 2013, 13(18): 1671-1680
- [26] Chen H, Cheng C, et al. Guard-channel-based incremental and dynamic optimization on call admission control for next-generation QoS-aware heterogeneous systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(5): 3064-3082
- [27] Miao J, Hu Z, et al. Joint power and bandwidth allocation algorithm with QoS support in heterogeneous wireless networks. *IEEE Communication Letters*, 2012, 16(4): 479-481
- [28] Al-Hourani A, Kandeepan S, Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage. *IEEE Wireless Communication Letters*, 2014, 3(6): 569-572



**WU Wei-Yu**, born in 1994, M. S. candidate. Her research interest is wireless communication networks.

**WANG Hai-Jun**, born in 1993, Ph. D. candidate. His research interests include intelligent access and networking of unmanned aerial vehicle flocks.

**WANG Ling**, born in 1962, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. Her research interests include network and communication technology.

**WEI Ji-Bo**, born in 1967, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include wireless network protocol and signal processing in communications.

**ZHAO Hai-Tao**, born in 1981, Ph. D., associate professor.

His research interests include cognitive radio networks, self-organized networks and cooperative communications.

## Background

In the last few years, UAV network has been an attractive topic in the field of MANET communication. Specifically, UAVs can act as flying base stations to bring multi-hop communication to users on the ground, where deployment of UAVs and access selection are crucial problems. With years of research and technology development, deployment algorithms can be classified into three categories: some papers focus on the maximum coverage of UAV networks, some hope to minimize the transmit power while serving users and others take topology more seriously. Meanwhile, researches for access selection aim at RSS, load balancing and QoS of service respectively. But those algorithms are one-sided and mostly depend on centralized control. Therefore, we are devoted to designing a distributed deployment algorithm for on-demand coverage while at the same time maintaining the connectivity among UAVs without centralized control. Moreover, three access selection algorithms are proposed to maximize the load balancing and access ratio of the UAV airborne networks.

Firstly, as for our deployment algorithm, UAV can autonomously move to its proper location based on local information, i. e., the UEs that it finds and the status of neighbor UAVs. During the deployment, not only the final

positions of UAVs but also the motion track of each one has been recorded. Secondly, our three access selection algorithms, access for maximum SINR, random access based on SINR and minimum degree access based on SINR, put different emphasis on the SINR and access degree of UAVs, which take load balancing and access ratio into consideration.

Simulations further more validate our algorithms. On one hand, deployment pictures show that our algorithm applies to multi-scenario, where UEs are distributed randomly or in cluster, UAVs depart dispersedly or from base, an obstacle stands and UEs move freely. Besides, the motion control time is no more than 300 s on average under static pattern. On the other hand, three access algorithms achieve at least 80% in access fairness and more than 92% in access ratio of UEs.

This algorithm was supported in part by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61471376, which focus on UAV airborne networks in disaster relief or military operation where terrestrial base stations are destroyed or out of work, enhancing the wireless capacity and coverage. The deployment of UAVs and access selection in this work are key researches of the whole project, building up a good basis for further investigation.