

地空异构网络中无人机辅助的文件协作缓存算法^①



郑云^{1,2}, 徐哲鑫^{1,2}, 陈锦峰^{1,2}, 吴怡^{1,2}

¹(福建师范大学 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福州 350117)

²(福建师范大学 福建省光电传感应用工程技术研究中心, 福州 350117)

通讯作者: 徐哲鑫, E-mail: xuzhexin@fjnu.edu.cn

摘要: 在发生重大自然灾害时, 所在区域的基站等通信设备容易遭到破坏, 无法满足受灾人员的通信需求. 针对该场景, 在无线 mesh 网络架构下, 提出地空异构网络中无人机辅助的文件协作缓存算法. 其中, mesh 路由器为主要缓存设备, 将缓存文件块作为缓存策略的基因, 采用遗传算法实现文件协作缓存, 减少用户请求文件的响应时延, 达到应急通信的目的; 无人机作为中继传输节点, 将转弯角作为轨迹规划的基因, 采用遗传算法得出最优中继位置, 辅助地面无线 mesh 路由缓存, 共同为用户提供文件块. 仿真结果表明, 所提出的算法可以显著降低用户获取文件的平均时延, 达到应急通信的目的.

关键词: 协作缓存; 无线 mesh 网络; 遗传算法; 无人机

引用格式: 郑云, 徐哲鑫, 陈锦峰, 吴怡. 地空异构网络中无人机辅助的文件协作缓存算法. 计算机系统应用, 2021, 30(1): 106-113. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7764.html>

UAV-Assisted File Cooperative Caching Algorithm in Ground-Air Heterogeneous Network

ZHENG Yun^{1,2}, XU Zhe-Xin^{1,2}, CHEN Jin-Feng^{1,2}, WU Yi^{1,2}

¹(Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education), Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

²(Fujian Provincial Engineering Technology Research Center of Photoelectric Sensing Application, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: In the event of a major natural disaster, communication equipment such as the base station in the area is vulnerable to damage, which is unable to meet the communication needs of the affected people. For this scenario, this study proposes a UAV-assisted file cooperative caching algorithm under the wireless mesh network architecture. Among them, the mesh router is the main cache device, the cache file block is used as the gene of cache strategy, and the genetic algorithm is used to implement file Cooperative Cache, which reduces the response delay of user request file, and achieves the purpose of emergency communication. UAV as the relay transmission node, takes the turning angle as the gene of trajectory planning, uses genetic algorithm to get the optimal relay position, assists the ground wireless mesh routing cache, and jointly provides file blocks for users. The simulation results show that the proposed algorithm can significantly reduce the average delay of users' access to files and achieve the purpose of emergency communication.

Key words: collaborative caching; wireless mesh network; genetic algorithm; UAV

① 基金项目: 国家自然科学基金-海峡联合基金 (U1805262); 福建省高校产学研合作项目 (2018H6007); 2018 年度福建省教育厅中青年教师教育项目 (JT180095)

Foundation item: Joint Fund for the Promotion of Scientific Cooperation across the Taiwan Straits of National Natural Science Foundation of China (U1805262); Industry-University Cooperation Project of Higher Education of Fujian Province (2018H6007); Mid-aged and Young Teachers Program for Education Research of Fujian Province in 2018 (JT180095)

收稿时间: 2020-05-14; 修改时间: 2020-06-12; 采用时间: 2020-07-15; csa 在线出版时间: 2020-12-31

每次地震、泥石流等自然灾害发生后,灾区附近的通信等电力设施都遭到严重破坏.因灾后建筑掩埋,短时间内难以恢复通信线路,受灾人员无法联系外界,无法发送求救信息,因此建立应急通信网络服务显得尤其重要.无人机凭借灵活多变的特性,在救援人员到达前可用其搭载无线设备进入灾区,建立应急通信架构,也可通过无人机携带或投放无线 mesh 路由,在短期内保障受灾人员的通信需求,方便受灾人员向外界发送求救信息.灾区内的文件请求预测中,大多为灾区救援重建以及与亲友联系的内容,通信请求的内容重复性较高,短时间内某些文件被重复请求,产生大量的数据冗余.因此需建立地面 mesh 缓存功能,减少网络内的重复能量消耗与路由开销,缩短获取内容的时间,同时减轻用于中继通信的无人机负载,改善受灾人员的通信体验感.目前,无人机和通信设备资源有限,灾后短时间内无法筹集足够的设备,且大部分灾区面积大、区域分散等,故在无线 mesh 混合网络中选择簇状网络作为应急通信网络.

在应急通信方面,卫星、无人机、海岸、舰船、水下可构成的一体化应急通信系统建设^[1].物联网高速公路应急救援平台也可快速获取事故信息^[2].已设计的电力应急现场指挥通信方案优化设计路由协议^[3],开发出集定位、信息交互的软件,可移动和可部署资源单元用于灾难网络快速恢复^[4].灾后应急救援网络把无人机网络与无线 mesh 网络共同构建簇状网络的架构^[5],使用节点流量感知的无人机动态调度算法,有效提升网络吞吐量.对 mesh 网络节点布放要求和节点覆盖能力进行估算^[6].构建无线 mesh 网络内部干扰模型^[7],验证无线 mesh 节点休眠策略有效性.优化无线网络拓扑覆盖方案^[8],调整天线的覆盖角度易于用户接收信号;增大功率可以增加天线的发送距离并且保证信号的畅通性.加入卫星通信系统在应急领域的应用^[9].基于3G/4G的应急指挥车辆管理信息系统设计方案可简化监测与维护难度^[10].优化应急通信网络架构和指挥中心保证前、后方决策部门之间通信无堵塞^[11].

在无人机搜寻救治人员方面,提出海上落水伤员救援决策方案^[12],对落水伤员搜索定位、伤员伤情监测、救援物资投送.建立无人机搜索系统^[13],制定短距离通信协议,获得野外遇险人员的地理位置.多无人机协同区域监视的航路规划方法^[14],使用遗传算法达到无人机监视覆盖率最大.蚁群算法在灾区无人机搜救

场景遍历所有区域形成封闭环状搜救路径^[15].野外生命搜救探测的无人机探测系统利用摄像头、热释电红外识别系统^[16]、雷达生物识别系统对野外遇险人员的准确定位.具有体征监测功能的 UAV 搜救系统,待搜救人员提前携带的救援信标机和体征监测仪^[17],将体征信息通过与无人机的通信链路传给救援中心来实施针对性救援.

在协作缓存方面,结合基站缓存容量大小及文件请求的分布^[18],构造了基于最小时延传输的0-1整数规划最优化问题.ICN方案^[19]对数据内容的流行度分布视图偏向于缓存不同的数据内容,减少冗余的缓存.基于用户偏好下不同缓存容量节点间的协同缓存放置策略利用坐标下降算法对子问题进行迭代得到近似最优解^[20].CCPNC缓存策略对不同流行度的内容对象分类缓存^[21],调动网络内核心路由节点与非核心路由节点协同工作.基于邻域可用性的协作缓存策略充分利用节点的邻域缓存信息^[22],提升系统性能.基于缓存管理的网络编码中继传输方案^[23]结合编码流速率增加编码机会,获得中继处不同流的缓存阈值实现编码决策.基于半定松弛的方法来获得缓存策略在缓存命中率和端到端时延方面具有竞争力^[24].协作组缓存策略选择具有最低内容缓存概率的相邻节点作为最佳候选者来减少内容冗余^[25].

上述研究的角度多种多样,但是这些没有考虑灾区应急通信中无线 mesh 路由的协作缓存与无人机调度的配合.本文使用 Matlab 遗传算法工具箱,综合考虑地面无线 mesh 路由的协作缓存与空中的中继无人机的飞行情况,将无人机作为传输中继与地面 mesh 路由协作缓存结合,提升用户获取文件的效率.以中继无人机的转弯角为基因完成轨迹规划,协作缓存以各个地面无线 mesh 路由所存储的文件块为基因优化缓存分布.仿真表明,可将用户的平均时延收敛在较低水平.

1 系统模型

1.1 系统整体架构

基础设施破坏严重的情况下,需要使用空中无线设备,即无人机携带通信设备.又因单个无人机能量与覆盖范围有限,故使用多个中继无人机共同组成联合网络,使得灾区通信受损严重的地方得以联系外界.本文采用簇状网络结构搭建应急通信网络,即

以一个无人机作为簇头,与地面无线 mesh 路由共同组成地面-空中无线 mesh 网络. 应急通信网络的整体组网^[5]如图 1 所示,整体由分布在受灾区域的 mesh 路由器、外界基站,起到中继作用的无人机组成. 图中灾区整体分为 2 个受灾区域,每个受灾区域按大小分配有一架中继无人机与 6 个无线 mesh 路由器,组成区域内的应急通信系统. 区域内无人机起到传输中继作用,向其余区域或外界请求文件块,实际上并不缓存. 地面无线 mesh 路由主要缓存文件块,协同为用户提供文件. 基站负责传输中继无人机请求的文件块. 每个区域的中继无人机连接外界基站时,使用一架中继无人机作为桥梁.

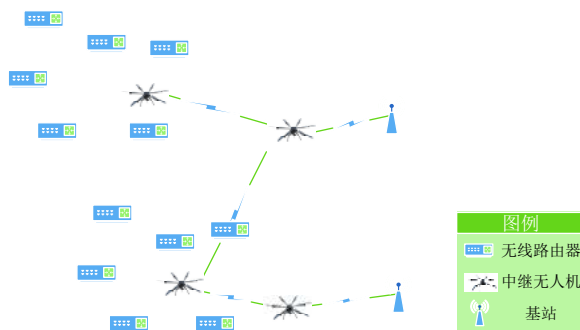


图 1 地面-空中无线 mesh 网络整体构架

本文仅考虑一处区域的地面-空中无线 mesh 网络的无线 mesh 路由缓存情况与中继无人机的飞行. 借助于中继无人机节点的可移动性, 仅需确保与部分地面无线 mesh 路由连接, 减少能量消耗以及路由开销.

1.2 系统流程

如图 2 所示, 每个区域的人员首先连接最近的 mesh 路由请求文件, 若该 mesh 路由一跳与两跳连接的 mesh 路由均未存储该文件, 则通过中继无人机传递请求, 向外界的基站或其余区域的 mesh 路由请求该文件块, 然后逐个传递回来. 以上过程作为中继无人机与无线 mesh 路由不改变下, 一个周期内用户请求文件的流程. 待下一个周期开始, 将上一个周期用户请求情况输入, 使用遗传算法计算得出最佳无人机位置与无线 mesh 缓存情况, 控制无人机飞到指定位置, 使用集中式缓存控制对无线 mesh 路由器直接进行缓存.

2 基于无人机中继的 mesh 路由缓存策略

2.1 基于遗传算法的中继无人机轨迹规划

无人机只负责作为传输中继, 不进行缓存. 初始条

件为中继无人机的初始位置和速度, 中继无人机每次飞行的角度小于无人机飞行的最大转弯角. 在约束条件下, 中继无人机飞行转弯角选择下一时刻最优结果. 即下一时刻区域范围内用户的平均时延最低. 然后根据航路——位置坐标公式^[14]更新中继无人机的位置和坐标, 接着重复以上步骤, 更新中继无人机的位置, 直到用户平均时延收敛.

$$x_E = x_A + v_p \cdot \Delta t \cdot \cos(\alpha + v_1) \quad (1)$$

$$y_E = y_A + v_p \cdot \Delta t \cdot \sin(\alpha + v_1) \quad (2)$$

$$v_2 = v_1 + \theta \quad (3)$$

其中, x_E 和 y_E 分别为目标节点 E 的横坐标和纵坐标; x_A 和 y_A 分别为无人机之前的起始点 A 的横坐标和纵坐标; v_p 为无人机的飞行速度; Δt 为固定的时间间隔; α 为目标节点 E 相对于起始点 A 的位置偏转角; v_2 为无人机在目标节点 E 处的速度角度; v_1 为无人机在之前起始点 A 处的速度角度; θ 为无人机由起始点 A 飞到目标节点 E 时速度变化的角度. 下一次飞行时, 将公式中的目标节点作为此次的起始点, 不断迭代飞行.

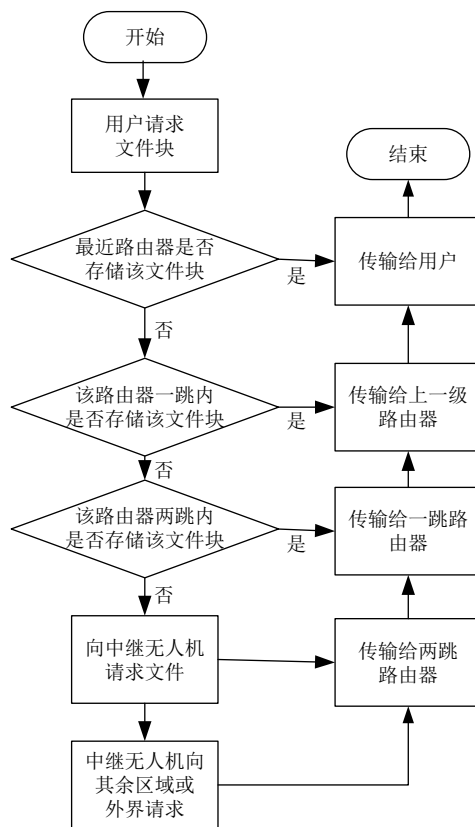


图 2 用户请求流程

将中继无人机的飞行角度作为基因. 中继无人机可以由转弯角与当前的位置速度得出一定时间后无人机的位置与速度, 故此处使用中继无人机的转弯角进行编码^[14]; 此种编码方式保证之后的选择交叉变异后, 得出的新生代种群个体依旧可实现中继无人机的飞行. 中继无人机约束条件是转弯角大小, 设定无人机飞行的转弯角不大于最大转弯角 θ_{\max} , 即转弯角 $\theta \in [-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$ ^[14].

2.2 基于遗传算法的无线 mesh 路由器协作缓存

地面无线 mesh 路由器主要负责缓存, 同时可以与两跳内的路由器或中继无人机传输文件. 路由器节点作为主要的缓存设备, 可配备较大的缓存空间. 系统采用集中式缓存控制, 根据之前周期区域内的所有用户的请求情况进行计算后统一缓存, 随着系统运行时间累积以及用户请求量的增加, 系统统计出的文件流行度分布将趋于用户整体请求分布. 另外, 采用遗传算法等启发式算法对于请求分布的约束不大, 故本文将文件块流行度设为经典的 Zipf 分布^[26-28]. 初始条件为 mesh 路由的存放位置, mesh 路由在用户曾经请求过的文件块集群中选择文件块缓存. 在约束条件下, 地面无线 mesh 路由筛选并缓存合适的文件块, 以使下一时刻区域范围内用户的平均时延最低. 通过不断迭代更新地面无线 mesh 路由的缓存分布, 直到用户平均时延收敛.

遗传算法中使用缓存的文件块编码作为缓存情况的基因, 将地面无线 mesh 路由所缓存的文件块作为编码. 地面无线 mesh 路由的约束条件设为同一个 mesh 路由的缓存空间内不能重复缓存同一个文件, 设备数为 N , 每个设备缓存 F 个文件, 缓存的文件块编码为1到 NF , 即每个设备的缓存情况为 $[nf_1 \quad nf_2 \quad \dots \quad nf_f]$, 令其缓存编码为 X .

2.3 代价函数及算法流程

根据编码方式初始化种群 G , 如式(4)所示, S 代表种群中的个体数. 每一行表示种群中个体的基因, 即一种地面无线 mesh 路由的协作缓存情况与中继无人机的飞行情况, 这代表二者协同考虑, 经过选择交叉变异的迭代后, 其中的个体越来越优秀, 适应值越来越高, 并在最后达到收敛.

$$G = \begin{bmatrix} X_1 & \theta_1 \\ X_2 & \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ X_S & \theta_S \end{bmatrix} \quad (4)$$

适应度函数设置. 地面无线 mesh 路由的协作缓存与中继无人机飞行情况协同考虑, 目标是降低用户的平均时延. 所以使用用户的平均时延作为适应度函数 FIX.

$$\begin{aligned} \text{FIX} &= \sum D/S_P \\ &= \left(\sum_{i=1}^{P_0} H_{C0} + \sum_{i=1}^{P_1} H_{C1} + \sum_{i=1}^{P_2} H_{C2} + \sum_{i=1}^{P_3} A_U \right) / S_P \\ &= \left(\sum_{i=1}^{P_0} (d_{AM}/100) + \sum_{i=1}^{P_1} (0.1+d_{AM}/100) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{P_2} (0.2+d_{AM}/100) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{P_3} (0.5+d_{AM}/100+d_{MU}/1000) \right) / S_P \\ & \quad (S_P = p_0 + p_1 + p_2 + p_3) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, D 表示每个用户的时延, S_P 表示用户总数; H_{C0} 表示用户在连接的 mesh 路由上直接取到文件; H_{C1} 表示用户在连接的 mesh 路由上经过一跳取到文件; H_{C2} 表示用户在连接的 mesh 路由上经过二跳取到文件; d_{AM} 表示用户取得文件经过的距离; d_{MU} 表示中继无人机传递给 mesh 路由的距离; A_U 表示用户在连接的 mesh 路由上取不到文件, 需要借助中继无人机取得文件. 式中 0.1 表示一跳需要经历的额外时延, 0.2 表示一跳需要经历的额外时延, 0.5 表示通过中继无人机获取文件需要的额外时延. 因灾区建筑遭到破坏, 无论救援还是临时居住地, 无线 mesh 路由间的障碍较多, 故设定每秒传输距离为 100 m, 因无线 mesh 路由与中继无人机间障碍较少, 故每秒传输距离为 1000 m.

在用户请求模型中, 用户的位置是均匀随机分布于区域内, 连接到距离最近的地面无线 mesh 路由, 用户请求的文件按照预设的 Zipf 分布随机生成.

遗传算法中, 计算个体适应值后, 直接把前 5% 的优秀个体作为子代一部分. 父代使用随机遍历抽样法, 抽取 152% 的父代个体, 经过交叉步骤, 得到 76% 的子代个体. 父代抽取 19% 的父代进行变异. 最终由选择交叉变异得到所有的子代个体. 交叉操作选择多点交叉, 即在个体编码串中选择部分基因段, 以间隔交换的方式交换基因. 本文设置 6 个地面无线 mesh 路由, 每个设备可存储 2 个文件块, 文件块编码为 1-20. 选择第 1、3、5 段基因进行交叉操作后结果如表 1 所示.

表1 多点交叉分析表

个体基因段	1	2	3	4	5	6	7
1	(1, 2)	(3, 4)	(11, 7)	(20, 5)	(10, 6)	(7, 8)	0.023
2	(2, 5)	(6, 8)	(18, 1)	(15, 2)	(10, 7)	(2, 15)	0.036
交换情况	交换	不变	交换	不变	交换	不变	不变
1	(2, 5)	(3, 4)	(18, 1)	(20, 5)	(10, 7)	(7, 8)	0.023
2	(1, 2)	(6, 8)	(11, 7)	(15, 2)	(10, 6)	(2, 15)	0.036

变异操作选择单段基因进行变异, 如染色体“(2, 5), (3, 4), (18, 1), (20, 5), (10, 7), 0.023”含义为编号为1的设备缓存文件块2和文件块5, 编号为2的设备缓存文件块3和文件块4, 以此类推; 中继无人机的转弯角为0.023 rad. 某一路由的缓存变异后将重新缓存不同的2个文件块. 对转弯角进行变异时, 转弯角取值范围为 $[-\theta_{max}, \theta_{max}]$, 并设无人机最大转弯角 θ_{max} 为 $\pi/4$.

3 仿真与分析

3.1 参数设置

如表2所示, 仿真区域范围设为280 m×280 m, 无人机一般飞行速度为13 m/s以内^[5], 速度过高会导致无人机难以飞行到起始点附近的位置, 故限定为3 m/s. 无人机高度均衡用户通信效果与建筑高度约束, 设为100 m, 约30层楼高. 本实验中6个地面 mesh 路由器的位置分别为(40.2, 74.8), (66.6, 225.9), (152.8, 227.8), (249.6, 213.8), (136.2, 78.1), (235.1, 70.3). 无线 mesh 路由器的位置均衡通信覆盖范围最大^[14]与路由器两跳范围内有尽可能多的路由器. 文件块数量设为20, 其流行度设为Zipf分布, 其中参数 α 取0.7. 设定使用48顶应急救援帐篷并均匀分布于该区域, 每项帐篷设5人, 故用户数为240人.

表2 遗传算法仿真参数表

参数	值
任务区域	280 m×280 m
无人机架数	6
无线mesh路由器通信半径	100 m
无人机速度	3 m/s
每个无人机飞行时间	1 s
无人机飞行高度	100 m
最大转弯角	$\pi/4$
文件块数目	20
范围内申请文件人数	240
交叉概率	0.76
变异概率	0.19

3.2 仿真实验

仿真实验中场景示意图, 正方形代表受灾区域, 圆

心代表无线 mesh 路由器的坐标, 圆代表无线 mesh 路由器的通信范围. 图中圆心附近的数字代表该无线路由器所缓存的文件块编号, 如(1, 2)表示该路由器缓存文件块1与文件块2. 无人机始终从坐标(150, 150)出发, 飞行轨迹以星号表示, 轨迹收敛位置为(150, 150)小圆圈所在坐标.

3.2.1 中继无人机悬停场景下用户平均时延

单独考虑缓存情况, 中继无人机位置在(150, 150)处, 保持原地飞行时, 仅地面无线 mesh 路由进行协作缓存, 由图3可知, 当迭代至第20代时, 种群中出现了更加优秀的个体, 曲线产生跳变, 此后用户的平均时延就已经基本位于0.726 s附近, 随后在第50代与第70代分别微小跳变, 直到结束. 当用户平均时延相等的最优缓存结果可能不同, 由图4可知协作缓存结果.

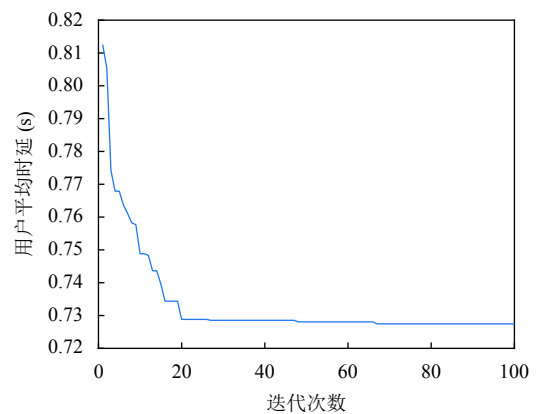


图3 中继无人机悬停场景下用户平均时延

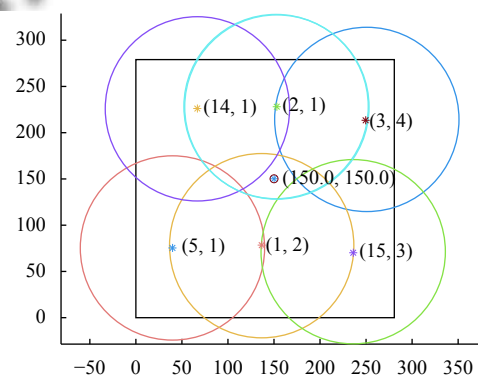


图4 中继无人机悬停场景下协作缓存示意图

3.2.2 地面 mesh 路由缓存不变场景下用户平均时延

单独考虑中继无人机飞行情况, 地面无线 mesh 路由的缓存情况为(1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8), (9, 10), (11,

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.

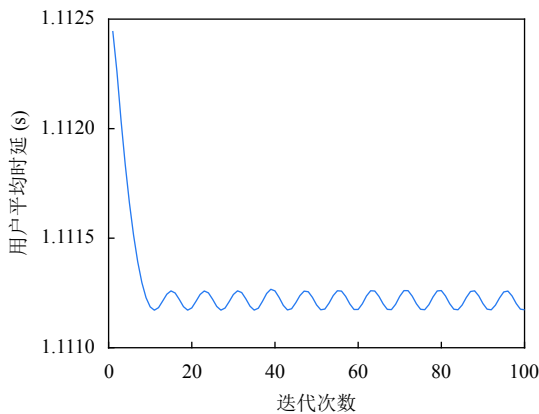


图 5 地面 mesh 路由缓存不变场景下用户平均时延

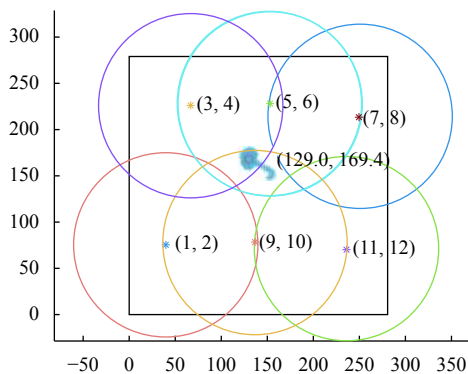


图 6 地面 mesh 路由缓存不变场景下结果示意图

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.

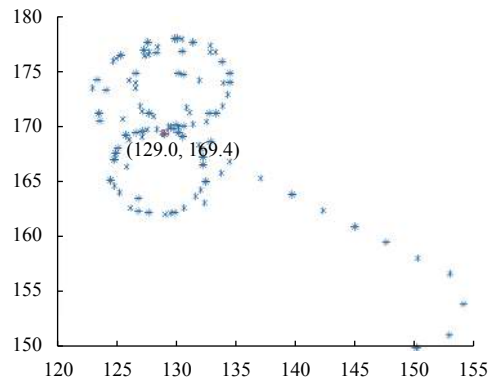


图 7 中继无人机飞行轨迹图

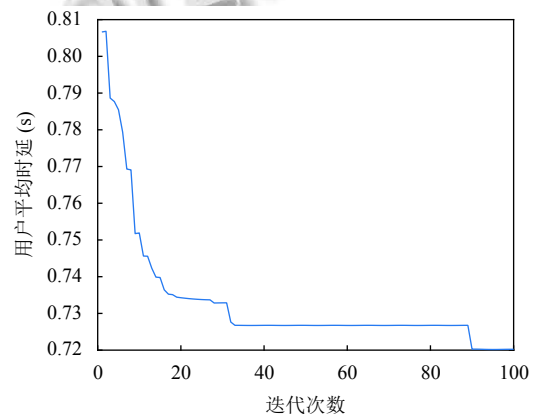


图 8 中继无人机保持飞行且地面 mesh 路由协作缓存场景下用户平均时延

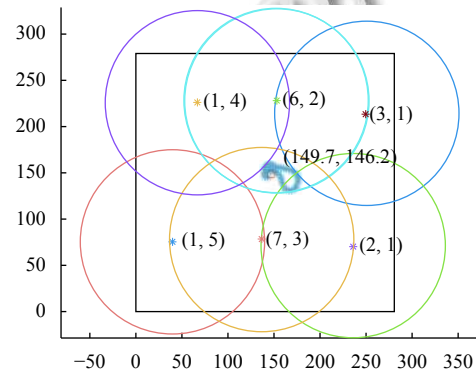


图 9 中继无人机飞行且地面 mesh 路由协作缓存场景下示意图

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.

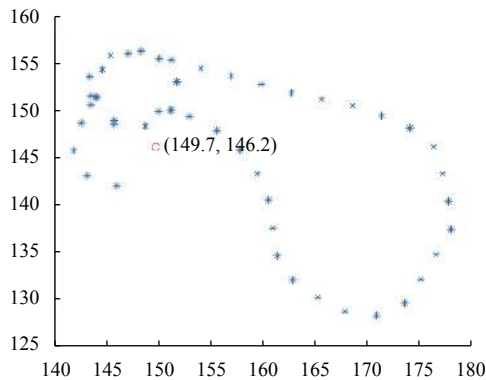


图10 中继无人机飞行轨迹图

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.

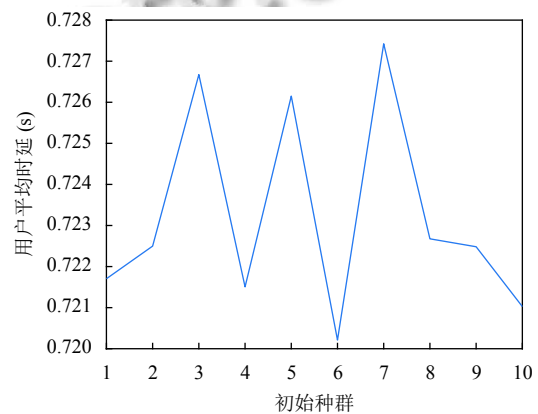


图11 不同种群收敛的平均用户时延

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)]