











12) 时, 保持无线 mesh 路由缓存的文件块不变, 仅调动中继无人机飞行, 结果如图 5 所示, 迭代至第 11 代时, 用户平均时延开始产生均匀的波动, 波动范围小于 0.001, 第 11 代至第 100 代波动仍旧存在且不变. 可知, 遗传算法面对有无穷多候选解时, 结果产生小幅度波动. 产生这一结果的原因在于中继无人机的基因编码为转弯角, 经过不断的迭代, 最佳的转弯角基本确定, 那么中继无人机则会按照转弯角进行近似圆轨迹飞行, 在用户平均时延上则体现为周期性波动. 如图 6 及图 7 所示, 无人机从坐标不断转弯飞行, 最后盘旋飞行, 轨迹为椭圆形, 体现在图 5 上为不断波动的平均用户时延, 在坐标 (124, 175) 处为用户平均时延最低, 为 1.113 s.

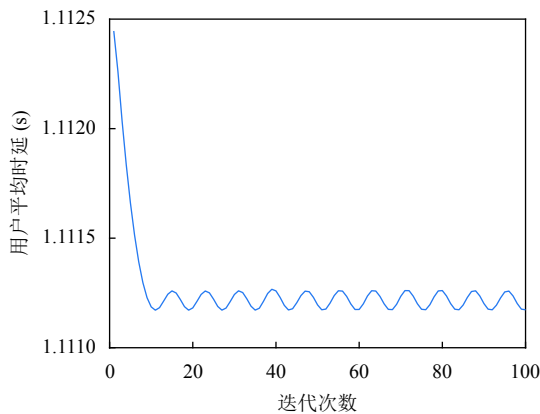


图 5 地面 mesh 路由缓存不变场景下用户平均时延

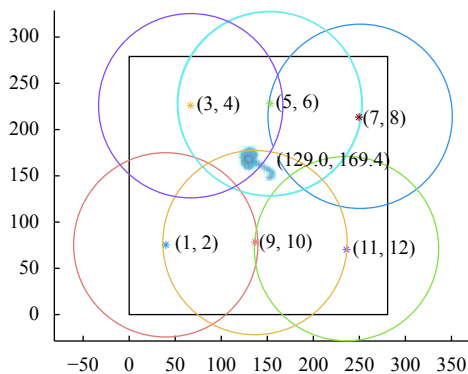


图 6 地面 mesh 路由缓存不变场景下结果示意图

### 3.2.3 中继无人机飞行且地面 mesh 路由协作缓存场景下用户平均时延

同时考虑中继无人机飞行加上地面无线 mesh 路由的缓存情况, 中继无人机起始点设为 (150, 150), 如图 8 所示, 曲线呈阶梯下降趋势. 最终用户平均时延收敛于 0.72. 如图 9 及图 10 所示, 无人机处于盘旋状态.

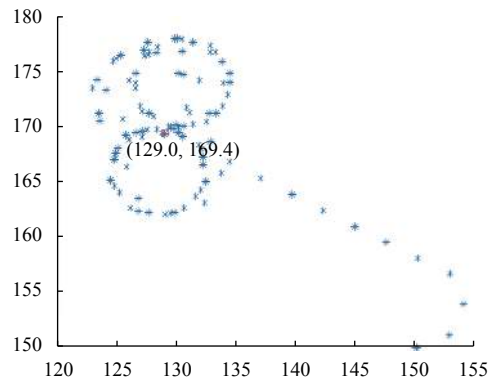


图 7 中继无人机飞行轨迹图

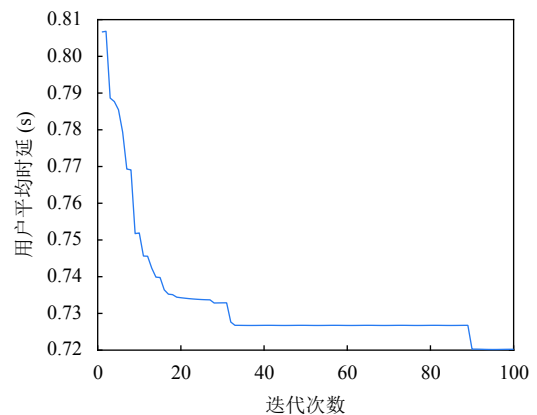


图 8 中继无人机保持飞行且地面 mesh 路由协作缓存场景下用户平均时延

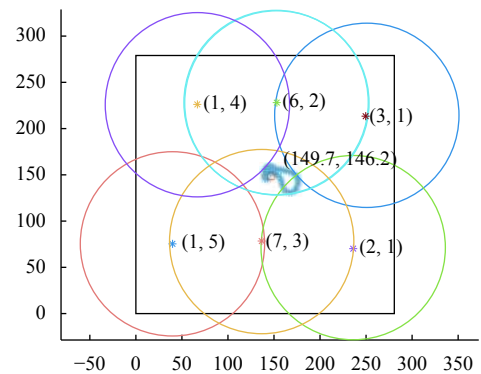


图 9 中继无人机飞行且地面 mesh 路由协作缓存场景下示意图

### 3.2.4 不同初始种群下所收敛的用户平均时延

同时考虑中继无人机飞行加上地面无线 mesh 路由的缓存情况, 设置不同的初始种群, 观察它们的结果, 如图 11 所示, 在 10 个初始种群种内用户平均时延收敛结果波动在 0.008 范围内, 在一定程度上可认为遗传算法迭代结果近似于最优解. 如表 3 所示, 每一行代表

一种收敛情况,第一种收敛情况中,路由器1表示编号为1的路由器缓存文件块1和文件块5,以此类推.横坐标 $x$ 及纵坐标 $y$ 表示中继无人机的最终位置坐标,第一种收敛情况中无人机最终坐标为(135.2, 146.8).路由器缓存结果各异,中继无人机位置亦不同,故收敛的结果未必一致.

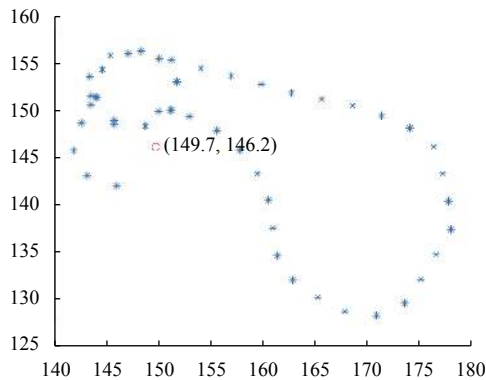


图10 中继无人机飞行轨迹图

综合上述仿真结果分析可得,无论是单独考虑缓存情况,中继无人机保持不动,或是单独考虑中继无人机飞行情况,地面无线 mesh 路由的缓存情况不变,亦或二者都发生改变,不论何种,在遗传算法的迭代下,

用户平均时延均呈现下降趋势.但仅考虑缓存改变的情况下平均用户时延为0.726 s,仅考虑中继无人机飞行时,用户平均时延为1.113 s,二者都考虑时,用户平均时延为0.72 s,显然,综合考虑地面无线 mesh 路由缓存与中继无人机调度,对用户体验的提升更为明显.观察各个无人机轨迹图,可知待时延趋于收敛时,无人机飞行角应基本不变,轨迹近圆形.不同种群迭代收敛结果有一定波动,但相差不大,在一定程度上可认为遗传算法对求解问题有积极意义.

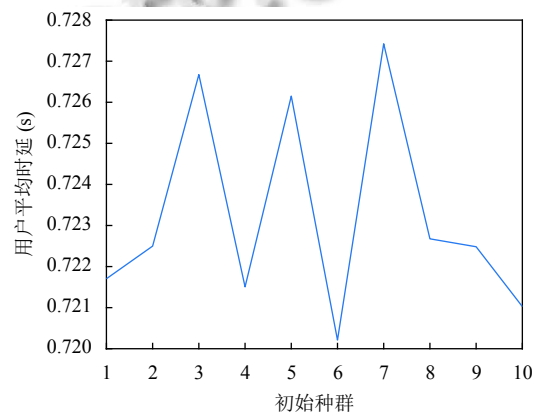


图11 不同种群收敛的平均用户时延

表3 不同初始种群的迭代收敛结果

初始种群	路由器1	路由器2	路由器3	路由器4	路由器5	路由器6	横坐标x	纵坐标y						
1	5	1	3	1	1	6	2	4	2	7	3	1	135.2	146.8
2	1	5	4	1	3	1	2	6	2	1	15	3	145.9	149.8
3	2	5	1	3	1	2	4	6	1	7	2	3	138.0	149.7
4	1	5	3	1	1	2	6	4	3	2	1	15	140.9	154.7
5	1	5	5	1	2	1	3	4	3	7	2	1	145.4	149.8
6	5	1	1	4	3	1	6	2	3	7	1	2	147.5	152.2
7	5	1	1	14	3	1	4	2	2	1	3	15	146.1	160.4
8	2	5	1	4	3	2	6	1	1	7	2	3	141.7	148.4
9	5	1	4	1	1	2	6	3	2	1	15	3	140.8	147.0
10	5	1	1	4	6	1	2	3	3	7	1	2	144.5	144.3

#### 4 总结与展望

本文从灾后通信设施遭到破坏,人员难以发送求救信息与居民对外通信受到影响的角度出发,研究地面与空中的混合 mesh 网络,以及地面无线 mesh 路由器协作缓存,作为传输中继的无人机飞行情况.本文重点考虑灾后通信的 mesh 网络组建后,无线 mesh 路由的协作缓存与传输中继无人机的飞行情况,使用遗传算法保证区域内用户取得文件的平均时延收敛在较低水平.通过设置不同的初始种群,判断遗传算法

结果是否为最优解.后续研究将同时考虑多个中继无人机的情况,研究多个区域的通信情况.目前仅采用遗传算法,后续可以多采用几种算法比较,如退火算法,深度强化学习,比较它们的运行时间、准确度、收敛性等因素.

#### 参考文献

- 蒋冰,郑艺,华彦宁,等.海上应急通信技术研究进展.科技导报,2018,36(6): 28-39.

- 2 王森. 基于物联网高速公路应急救援平台的构建. 科学技术创新, 2020, (4): 73–74. [doi: [10.3969/j.issn.1673-1328.2020.04.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1328.2020.04.042)]
- 3 邓创. 基于无线自组网的电力应急现场指挥通信系统. 电力信息与通信技术, 2015, 13(5): 67–72.
- 4 Sakano T, Kotabe S, Komukai T, *et al.* Bringing movable and deployable networks to disaster areas: Development and field test of MDRU. *IEEE Network*, 2016, 30(1): 86–91. [doi: [10.1109/mnet.2016.7389836](https://doi.org/10.1109/mnet.2016.7389836)]
- 5 辛文飞. 应急救援网络中基于流量的无人机调度算法研究 [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
- 6 李俊锋, 裴建国, 白立崧, 等. 无线 Mesh 网络技术在应急救援通信保障中的应用研究. 武警学院学报, 2019, 35(10): 39–43.
- 7 李旭峰. 无线 Mesh 网络节点部署及干扰优化分析研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- 8 王岩. 基于无线通信网络拓扑结构研究分析. 信息通信, 2015, (8): 174–175. [doi: [10.3969/j.issn.1673-1131.2015.08.112](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1131.2015.08.112)]
- 9 孟晖, 宋俊海. 卫星通信在应急通信中的应用及发展. 科技导报, 2018, 36(6): 40–46.
- 10 吕臻. 应急通信指挥车的智能化管理. 电信快报, 2015, (1): 24–26.
- 11 王纪强, 吴晨, 宋文杰, 等. 地震救援现场应急通信体系研究. 地震工程学报, 2017, 39(S1): 214–219.
- 12 冯逸飞, 吕振义, 蔡懿灵, 等. 基于无人机搜救平台的海上落水伤员救援决策演练设计. 解放军医院管理杂志, 2019, 26(12): 1133–1135.
- 13 赖友强. 应用于户外的无人机应急搜索系统研究 [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2016.
- 14 李艳庆. 基于遗传算法和深度强化学习的多无人机协同区域监视的航路规划 [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- 15 邢元勋. 基于群体智能算法的无人机灾区搜救优化研究 [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- 16 杨铭, 靳志勇, 詹嘉文, 等. 野外生命搜救无人机探测系统的设计. 轻工科技, 2018, 34(4): 73–75, 103.
- 17 李源, 高嵩, 阚瑗珂, 等. 有体征监测功能的无人机野外搜救系统的设计. 高技术通讯, 2015, 25(10–11): 941–947.
- 18 于千喻, 杨涛, 冯辉, 等. 无线网络多基站低时延协作缓存方案研究. 复旦学报(自然科学版), 2019, 58(2): 231–240.
- 19 胡晓艳. 缓存可感知的路由机制研究 [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- 20 牟林宏. 基于邻居发现的协同缓存技术研究 [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- 21 莫云明. 基于内容流行度和节点中心度的协同缓存策略 [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- 22 陈劫博. 基于节点中心性和内容流行度的 NDN 协作缓存策略研究 [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- 23 张勋杨. 中继协作无线网络中基于缓存管理的网络编码传输方案研究 [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- 24 牛煜霞. D2D 辅助蜂窝网络中的协作缓存策略 [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- 25 索乐曼. 无线通信网络中的协作缓存管理 [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- 26 Qi KQ, Han SQ, Yang CY. Learning a hybrid proactive and reactive caching policy in wireless edge under dynamic popularity. *IEEE Access*, 2019, 7: 120788–120801. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2936866](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936866)]
- 27 Li L, Chan CA, Erfani S, *et al.* Adaptive edge caching based on popularity and prediction for mobile networks. *Proceedings of 2019 International Joint Conference on Neural Networks*. Budapest, Hungary. 2019. 1–10. [doi: [10.1109/IJCNN.2019.8851794](https://doi.org/10.1109/IJCNN.2019.8851794)]
- 28 Liu Y, Zhi T, Xi HD, *et al.* A novel content popularity prediction algorithm based on auto regressive model in information-centric IoT. *IEEE Access*, 2019, 7: 27555–27564. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2901525](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901525)]