

面向通信负载均衡的轨迹优化技术研究

林青, 黄玉蕾

(西安培华学院 智能科学与信息工程学院, 西安 710125)

摘要: 应急救援场景下, 无人机可以作为应急通信设备搭建应急通信网络; 在无人机构建的应急通信系统中, 无人机的负载情况会影响地面用户的通信质量; 面向通信负载均衡, 对多无人机通信系统中无人机的轨迹优化技术进行了研究; 提出了无人机轨迹优化模型, 分别设计了基于用户位置和基于无人机负载的虚拟力场计算公式; 以虚拟力场为依据, 提出了无人机轨迹控制方法, 给出了详细无人机运动控制流程; 仿真实验验证了算法在无人机轨迹优化的有效性, 平衡了无人机之间的用户负载, 提高了用户的通信吞吐量。

关键词: 无人机; 负载均衡; 应急通信; 轨迹优化;

Research on Trajectory Optimization Technology for Communication Load Balancing

LIN Qing, HUANG Yulei

(Intelligent Science and Information Engineering College, Xi'an Peihua University, Xi'an 710125, China)

Abstract: In the scene of emergency relief, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) can be used as emergency communication equipment to build emergency communication network. In the emergency communication system constructed by multiple UAVs, the load of UAVs will affect the communication quality of ground users. For communication load balancing, the trajectory optimization technology of UAV in multi UAV Communication system is studied. The virtual force field based on user position and the virtual force field based on UAV load are proposed, and the calculation formula of virtual force field is given. Based on the virtual force field, the motion control method of UAV is proposed, and the detailed motion control flow of UAV is given. Simulation results verify the effectiveness of the algorithm in UAV trajectory optimization, balance the user load between UAVs, and improve the user's communication throughput.

Keywords: UAV; load balancing; emergency communications; trajectory optimization

0 引言

近年来, 国内公共事件和自然灾害时有发生。2015年7月代号为“亚马逊”的超级台风登陆我国境内, 类似的不可抗力破坏强大。灾害发生时, 地面基站、天线等通信设备可能受到破坏。为了快速恢复通信网络, 提高应急救援效率, 目前大量研究者开始关注用无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 搭建应急通信网络^[1-5]。

在搭建无人机通信网络时, 无人机的部署将影响应急通信的质量^[6], 目前常见的无人机应急通信为单无人机系统^[7-10]和多无人机系统^[11-14]两类。然而单无人机系统难以满足大面积通信覆盖的需求, 故在应急救援场景中需要考虑多无人机协同的应急通信网络构建^[15]。目前针对多无人机轨迹优化的研究很少从通信的角度出发考虑通信服务的负载均衡问题^[16]。虽然一部分研究中无人机能够为地面用户提供通信覆盖^[17], 但是无人机之间由于负载不均衡, 导致用户性能公平性差^[18-19]。

基于上述考虑, 本文提出一种面向通信负载均衡的多无人机轨迹优化方案。首先, 设计了面向负载均衡的轨迹优化系统结构。其次, 以用户数量作为无人机负载衡量指标, 构建了基于无人机负载的虚拟力场模型和基于用户位置的虚拟力场模型, 再次, 设计了基于虚拟力场的无人机控制方法。最后, 通过仿真验证了用户通信吞吐量的提升。

1 基于通信负载均衡的无人机轨迹优化系统设计

面向负载均衡的无人机轨迹优化系统包括3大类模块, 分别是无人机通信环境信息检测模块、虚拟立场计算模块和无人机运动控制模块, 如图1所示。

无人机通信环境检测模块由图1中左侧实线框中3个子模块构成。具体功能包括用户位置检测, 检测信息汇总和用户数量检测。所提出系统以负载均衡为轨迹优化依据, 优化过程中, 需要考虑对无人机轨迹和系统性能产生影响的两个因素: 1) 单个无人机下, 服务用户的数据传输性能

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2021-05-26。

基金项目: 西安培华学院科研项目(PHKT2005)。

作者简介: 林青(1979-), 女, 陕西西安人, 硕士, 副教授, 主要从事5G网络、大数据方向的研究。

引用格式: 林青, 黄玉蕾. 面向通信负载均衡的轨迹优化技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 243-246, 258.

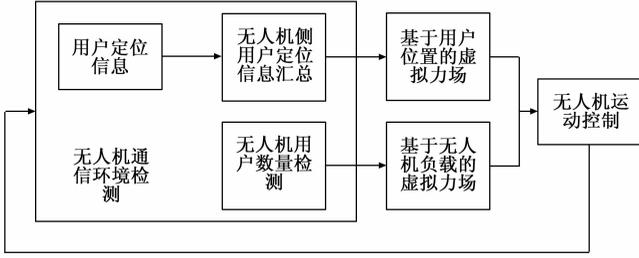


图 1 面向通信负载均衡的多无人机轨迹优化结构

指标；2) 多个无人机之间的负载差异。上述两个因素在实际无人机通信系统中可以通过用户位置信息和无人机服务用户的数量来确定。

在无人机侧用户定位信息汇总模块中，每个无人机采集其服务用户的位置坐标信息，由于无人机的运动速度远大于用户移动速度，故假设用户是静止坐标，表示为 $\{\tilde{x}_j, \tilde{y}_j\}$ ，其中 j 是用户编号。在用户数量检测模块中，每个无人机统计其服务用户的数量，并以该数量作为负载情况。

在得到上述信息后，考虑在优化无人机负载均衡性能的同时需要优化每个无人机对其用户的服务性能。根据虚拟立场理论，设计基于无人机负载的虚拟力场和基于用户位置的虚拟力场，前者用于负载均衡优化，后者用于通信性能优化。

基于无人机负载的虚拟力场 (Fv) 示意图如图 2 所示。当两个相邻无人机服务用户数量不同时，用户少的无人机通过向用户多的无人机移动，可以将用户多的无人机的一部分用户分流到用户少的无人机中。

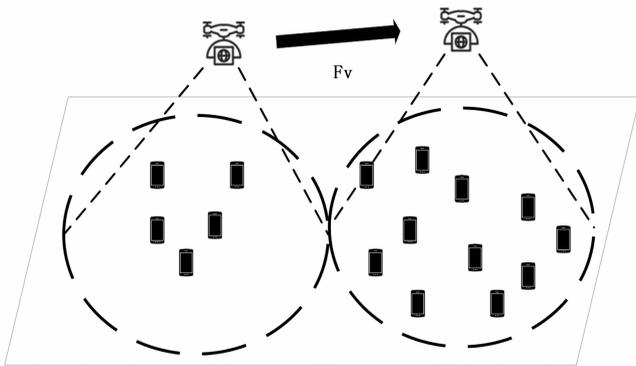


图 2 基于无人机负载的虚拟力场

基于用户位置的虚拟力场 (Fu) 示意图如图 3 所示，其意义在于将无人机移动到用户分布的几何中心，以实现其覆盖范围内用户数据传输速率的公平性。

在得到两种虚拟力场后，通过力的合成，得到无人机轨迹优化的合力。

2 无人机下行通信系统模型

在一个多无人机下行通信系统中，系统包含 N 个用户设备 (UE, user equipment) 和 M 个无人机，分别用 UE_j 和 UAV_i 来表示， $j (j \in [1, N])$ 、 $i (i \in [1, M])$ 分别

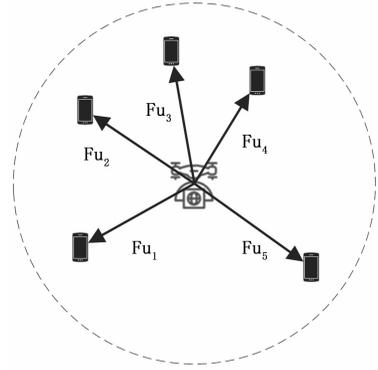


图 3 基于用户位置的虚拟力场

是无人机和用户的编号。假设无人机的高度都是 H ，在 n 时刻，无人机的三维位置坐标为 $\{x_i [n], y_i [n], H\}$ 。由于无人机的移动速度远快于 UE，假设在无人机导航过程中用户的位置固定，其坐标为 $\{\tilde{x}_j, \tilde{y}_j\}$ 。则 n 时刻， UE_j 和 UAV_i 之间的距离为：

$$d_{i,j}[n] = \sqrt{(x_i[n] - \tilde{x}_j)^2 + (y_i[n] - \tilde{y}_j)^2 + H^2} \quad (1)$$

假设无人机的极限速度是 V_{max} ，则 $\sqrt{(x_i[n] - x_i[n-1])^2 + (y_i[n] - y_i[n-1])^2} \leq V_{max}$ 。

在空一地无人机通信模型中，同时存在视距通信和非视距通信。视距通信的概率可以表示为^[20]：

$$P_{i,j}^{LoS}[n] = \frac{1}{1 + a \exp\left(-b \left(\frac{180}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{H}{r_{i,j}[n]}\right) - a\right)\right)} \quad (2)$$

其中： a 和 b 都是由环境决定的系统参数，

$$r_{i,j}[n] = \sqrt{(x_i[n] - \tilde{x}_j)^2 + (y_i[n] - \tilde{y}_j)^2} \quad (3)$$

则非视距通信的概率为 $P_{i,j}^{NLoS}[n] = 1 - P_{i,j}^{LoS}[n]$ 。

在 n 时刻， UAV_i 和 UE_j 的期望路径增益是：

$$g_{i,j}[n] = g_{i,j}^{LoS}[n] \times P_{i,j}^{LoS}[n] + g_{i,j}^{NLoS}[n] \times P_{i,j}^{NLoS}[n] \quad (4)$$

其中： $g_{i,j}^{LoS}$ 和 $g_{i,j}^{NLoS}$ 分别表示视距和非视距的路径增益，由下式计算获得。

$$\begin{aligned} g_{i,j}^{LoS}[n] &= \eta_{LoS} \times \rho_0 \times d_{i,j}^{-2}[n] \\ gg_{i,j}^{NLoS}[n] &= \eta_{NLoS} \times \rho_0 \times d_{i,j}^{-2}[n] \end{aligned} \quad (5)$$

假设 UAV_i 的发射功率是 p_i ，则 UE_j 的信干噪比为：

$$\gamma_{i,j}[n] = \frac{p_i[n] g_{i,j}[n]}{\sum_{k \neq i} p_k[n] g_{k,j}[n] + \sigma^2} \quad (6)$$

假设无人机将其带宽平均分配给其服务的所有用户， B_0 为 UAV 可用的总带宽， $N_i [n]$ 为 UAV_i 在 n 时刻的服务用户数量， UE_j 由 UAV_i 提供通信服务时，其获得的带宽为 $B_{i,j} [n] = B_0 / N_i [n]$ ， UE_j 的吞吐量为：

$$T_{i,j}[n] = B_{i,j}[n] \log_2(1 + \gamma_{i,j}[n]) \quad (7)$$

3 面向下行通信负载均衡的无人机轨迹优化算法

无人机轨迹优化由图 1 中的无人机控制模块执行，该控制模块由基于用户位置的虚拟力场和基于无人机位置虚拟力场决定。虚拟力场的方向和大小为无人机轨迹优化提供依据。下面首先介绍 2 种虚拟力场的计算方法，然后给

出虚拟力场对无人机轨迹的控制方法。

3.1 基于无人机负载的虚拟力场

基于无人机负载的虚拟力场的目的在于平衡无人机之间的用户数量。以用户数量作为衡量无人机负载的指标, 则对于 UAV_i, 在 n 时刻的负载定义为:

$$L_i[n] = N_i[n] \quad (8)$$

其中: $N_i[n]$ 是 n 时刻 UAV_i 服务的用户数量。

当无人机服务用户数量较少时, 它需要向相邻的用户较多的无人机方向移动, 以分担其部分通信用户, 如图 2 所示。根据上述物理意义, 构建基于无人机负载的虚拟力场如下:

$$\overrightarrow{Fv_{i,k}[n]} = Kv \times (L_i[n] - L_k[n]) \cdot \overrightarrow{D_{i,k}^v} \quad (9)$$

$\overrightarrow{Fv_{i,k}[n]}$ 是对于 UAV_i 在 n 时刻, 从 UAV_i 到 UAV_k 的虚拟力场, Kv 是该力场的权重系数, $\overrightarrow{D_{i,k}^v}$ 是 UAV_i 到 UAV_k 的单位方向向量。力场的大小由相邻的两个无人机之间的用户数量差异决定, 用户数量差异越大, 则虚拟力场越强, 无人机需要移动的速度和距离越大。

网络中存在多个无人机, 但是通过轨迹优化实现负载均衡智能在相邻无人机之间进行。定义指示变量 $O_{i,k}[n]$ 表示 UAV_i 和 UAV_k 的相邻关系, 当 $O_{i,k}[n] = 1$ 时, UAV_i 和 UAV_k 在 n 时刻的关系是相邻无人机。

考虑到每个无人机附近可能有多个其他无人机, UAV_i 的总虚拟力场为其对周围每个无人机的虚拟力场叠加, 即:

$$\overrightarrow{Fv_i[n]} = \sum_{O_{i,k}[n]=1} \overrightarrow{Fv_{i,k}[n]} \quad (10)$$

3.2 基于用户位置的虚拟力场

基于用户位置的虚拟力场的目的在于提升一个无人机通信覆盖下用户性能的公平性, 保证每个用户都能使用适当的通信资源。基于用户位置的虚拟力场基本思想是让无人机运动到其用户所在位置的几何中心。

为了实现上述目标, 定义基于用户位置的虚拟力场如下:

$$\overrightarrow{Fu_{i,j}[n]} = Ku \times d_{i,j}^2[n] \cdot \overrightarrow{D_{i,j}^u} \quad (11)$$

其中: $\overrightarrow{Fu_{i,j}[n]}$ 是 n 时刻 UAV_i 到 UE_j 的虚拟力场, Ku 是该力场的权重系数, $\overrightarrow{D_{i,j}^u}$ 是 UAV_i 到 UE_j 的单位方向向量。 $\overrightarrow{Fu_{i,j}[n]}$ 的物理意义是当用户离无人机越远时, 其对无人机的引力越大。通过多个用户对无人机虚拟力场的合成, 合力将指向用户的几何中心。该虚拟力场的合力为:

$$\overrightarrow{Fu_i[n]} = \sum_{UE_j \in UAV_i} \overrightarrow{Fu_{i,j}[n]} \quad (12)$$

3.3 无人机轨迹优化算法

在 n 时刻, UAV_i 虚拟力场包括 $\overrightarrow{Fv_i[n]}$ 和 $\overrightarrow{Fu_i[n]}$ 两部分, 定义 UAV_i 的总力场为 $\overrightarrow{F_i[n]}$, 则:

$$\overrightarrow{F_i[n]} = \overrightarrow{Fv_i[n]} + \overrightarrow{Fu_i[n]} \quad (13)$$

$\overrightarrow{F_i[n]}$ 决定了 UAV_i 的运动方向和运动距离。UAV_i 在 n 时刻的运动为:

$$\{x_i[n+1], y_i[n+1]\} = \{x_i[n], y_i[n]\} + \overrightarrow{F_i[n]} \quad (14)$$

考虑到无人机存在最大速度的约束, 单位之内, 其运动距离应小于 V_{max} , 将无人机的运动控制过程改进为:

$$\{x_i[n+1], y_i[n+1]\} =$$

$$\begin{cases} \{x_i[n], y_i[n]\} + \overrightarrow{F_i[n]}, & \text{if } \overrightarrow{F_i[n]} < V_{max}; \\ \{x_i[n], y_i[n]\} + V_{max} \frac{\overrightarrow{F_i[n]}}{|\overrightarrow{F_i[n]}|}, & \text{if } \overrightarrow{F_i[n]} \geq V_{max} \end{cases} \quad (15)$$

当所有无人机单位时间运动距离小于 d 米时, 认为算法达到收敛, d 为自由变量, 可根据需求设置具体数值。具体算法流程如下。

对于 UAV_i:

Repeat

- 1) 统计服务用户数量;
- 2) 与相邻无人机交换用户数量信息;
- 3) 根据 (8) 计算本无人机和相邻无人机负载;
- 4) 根据 (9) 和 (10) 计算虚拟力场 $\overrightarrow{Fv_i}[n]$;
- 5) 获取服务用户位置;
- 6) 根据 (1) 计算无人机和用户之间的距离;
- 7) 根据 (11) 和 (12) 计算虚拟力场 $\overrightarrow{Fu_i}[n]$;
- 8) 根据 (13) 计算 $\overrightarrow{F_i}[n]$;
- 9) 根据 (14) 获得无人机在 $n+1$ 时刻的位置;
- 10) if 所有无人机单位时间运动距离小于 d ;

Break。

在执行上述算法后, 可以根据无人机下行通信系统模型验证算法性能。

4 仿真实验

仿真实验中将验证基于用户位置的虚拟力场控制效果、基于无人机负载的虚拟力场和基于用户位置的虚拟力场合力控制下的无人机位置分布、通信负载均衡性能指标等。

4.1 基于用户位置虚拟力场作用效果

单个无人机的场景下, 在 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的范围, 随机初始化无人机位置。假设场景中由 50 个用户, 并以泊松分布初始化用户位置。循环终止参数 $d = 0.3 \text{ m}$, $Kv = 0.1$, $Ku = 5$, 在利用基于用户位置虚拟力场对单无人机轨迹进行控制后, 无人机位置仿真实验结果如图 4 所示。图中星号代表用户, 三角标号是无人机初始化位置, 通过虚拟力场的轨迹控制后, 十字符号是无人机移动收敛后的位置, 圆圈是直接将所有用户位置加权平均后的理论最佳中心位置。从仿真可以看出算法控制的结果和最佳理论中心位置十分接近。

4.2 合力控制下的多无人轨迹优化

假设在 $2000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$ 的范围内, 有 16 架无人机负载该区域的通信覆盖, 300 个用户位置随机分布在该区域中。目前在应急通信场景下, 多采用无人机均匀分布的形式构成通信网。这里将上述无人机预设的分布模式和本研究提出的无人机轨迹优化方法进行对比。图 5 左图是本研究的实验结果, 图 5 右图是预设模式结果。通过对比发现, 本研究提出的无人机轨迹优化能够根据用户分布特征自动调整位置, 实现负载均衡。而在固定位置的无人机通信网

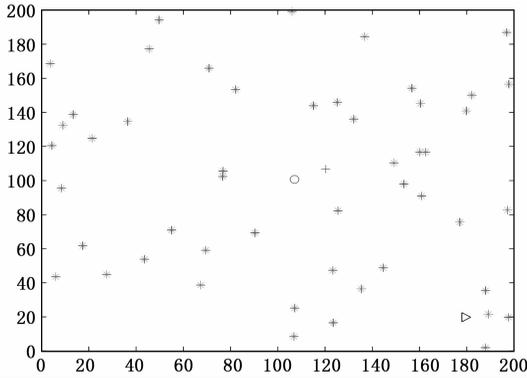


图 4 基于用户位置虚拟力场无人机位置控制

络, 会出现部分无人机服务用户过多和过少的情况, 导致负载不均衡。负载数据如图 6 所示。从结果中可以看出本文算法优化下无人机的用户分布数量比较均衡。

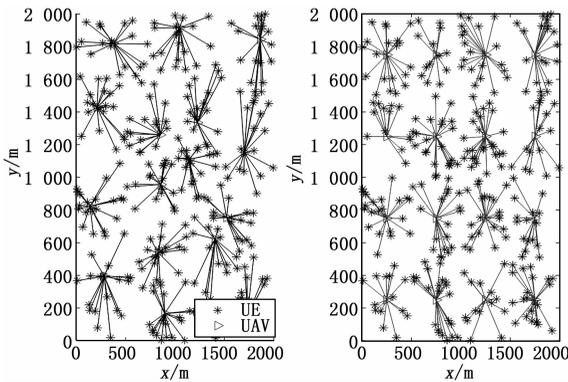


图 5 无人机位置优化仿真实验结果

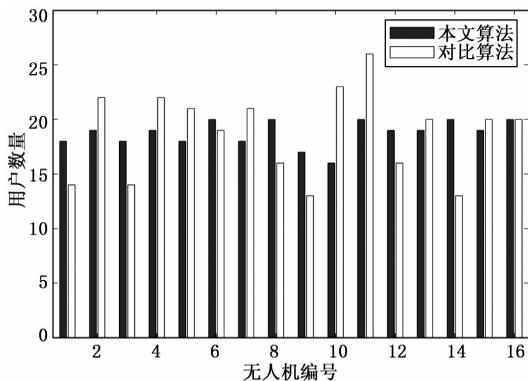


图 6 无人机负载分布结果

在得到无人机优化结果后, 验证用户通信质量。根据无人机下行通信系统模型, 将通信带宽归一化为 1, 噪声功率为 -101 dBm, 无人信号发射功率为 30 dbm, (2) 中的 $a=9.6$, $b=0.28$ 。根据通信模型, 在得到无人机和用户的无人机位置后, 可以根据 (1) ~ (7) 计算出用户的数据传输吞吐量。所有用户的吞吐量累计分布函数 (CDF, cumulative distribution function) 曲线验证结果如图 7 所示, 从 CDF 曲线分布可以看出本文算法能够提升用户的吞吐量性能, 用户的通信质量普遍高于对比算法。同时, 提高了公

平性。

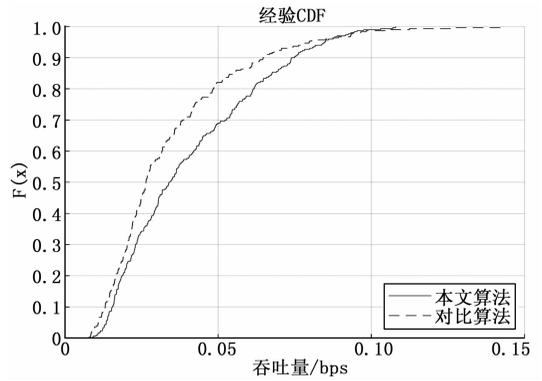


图 7 用户吞吐量 CDF 曲线

5 结束语

通过分析多无人机系统的负载特性以及用户分布对通信性能的影响, 设计了无人机轨迹优化模型, 提出了基于用户位置的虚拟力场和基于无人机负载的虚拟力场, 并围绕这两种虚拟力场, 进一步提出了无人机轨迹控制方法。

从仿真实验可以看出所设计虚拟力场和无人机轨迹控制过程的合理性。下一步将研究智能型更高的无人机轨迹控制优化方法, 拟采用人工智能手段进一步提升轨迹优化性能。

参考文献:

- [1] 轩书哲, 柯良军. 基于多智能体强化学习的无人机集群攻防对抗策略研究 [J]. 无线电工程, 2021, 51 (5): 360-366.
- [2] 谷旭平, 唐大全, 唐管政. 无人机集群关键技术研究综述 [J]. 自动化与仪器仪表, 2021 (4): 21-26.
- [3] 刘 栋, 连晓峰, 王宇龙, 等. 无人机无线通信协议的形式化认证分析与验证 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 244-250.
- [4] 罗 瑶, 罗 进. 基于 5G 的无人机智能组网的应急通信技术开发及应用 [J]. 电子测试, 2021 (7): 96-97.
- [5] 李 郁, 朱 伟. 基于无人机跟踪的目标反遮挡算法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 201-205.
- [6] 黄剑雄, 刘小雄, 章卫国, 等. 基于视觉/惯导的无人机组组合导航算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (2): 137-143.
- [7] WANG Z, DUAN L, ZHANG R. Adaptive Deployment for UAV-Aided Communication Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18 (9): 4531-4543.
- [8] HUANG Y, XU J, QIU L, et al. Cognitive UAV Communication via Joint Trajectory and Power Control [C] //2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Kalamata, 2018: 1-5.
- [9] YANG D, WU Q, ZENG Y, et al. Energy Tradeoff in Ground-to-UAV Communication via Trajectory Design [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (7): 6721-6726.

(下转第 258 页)