高技术通讯 2024 年 第 34 卷 第 11 期:1164-1177

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.11.004

无人机自组织网络移动性管理仿真与性能评估①

孙 傲②* 杨 枫③* 吴文君* 孙 腾**

(*北京工业大学信息学部 北京 100124)

(**中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘 要 无人机(UAV)网络能够以较低的成本进行动态部署并根据需求提供灵活的覆盖,可以作为地面网络的补充和扩展,提升网络服务性能。然而,无人机的高移动性为网络优化和移动性管理带来了挑战。利用自组织网络(SON)技术,可以满足高动态 UAV 网络中移动性管理的需要。本文参考 3GPP 标准和技术规范,构建从自组织网络建立到用户接入、切换全过程的 UAV 自组织网络仿真平台,并对 UAV 自组织网络进行移动性管理仿真与性能评估。仿真结果表明,本文所构建的仿真平台能够实现网络的自配置功能,且能够在参数不合理时进行自优化,实现较传统方法更优的网络服务性能。

关键词 无人机(UAV);自组织网络(SON);移动性管理

随着 5G 网络广泛商用,具有高速率、低时延、高移动性通信需求的各类新兴业务不断涌现,人们的生活变得更加丰富和便捷。然而,由于传统蜂窝网络基站的固定部署,其覆盖仍然一定程度上受限,在偏远地区、抢险救灾等特定场景下,难以满足用户多样化的业务需求。无人机(unmanned aerial vehicles,UAV)具有灵活机动部署的特性,在军事、遥感、抢险救灾等领域得到了广泛的应用验证[1]。在通信领域,无人机搭载的基站(base station,BS)能够以较高的概率与地面设备进行视距(line of sight,LOS)链路连接,达到较好的通信性能[2]。因此,UAV-BS 能够有效弥补地面网络的不足,提供按需灵活的覆盖。

尽管 UAV-BS 能够实现更高速率、更大容量、更广覆盖的通信,但是其机动性也给移动通信系统带来了新的挑战。当 UAV-BS 为地面用户提供服务时,可能处于高速移动状态。用户将面临更加频繁的切换,切换异常可能随之增加,造成服务质量的下降和网络资源的浪费[3]。此外,不同的 UAV-BS 可以沿不同轨迹运动,且由于续航能力限制,网络中的 UAV-BS 数量可能发生改变,因而 UAV 网络拓扑结构动态会变化[4],进一步增加了移动性管理的难度。因此,3GPP(3rd Generation Partnership Project)在长期演进(long term evolution,LTE)标准中引入了自组织网络(self-organizing network, SON)技术[5],使网络具备自优化、自配置、自愈合的功能。将这一技术应用到 UAV 通信网络中,能够实现网络在变化环境中的自动调整,促进 UAV 组网通信的实现、提升网络服务性能。

当前,LTE 系统中自组织网络技术的研究主要关注了自组织网络的物理小区标识(physical cell identifier,PCI)分配及自动邻区(automatic neighbor relation,ANR)优化方案[6-9]、网络的负载均衡问题[10-13]以及自组织网络功能之间的冲突协调问题[11,14-15]等。在移动性管理方面,文献[16]提出了一种在 LTE 网络中基于信道质量指示(channel quality indicator,CQI)的切换参数优化算法和基于覆盖类型的负载均衡优化算法,研究了两者协调的

① 北京市自然科学基金(L212003)资助项目。

② 男,2000 年生,硕士生;研究方向:无人机组网;E-mail:sunao2018@emails.bjut.edu.cn。

③ 通信作者,E-mail:yangfeng@emails.bjut.edu.cn。

(收稿日期:2023-09-15)

网络自优化方法。文献[17]对 LTE 切换过程进行了建模,提出了一种对触发时间(time-to-trigger,TTT)和迟滞(hysteresis,Hys)2 个切换参数进行自配置的优化算法。随着人工智能技术在移动通信领域的应用,文献[18]提出了一种基于支持向量机的异常切换检测方法和一种基于增强 Q 学习的切换参数自优化方法,有效提高了网络性能。

在 UAV 组网通信场景中,研究的热点包括 UAV 部署[19-21]、UAV 网络资源分配[22-23]、无人机网络的轨迹优化及接入控制联合优化[24]等问题。在 UAV 网络的移动性管理方面,文献[25]结合 K-均值聚类和卷积神经网络估计链路质量,提出了一种 UAV-BS 的用户选择算法,优先为服务质量较高的用户服务以改善网络的服务效率。以基于深度学习预测用户移动轨迹为基础,文献[26]关注了 UAV-BS 位置部署问题,并提出了一种智能移动切换决策算法,提高了用户的切换成功率。在关注 UAV-BS 的位置优化问题基础上,文献[23]进一步考虑了用户公平性和前传回传的资源分配,提出了负载均衡的用户分配方法和 UAV-BS 位置优化算法,改善用户速率和公平性。在 UAV 网络性能仿真平台工作中,文献[27]建立了 TD(time division)-LTE UAV-BS 的仿真平台,对野外和地震救援场景下进行了覆盖和容量分析。针对基于 5G 网络的 UAV 系统,文献[28]搭建了系统级仿真平台,研究了基于功率控制和协作多点传输的干扰抑制问题。

根据上述调研,现有 UAV 网络的研究主要聚焦于网络部署、用户关联以及轨迹优化等问题,实现网络服务质量的改善;现有仿真工作也更侧重干扰、容量方面的性能评估。从 UAV 网络移动性管理的角度来看,研究人员侧重开展了相关算法研究,还没有从自组织网络建立到用户接入、切换全过程的仿真平台实现工作。

本文考虑到实现自组织网络建立到用户接入切换全过程、实现用户移动性管理基本功能是后续开展 UAV 网络资源优化管理研究的重要前提,本文以 UAV 自组织网络移动性管理仿真平台的搭建为切入点开展工作。首先,确定了仿真平台的信道模型、UAV 与用户移动模型、UAV 频率分配方案等系统基本配置。然后,根据自组织功能和移动性管理功能实现的基本过程进行仿真平台总体设计。在此基础上,参考相关标准及研究详细实现了物理层小区标识动态配置功能、自动邻区关系更新功能、移动鲁棒性优化(mobility robustness optimization,MRO)功能和最小化路测(minimization of drive tests,MDT)功能。最后,论文通过设置不同的网络配置参数进行仿真实验,对网络的基本功能和服务性能进行了验证评估。

本文第 1 节介绍了 UAV 自组织网络的系统模型;第 2 节结合 UAV 自组织网络特点和移动性管理功能实现的需要,对仿真平台的需求进行了分析,进行了仿真平台的总体设计;第 3 节详细介绍了 UAV 自组织网络各个功能模块的作用及设计方案;第 4 节设置不同的网络配置参数进行仿真实验,并根据仿真结果进行对比分析;第 5 节对全文进行总结。

1　系统模型

本文以 UAV 自组织网络下行传输为研究对象。系统仿真区域为边长为 L 的正方形,其中包含了 U 个用户和 V 个 UAV-BS。用户集合和 UAV-BS 集合分别为 $\boldsymbol{U}=\{u_i\}_{i=1,\cdots,U}$ 和 $\boldsymbol{V}=\{v_j\}_{j=1,\cdots,V}$。

1.1　节点部署与移动模型

所有用户初始位置随机分布在仿真区域内,并以固定的速度 η_u 沿随机方向移动。每隔 t_T 时间,用户移动方向随机改变一次。一旦检测到用户沿当前方向移动将离开仿真区域时,将触发用户随机改变移动方向,使其始终保持在仿真区域内。

仿真区域内所有 UAV-BS 在相同的高度上沿半径为的圆形轨道以相同的速度运动。假设 UAV-BS 的轨道中心随机分布于仿真区域内,为避免 UAV-BS 之间发生碰撞,令与之间的距离 $d_{jk}>2R(j、k=1,2,\cdots,V)$ 且 $j\neq k$。

1.2　频率划分方案

本文考虑了 2 种基础的 UAV-BS 间频率划分方案:完全复用和部分复用。

完全复用和部分复用的频率划分中的所有 UAV-BS 被分为 4 组,同组 UAV-BS 之间选择不同的

频率资源,不同组的 UAV-BS 之间复用频率资源。

1.3 信道模型

本文采用 LOS 信道模型建模用户与 UAV-BS 之间无线通信信道,同时考虑路径损耗和阴影衰落影响[1]。在时间步 t,用户 u_i 和 UAV-BS v_j 之间的信道增益 $G_{ij}(t)$ 表示为

$$G_{ij}(t) = G_{\mathrm{L},ij}(t) + G_{\mathrm{SF},i}(t) \tag{1}$$

其中,$G_{\mathrm{SF},i}(t)$ 为用户 u_i 在时间步 t 的阴影衰落,单位为 dB,且 $G_{\mathrm{SF},i}(t) \sim N(0,4)$。当用户改变移动方向时,阴影衰落将重新随机生成。$G_{\mathrm{L},ij}(t)$ 为时间步 t 时用户 u_i 和 UAV-BS v_j 之间的自由空间路径损耗,单位为 dB,表示为

$$G_{\mathrm{L},ij}(t) = 32.45 + 20\log_{10}(f_c) + 20\log_{10}(d_{ij}(t)) \tag{2}$$

其中,f_c 表示 UAV-BS 的载波频率,单位为 GHz;$d_{ij}(t)$ 表示时间步 t 时用户 u_i 和 UAV-BS v_j 之间的距离,单位为 m[29]。

1.4 服务模型

本文采用基本的服务方案,即一个用户在某一时刻仅连接到一个 UAV-BS,获得一定的传输速率。在时间步 t,如果用户 u_i 连接到 UAV-BS v_j,则 u_i 和 v_j 之间的信噪比(signal-to-interference noise ratio, SINR)$\gamma_{ij}(t)$ 为

$$\gamma_{ij}(t) = \frac{PG_{ij}(t)}{\sum_{k=1,k\neq j}^{V} PG_{ik}(t) + \sigma^2} \tag{3}$$

其中,P 是 UAV-BS 的发射功率,σ^2 是噪声功率。在本文的仿真平台中,采用香农信道容量估算用户 u_i 接入 UAV-BS v_j 可以获得的传输速率 $r_{ij}(t)$,即

$$r_{ij}(t) = \frac{B}{N_j(t)}\log_2(1+\gamma_{ij}(t)) \tag{4}$$

其中,$N_j(t)$ 是 t 时刻连接到 UAV-BS v_j 的用户数,B 为 UAV-BS 的总带宽。

2 仿真平台总体设计

本节根据 UAV 自组织网络特点和移动性管理性能仿真评估需要,对仿真平台进行需求分析,并在此基础上对仿真平台功能进行总体设计。

2.1 仿真平台功能需求分析

与位置固定不变的地面 BS 不同,UAV-BS 具有很强的移动性,其移动方向和相对位置关系可能会持续变化。由此导致的网络拓扑频繁变化也使得 UAV-BS 之间的邻区关系不断改变。因而,仿真平台在拓扑动态变化模拟、网络状态动态测量与更新等方面的功能需要满足 UAV 自组织网络仿真需要。主要功能包括以下几部分。

(1) UAV-BS 和地面用户部署与移动功能。UAV-BS 和地面用户是网络中的基本节点,移动性是其基本特征。模拟节点的移动性是开展移动性管理相关仿真评估的必要前提。因此,仿真平台需要具备根据移动模型模拟节点移动的功能,并具备根据设定的仿真时间步间隔实时获取用户位置的功能。

(2)信道质量动态测量功能。由于节点位置变化,节点间的相对距离、无线传输环境都将发生变化。从移动性管理性能评估的角度出发,应当重点关注一小段时间内的平均信道质量。因此,仿真平台应当能够根据路径损耗和阴影衰落模型模拟计算节点间无线信道实时质量,通过读取信道质量实时数据实现实际中的信道质量动态测量功能。

(3)PCI 初始化配置与动态更新功能。为 UAV-BS 合理分配 PCI 是用户能够正确识别和区分网络中的各个 BS、进行正常通信的基本前提。在仿真平台中,一方面需要具备 PCI 初始化分配的功能,以保证仿真流程的正常启动;另一方面,当 UAV-BS 发生相对位置关系变化时,还需要能够根据一定的准则动态更新 PCI,确保不出现 PCI 冲突和混淆,保证用户对 UAV-BS 的正确识别。

(4)ANR 动态更新功能。节点位置的实时变化使得 UAV-BS 之间的邻区关系也不断发生改变。而 UAV-BS 之间的邻区关系表界定了用户测量网络状态的范围、限定了用户切换的候选 BS,因此,仿真平台需要具备根据节点实时位置和实时信道状态数据动态更新邻区关系的功能,以确保移动性管理性能仿真的正确实现。

(5)MRO 功能。移动性管理性能评价是仿真平台的主要目标,因此,在 UAV-BS 和地面用户同时发

生移动的情况下,实现用户的合理接入和切换是仿真平台的核心功能。基本地,仿真平台应当具备实现事件触发的切换全流程功能,并具备统计用户切换情况、调整切换参数、改善用户切换成功率的功能。

(6)数据记录、统计、展示功能。为了便于仿真性能分析,仿真平台还需要具备记录仿真数据、统计仿真结果、图形化展示关键仿真环节等辅助功能。

2.2　仿真平台总体设计

根据仿真平台功能分析,仿真平台总体功能结构如图 1 所示。

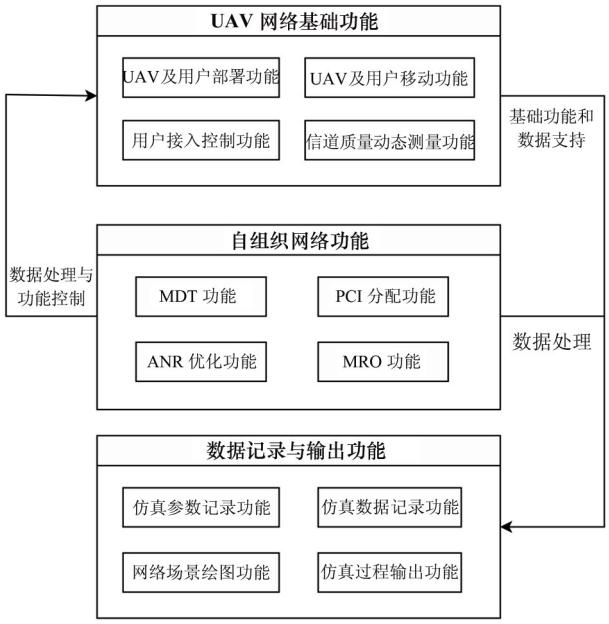

图 1　仿真平台功能总览图

根据仿真实现的总体过程和各功能模块之间的关联关系,仿真平台分为 3 个运行阶段:(1)仿真场景初始化阶段;(2)UAV 自组织网络核心功能运行阶段;(3)数据存储、统计、展示阶段。仿真平台的主流程如图 2 所示。

3　UAV 自组织网络功能模块设计与实现

在仿真平台功能分析和总体设计的基础上,本节将详细介绍 UAV-BS 和地面用户部署与移动功能、信道质量动态测量功能、PCI 初始化配置与动态更新功能、ANR 动态更新功能、MRO 功能 5 个核心功能模块的实现方案与流程。

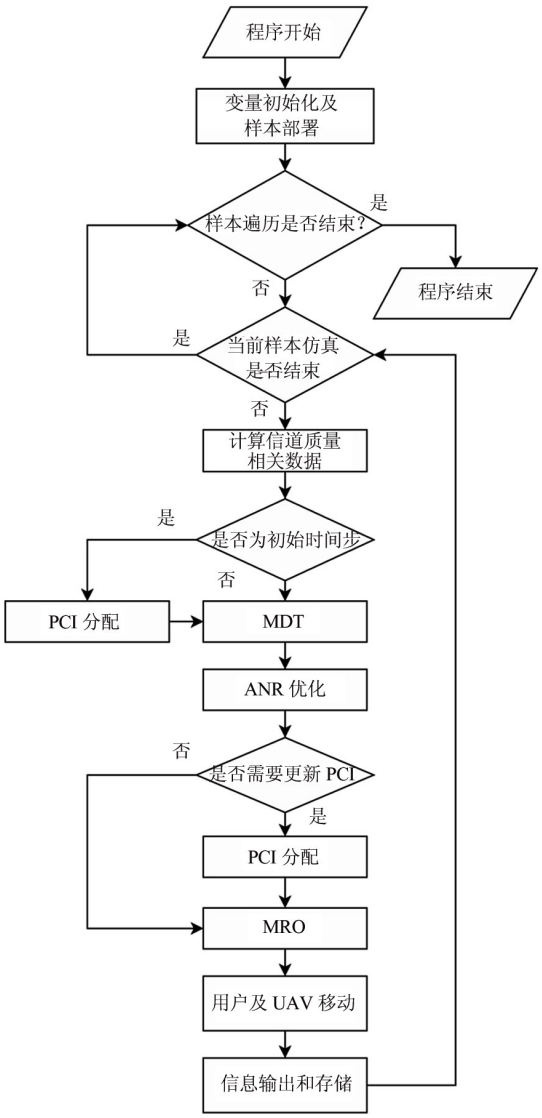

图 2　仿真平台主流程图

3.1　UAV-BS 和地面用户部署与移动模块

根据节点部署与移动模型,本模块需要实现用户初始位置的随机生成、用户逐时隙位置更新、UAV-BS 轨迹圆心的随机生成、UAV-BS 初始位置的随机生成、UAV-BS 逐时隙位置更新功能,并满足模型设定的限制条件。仿真中实现用户与 UAV-BS 节点部署、移动的主要流程如算法 1、2 所示。

算法 1　节点部署流程

输入:初始时间步,用户数量 U, UAV-BS 数量 V, UAV-BS 高度 h, UAV-BS 轨道半径 R, 阴影衰落方差 σ_{SF}^2, 噪声功率 σ^2。

1:**for** $j = 1,2,\cdots,V$

2： 为 UAV v_j 随机移动轨迹中心位置
3： 为 v_j 在移动轨迹上随机初始位置 $p_{V,j}(t_0)$
4： 为 v_j 在随机初始移动方向 $\delta_{v,j}(t_0)$。当 v_j 顺时针移动时 $\delta_{v,j}(t_0)=1$，逆时针移动时 $\delta_{v,j}(t_0)=0$。
5：**end for**
6：
7：**for** $j=1,2,\cdots,V$
8： **for** $k=1,2,\cdots,j-1$
9： 随机生成 v_j 与 v_k 之间的阴影衰落 $G_{\mathrm{SF},jk}(t_0)$
10： **end for**
11：**end for**
12：
13：**for** $i=1,2,\cdots,U$
14： 为用户 u_i 随机生成初始位置 $p_{u,i}(t_0)$
15： 为 u_i 随机生成初始移动方向 $\delta_{u,i}(t_0)\in[0,2\pi]$
16： 为 u_i 随机生成阴影衰落 $G_{\mathrm{SF},i}(t_0)$
17：**end for**
18：根据伪代码 3 的流程为所有 UAV 分配频率
19：根据式(1)、(3)、(4)计算初始信道增益，SINR 及用户传输速率
20：**for** $i=1,2,\cdots,U$
21： 确定初始连接，使 u_i 连接到 SINR 最大的 UAV
22：**end for**

算法 2 用户及 UAV 移动流程

输入：当前时间步 t，每时间步的实际时长 τ，UAV-BS 轨道半径 R，用户移动速度 η_u，UAV-BS 移动速度 η_v，UAV 移动方向 $\delta_{v,j}(t)$，用户移动方向 $\delta_{u,i}(t)$，UAV 位置 $p_{v,j}(t)$，用户位置 $p_{u,i}(t)$，用户转向时间间隔 t_T。

1：**for** $j=1,2,\cdots,V$
2： 根据 $\tau,\eta_v,p_{v,j}(t)$ 和 $\delta_{v,j}(t)$ 计算新的位置 $p_{v,j}(t+1)$
3：**end for**
4：**for** $i=1,2,\cdots,U$
5： **if** t 是用户转向的时间步
6： 为 u_i 随机新的移动方向 $\delta_{u,i}(t)\in[0,2\pi]$
7： **end if**
8： 根据 $\tau,\eta_u,p_{u,i}(t)$ 和 $\delta_{u,i}(t)$ 计算新的位置 $p_{u,i}(t+1)$
9： **while** 新位置超出仿真区域
10： 为 u_i 重新随机生成新的移动方向 $\delta_{u,i}(t)\in[0,2\pi]$
11： 根据 $\tau,\eta_u,p_{u,i}(t)$ 和 $\delta_{u,i}(t)$ 重新计算新的位置 $p_{u,i}(t+1)$
12： **end while**
13：**end for**

此外，UAV-BSs 的频率资源分配也需要在仿真场景的样本初始化时完成，以便后续仿真计算。按照系统模型中给定的频率划分方案，设仿真区域左下角为坐标原点，网络中总共部署的 UAV 数量 $V=24$，将网络中的 UAV 分为 4 组，同组的 6 个 UAV 使用不同的频率。设置 4 个观测点 $p_1(L/4,L/4)$，$p_2(L/4,3L/4)$，$p_3(3L/4,L/4)$，$p_4(3L/4,3L/4)$ 和一个频率编号矩阵 $\boldsymbol{F}$。

$$\boldsymbol{F}=[f_{m,n}]_{4\times(V/4)}=\begin{bmatrix}1&2&3&4&5&6\\6&5&4&3&2&1\\2&1&6&5&4&3\\5&3&2&1&6&4\end{bmatrix} \tag{5}$$

仿真模块具体实现频率资源分配的流程如算法 3所示。

算法 3 部分复用的频率资源分配流程

输入：观测点 p_m，$m=1,2,3,4$，待分配无人机集合 $\boldsymbol{V}'=\{v_j\}_{j=1,\cdots,V}$，频率编号矩阵 $\boldsymbol{F}=[f_{mn}]_{4\times(V/4)}$

1：**for** $n=1,2,\cdots,(V/4)$
2： **for** $m=1,2,3,4$
3： 对于当前观测点 p_m，从 $\boldsymbol{V}'$中选择一个距离自己最近的 UAV v_{mn}
4： 从 $\boldsymbol{F}$ 中为 v_{mn} 分配一个频率编号 f_{mn}
5： 将 v_{mn} 移出集合 $\boldsymbol{V}'$
6： **end for**
7：**end for**

3.2 信道质量动态测量模块

信道质量动态测量模块的主要功能为：根据节点实时位置，根据信道模型模拟计算节点间无线信道损耗，进一步计算得到用户与 UAV-BS 之间的参考信号接收功率(reference signal receiving power，RSRP)，存储实时的 RSRP 数值以供后续流程使用。

用户 u_i 与 UAV-BS v_j 之间的 RSRP 为

$$P_{R,ij}=P_{S,ij}-10\log_{10}(12\times N) \tag{6}$$

其中 $P_{S,ij}=PG_{ij}(t)$，P 为 UAV-BS 的总发射功率，N 为 UAV-BS 的 RB 数。

在初始时间步，需要模拟计算用户与所有 UAV-BS 之间的 RSRP；在其他时间步，仅需要模拟计算用户与当前连接的 UAV-BS 和当前连接的 UAV-BS 的邻区的 RSRP。此外，当 ANR 以 RSRP 作

为判断准则且到达 ANR 优化的时间步,也需要模拟计算用户与所有 UAV-BS 之间的 RSRP,以供 ANR 优化功能使用。仿真中实现 RSRP 模拟计算的程序流程如算法 4 所示。

算法 4　信道质量动态测量模拟流程

输入:用户数量 U, UAV-BS 数量 V, 当前时间步 t, 用户集合 $\boldsymbol{U}$,UAV 集合 $\boldsymbol{V}$,UAV-BS 的 RB 数 N, 时间步 t 时用户 u_i 和 UAV-BSv_j 之间的距离 $d_{ij}(t)$, 信道增益 $G_{ij}(t)$, UAV 发射功率 P。

1: **if** 当前时间步 t 是初始时间步或 ANR 优化以 RSRP 作为判断准则且到达 ANR 优化的时间步
2:　**for** $u_i \in \boldsymbol{U}$
3:　　根据式(1)、(2)、(6)计算用户 u_i 与所有 UAV-BS $v_j \in v$ 之间的 RSRP
4:　**end for**
5:**else**
6:　**for** $u_i \in \boldsymbol{U}$
7:　　根据式(1)、(2)、(6)计算用户 u_i 与当前连接的 UAV-BS v_{ij} 及其邻区之间的 RSRP
8:　**end for**
9:**end if**

3.3　PCI 初始化配置与动态更新模块

PCI 初始化配置与动态更新模块需要具备存储记录 PCI 与 UAV-BS 之间对应关系的功能,还需要实现具体可行的 PCI 分配算法,确保不出现 PCI 冲突和混淆,保证用户对 UAV-BS 的正确识别。

避免 PCI 冲突需要保证任何具有邻区关系的 2 个小区之间不能使用相同的 PCI,否则将导致用户设备无法区分来自当前小区和相邻小区的信号,使用户设备连接失败。避免 PCI 混淆是指一个小区的所有邻区不能使用相同的 PCI,否则将导致用户设备无法正确获取邻区信息,造成用户设备切换失败[30]。

仿真实验时,本模块需要在仿真初始化时就能实现 UAV-BS 的 PCI 初始化功能。由于 UAV-BS 的高速移动,网络的邻区关系相对地面网络将发生更快速的变化。因此,当邻区关系发生变化,特别是邻区中加入新的小区时,本模块需要具备 PCI 冲突和 PCI 混淆检测的功能。同时,本模块还需要启动 PCI 分配算法,实现邻区关系变化后重新为 UAV-BS 分配 PCI 的功能。

根据上述功能需要,PCI 初始化配置与动态更新模块主要分为 3 个步骤实现:邻区关系初始化、基于 Floyd 算法的邻区距离计算、PCI 分配及 PCI 追加。以下对各个步骤的实现进行详细说明。

(1)邻区关系初始化

在仿真初始阶段,缺乏关于邻区关系、用户通信质量等的历史信息,因此,仿真平台中选择 UAV-BSs 之间的 RSRP 为标准来划分初始邻区关系。具体而言,UAV-BSs v_j 与 v_k 之间的 RSRP 为

$$P_{R,jk} = P_{S,jk} - 10\log_{10}(12 \times N) \tag{7}$$

其中 $P_{S,jk} = PG_{jk}(t)$ 为 UAVv_j 与 v_k 之间的有用信号功率。将计算出的 RSRP 数据与初始邻区判断阈值 P_N 进行比较,判断 UAV-BS 之间的邻区关系,判别结果存储于邻接矩阵 $\boldsymbol{E} = [e_{jk}]_{(V\times V)}$ 中,其中,当 v_j 与 v_k 之间具有邻区关系 $e_{jk} = 1$, 否则 $e_{jk} = 0$。

(2)Floyd 算法计算分配次序

Floyd 算法是图论中求取最短路径的一种算法。将整个邻接矩阵 $\boldsymbol{E} = [e_{jk}]_{(V\times V)}$ 视为一个无向赋权图,具有邻区关系的 2 个 UAV 之间权重设置为 1,不具有邻区关系的 UAV 之间权重为无穷大。将这个赋权图作为 Floyd 算法函数的输入,可以得到任意 2 个 UAV v_j 到 v_k 的最短路径长度 q_{jk}。根据 q_{jk} 计算 v_j 到其他 UAV 的总路径长度 $q_j = \sum_{k=1}^{V} q_{jk}$ 并从小到大排序,作为 PCI 分配的优先顺序。

(3)PCI 分配算法分配 PCI

按照上一步中求得的优先次序,使用 PCI 分配算法依次为每一个 UAV-BS 分配 PCI。设网络中所有可用的 PCI 集合为 $\boldsymbol{\Omega} = \{1,2,\cdots,2^{\omega}\}$, PCI 分配的程序流程如算法 5 所示[31]。

算法 5　PCI 分配流程

输入: 网络中所有 PCI 的集合 Ω, PCI 复用跳数 $Q = 7$, 路径长度 $q_{j,k}$, UAVv_k 使用的 PCI$N_{P,k}$, $k = 1,2,\cdots,V$。

1:**while** 开始分配或分配失败
2:　**for** $j = 1,2,\cdots,V$
3:　　**if** $j = 1$
4:　　$P_Q, P_1, P_2, P_3, P_4 = \varnothing$
5:　　**else**

6: 根据 $q_{j,k}$ 和 $N_{P,k}$ 生成集合 $P_{j,Q}$，
$P_1 = \cup_{q=1}^{Q-1} P_{j,q}$，$P_2 = \cup_{q=Q+1}^{q\max} P_{j,q}$，
$P_3 = \cup_{q=1}^{Q} P_{j,q}$ 和 $P_4 = \cup_{q=1}^{2} P_{j,q}$
7: **end if**
8: **if** $P_{j,Q} \backslash P_1 \neq \varnothing$
9: 从 $P_{j,Q} \backslash P_1$ 中为 v_j 随机选择 PCI
10: **else if** $P_2 \backslash P_3 \neq \varnothing$
11: 从 $P_2 \backslash P_3$ 中为 v_j 随机选择 PCI
12: **else if** 存在未使用的 PCI
13: 随机分配给 v_j 一个未使用的 PCI
14: **else if** $\Omega \backslash P_4 \neq \varnothing$
15: 从集合 $\Omega \backslash P_4$ 中为 v_j 随机选择 PCI
16: **else**
17: $\omega = \omega + 1$
18: 更新可用 PCI 集合 $\Omega = \{1,2,\cdots,2^{\omega}\}$
19: 为 v_j 分配 PCI 失败
20: **break**
21: **end if**
22: **end while**

其中，$P_{j,q}$ 表示距离 v_j 的路径长度为 q 的 UAV 所使用的 PCI 集合。如果为 v_j 分配 PCI 失败，则进行一次 PCI 追加，增加网络中的 PCI 总数，然后重新尝试分配，直至所有 UAV 都能够分配成功，完成 PCI 分配。

3.4 ANR 动态更新模块

ANR 动态更新模块需要能够动态更新网络中 UAV-BS 之间的邻区关系，实现完整的邻区调整方案，为用户提供准确的网络状态测量范围，为网络移动性管理功能提供保障。

完成邻区关系初始化及 PCI 分配后，本模块需要从邻区及 PCI 信息中提取出对各个 UAV-BS 进行邻区优化时所需的数据。此外，通过对比服务小区与邻小区的信道质量，可以初步判断邻区关系是否存在漏配或冗余。因此本模块还需要在仿真过程中对用户的网络状态测量信息进行统计。该信息能够反映用户到 2 个不同 UAV 之间信道质量关系，可作为邻区调整的判断依据之一。本模块还需要具备完整的邻区添加和邻区删除方案，实现邻区关系的动态更新，保持邻区关系的准确性。

根据上述功能分析，本文的 ANR 动态更新模块主要具备以下 4 项功能：(1)生成邻小区关系表(neighbor cell relation table，NCRT)；(2)信道质量优势检测；(3)邻区删除；(4)邻区添加。以下对个步骤的实现进行详细说明。

(1)生成邻小区关系表

在完成邻区关系初始化及 PCI 分配后，仅完成了邻区信息的汇总。还需要从所有信息中提取出所需的信息，分别放入每个 UAV-BS 的 NCRT 中。对于一个 UAV-BS v_j 的 NCRT $\boldsymbol{E}_j = [e_{\mathrm{N},jn}, e_{\mathrm{P},jn}, e_{\mathrm{T},jn}]_{(N_{nj}\times 3)}$，其中 N_{nj} 表示 v_j 的邻区数量。NCRT 中记录了其所有邻小区的编号 $e_{\mathrm{N},jn}$、PCI $e_{\mathrm{P},jn}$ 和生存时间(time to live，TTL) $e_{\mathrm{T},jn}$。

(2)信道质量优势检测

通过在每个时间步分析和统计用户测量的 SINR 信息，得到信道质量优势情况，记录在信道质量优势次数矩阵 $\boldsymbol{S} = [s_{jk}]_{(V\times V)}$ 中。设用户 u_i 所连接的 UAV-BS 为 v_j，网络中的另一 UAV-BS 为 v_k。其中 $i = 1,2,\cdots,U$；$j、k = 1,2,\cdots,V$；$j \neq k$，则信道质量优势的定义为：当满足 $\gamma_{ik} > \gamma_{ij}$，则认为 v_k 相较于 v_j 具有信道质量优势，信道质量优势次数矩阵相应位置 $s_{jk} = s_{jk} + 1$，遍历所有用户，完成信道质量优势检测。该数据将作为邻区删除及邻区添加过程的判断依据之一，影响网络中的邻区关系。

(3)邻区删除

邻区删除功能可根据步骤(1)、(2)中记录的信息及已知的 SINR 信息判断网络中的任一 UAV-BS 是否存在冗余邻区，并根据需要进行删除。对当前 UAV v_j 进行邻区删除时，需确定邻区冗余的检测范围。待检测的 UAV 为 v_j 的邻区 UAV 集合 $\boldsymbol{N}_j = \{v_n\}, v_n \in \boldsymbol{V}$。需要检测的用户集合为 UAV v_j 所服务的用户 $\boldsymbol{L}_j = \{u_l\}$，$u_l \in \boldsymbol{U}$。邻区删除流程如算法 6所示[6]。

算法 6 邻区删除流程

输入：当前 UAV v_j，待检测的 UAV 集合 $\boldsymbol{N}_j = \{v_n\}$，待检测的用户集合 $\boldsymbol{L}_j = \{u_l\}$，NCRT E_j，邻接矩阵 $\boldsymbol{E} = [e_{jk}]_{(V\times V)}$，信道质量优势次数矩阵 $\boldsymbol{S} = [s_{jk}]_{V\times V}$，用户与当前 UAV 的 SINR γ_{lj}，用户与待检测 UAV 的 SINR γ_{ln}。

1: **for** $v_n \in \boldsymbol{N}_j$
2: **for** $u_l \in \boldsymbol{L}_j$
3: **if** 用户 u_l 到 UAV v_n 的 SINR γ_{ln} 比到当前 UAV v_j 的 SINR $\gamma_{l,j}$ 小 ΔR_{del}

```
        判断 v_n 为冗余的用户数量加 1
    end if
end for

if 判断 v_n 为冗余的用户数量大于待检测用户数量的 50%
    每个判断 v_n 为冗余的用户使 v_n 的 TTL e_{T,jn} 减 1
    if 当前 UAV v_j 到 UAV v_n 的信道质量优势 s_jn 小于阈值 s_del
        if 当前 ANR 检测周期内 L_j 中没有用户切换至 v_n
            if v_n 的 TTL e_{T,jn} = 0
                邻区删除,移除 UAV-BS v_n 与 v_j 之间邻区关系,更新邻接矩阵 E 和 NCRT E_j 中的数据
            end if
        else
            v_n 的 TTL e_{T,jn} 恢复初始值
        end if
    end if
end if
end for
```

(4)邻区添加

完成邻区删除后,执行邻区添加流程,以修正网络中的邻区漏配。对当前 UAV v_j 进行邻区添加时,同样需确定邻区漏配的检测范围。v_j 邻区的集合为 $\boldsymbol{N}_j = \{v_n\}$,其中 $v_n \in \boldsymbol{V}$。则待检测的 UAV 集合为 UAV v_j 的非邻区,即 $\boldsymbol{M}_j = \{v_m\}$,满足 $v_m \in \boldsymbol{V}, v_m \notin \boldsymbol{N}_j, v_m \neq v_j$。需要检测的用户集合为 UAV v_j 所服务的用户 $\boldsymbol{L}_j = \{u_l\}, u_l \in \boldsymbol{U}$。邻区添加流程如算法 7 所示[6]。

算法 7　邻区添加流程

输入:当前 UAV v_j,待检测的 UAV 集合 $\boldsymbol{M}_j = \{v_m\}$,待检测的用户集合 $\boldsymbol{L}_j = \{u_l\}$,NCRT E_j,邻接矩阵 $\boldsymbol{E} = [e_{jk}]_{(V\times V)}$,信道质量优势次数矩阵 $\boldsymbol{S} = [s_{jk}]_{V\times V}$,用户与当前 UAV 的 SINR γ_{lj},用户与待检测 UAV 的 SINR γ_{lm}。

```
for u_l ∈ L_j
    for v_m ∈ M_j
        if 用户 u_l 到 UAV v_m 的 SINR γ_lm 比到当前 UAV v_j 的 SINR γ_lj 大 ΔR_add
            if 当前 UAV v_j 到 UAV v_m 的信道质量优势 s_jm 大于阈值 s_add
                邻区添加,建立 UAV-BS v_m 与 v_j 之间的邻区关系,更新邻接矩阵 E 和 NCRT E_j 中的数据
            end if
        end if
    end if
end for
```

完成邻区添加后,如果网络的邻区关系发生了调整,则执行算法 5 中的 PCI 分配流程,以保证新的邻区关系下不会出现 PCI 冲突和混淆。

此外,考虑在实际应用中,RSRP 同样是衡量信道质量的重要标准,因此,信道质量优势检测、邻区添加和邻区删除功能还支持使用信道质量动态测量模块模拟测量得到的 RSRP(式(6))作为信道质量优势和邻区冗余和漏配的判断指标。

3.5　MRO 模块

MRO 模块根据用户测量的网络状态信息实现移动性管理功能。此外,MRO 模块还具备动态调节切换参数的功能,以改善用户的切换成功率。

本模块需要根据用户测量的 RSRP 数据判断用户是否触发切换流程,并完成用户的切换操作。由于无人机网络具有较强的动态性,如果使用固定的切换参数,可能导致大量的切换失败。因此,MRO 模块需要记录用户的切换信息,分析和统计一段时间内用户的异常切换情况,为切换参数优化提供数据支持。在统计周期结束时,本模块需要根据统计结果,评估当前切换参数的切换成功率,根据分析结果对参数进行回退或调整,使切换参数更加合理,改善用户的切换成功率。

根据上述功能需要,本文的 MRO 模块具备以下功能:(1)事件触发用户切换;(2)切换异常检测;(3)切换参数评估;(4)切换参数回退和调整。

(1)事件触发用户切换

MRO 功能模块以 MDT 模块的测量信息为依据,以进入 *A*3 事件作为用户切换的触发条件。该事件表示在考虑偏置的情况下,邻区信号质量高于当前服务小区的信号质量[32]。因此,MRO 功能将检测 *A*3 事件的进入条件是否满足。对于接入 v_j 的用户 u_i,其 *A*3 事件的进入条件表示为

$$P_{\mathrm{Mn},k} > P_{\mathrm{Mp},j} + P_{\mathrm{Off}} - P_{\mathrm{CIO},jk} \tag{8}$$

其中，$v_k \in V$ 为 v_j 的邻区，$P_{\mathrm{Mn},k}$ 和 $P_{\mathrm{Mp},j}$ 分别是邻小区和服务小区的 RSRP 测量值，P_{Off} 表示事件偏置，$P_{\mathrm{CIO},jk}$ 表示邻小区偏置。当 *A*3 事件的进入条件在 t_{TTT} 时间内被持续满足时，用户触发切换流程，连接至该基站。如果有多个 UAV-BS 同时满足 *A*3 事件条件，用户将随机选择一个 UAV-BS 接入。记录用户切换的原基站、目标基站、切换前的 RSRP 及切换时间，以供后续功能使用。

(2)切换异常检测

在完成事件触发用户切换的检测和切换操作后，切换异常检测功能会对用户切换进行判别和统计。本文考虑的切换异常包括切换过早、切换过晚和切换错误 3 种情况。切换过早定义为：当用户切换至新的小区时，该小区的信号强度还处于较弱的状态，用户很快发生无线链路失效，又重新连接回原小区。切换错误定义为：当用户切换至新的小区后，很快发生了无线链路失效，又切换至另一小区。切换过晚定义为：当用户切换至新的小区时，原小区信号强度已经很弱，导致无线链路失效[14]。

如果用户 u_i 在当前时间步 t 时从 UAV v_j 切换至 v_k，则需要对 u_i 进行切换异常检测。设 u_i 前两次切换的时刻分别为 $t_1 = t - a$ 和 $t_2 = t_1 - b$，a、$b > 0$，则切换异常检测流程如算法 8 所示。

算法 8 切换异常检测流程

输入：当前用户 u_i，u_i 在 t_1 和 t_2 时刻的切换目标基站，u_i 在 t 时刻切换前的 RSRP $P_{\mathrm{R},ij}(t')$。

if 上次连接的持续时间 a 是否小于阈值
  if t 时刻切换到的 BS 与 t_2 时切换到的 BS 相同
    判断为切换过早，切换过早计数 +1
  else
    判断为切换过晚，切换过晚计数 +1
  end if
  切换异常计数 +1
end if
if 用户 u_i 切换前的 RSRP $P_{\mathrm{R},ij}(t')$ 小于阈值 P_{L}
  判断为切换过晚，切换过晚计数 +1
end if

(3)切换参数评估

在 MRO 统计周期结束时，切换参数评估功能根据当前周期的统计数据判断当前切换参数是否满足要求。根据切换成功率指标判断当前切换参数是否需要回退和调整。切换参数评估流程如算法 9 所示。

算法 9 切换参数评估流程

输入：切换次数 N_{HO}，切换异常次数 N_{A}，上个周期的切换成功率 $r_{\mathrm{HO}}(t - t_{\mathrm{M}})$。

计算切换成功率 $r_{\mathrm{HO}}(t) = 1 - N_{\mathrm{A}}/N_{\mathrm{HO}}$
if 切换成功率 $r_{\mathrm{HO}}(t)$ 低于上个周期的切换成功率 $r_{\mathrm{HO}}(t - t_M)$
  判定为需要进行参数回退
end if
if 切换成功率 $r_{\mathrm{HO}}(t)$ 低于阈值 r_{th}
  判定为需要进行参数调整
end if

(4)切换参数回退和调整

完成功能(3)的切换参数评估后，切换参数回退和调整功能根据判决结果及统计信息对切换参数进行相应的修改。其中，参数回退会使用上个统计周期的切换参数覆盖当前的切换参数。参数调整则会根据何种异常占据主导地位对切换参数进行全局调整和局部调整。令 N_{HO}、N_{L}、N_{E} 和 N_{W} 分别表示一个统计周期内的总切换次数、切换过早次数、切换过晚次数和切换错误次数；令 $N_{\mathrm{A},jk}$、$N_{\mathrm{L},jk}$、$N_{\mathrm{E},jk}$ 和 $N_{\mathrm{W},jk}$ 分别表示一个统计周期内从 v_j 切换到 v_k 的异常切换次数、切换过早次数、切换过晚次数和切换错误次数。切换参数调整流程如算法 10 所示[33-34]。

算法 10 切换参数调整流程

输入：MRO 统计信息 N_{HO}，N_{L}，N_{E}，N_{W}，$N_{\mathrm{A},jk}$，$N_{\mathrm{L},jk}$，$N_{\mathrm{E},jk}$，$N_{\mathrm{W},jk}$，切换参数 t_{TTT}，P_{Off}，$P_{\mathrm{CIO},jk}$。

if 异常切换次数 N_{HO} 超过阈值 N_{Ath}
  if $N_{\mathrm{L}} \geqslant N_{\mathrm{E}} + N_{\mathrm{W}}$
    t_{TTT} 减小一个调整单位 Δt_{TTT}
  else
    t_{TTT} 增大一个调整单位 Δt_{TTT}
  end if
  if 切换次数 N_{HO} 大于上限阈值 $N_{\mathrm{HO}}^{\max}$
    P_{Off} 增加一个调整单位 ΔP_{Off}
  else if 切换次数 N_{HO} 小于下限阈值 $N_{\mathrm{HO}}^{\min}$
    P_{Off} 减小一个调整单位 ΔP_{Off}

```
11:  end if
12:  for j = 1,2,…,V
13:    for k = 1,2,…,V
14:      if v_j 到 v_k 的异常切换次数 N_{A,jk} 大于阈值 N'_{Ath}
15:        if N_{L,jk} ≥ N_{E,jk} + N_{W,jk}
16:          P_{CIO,jk} 增加一个调整单位
17:        else
18:          P_{CIO,jk} 减小一个调整单位
19:        end if
20:      end if
21:    end for
22:  end for
23:end if
```

4　数值仿真

本节所使用的相关参数如表 1 和 2 所示。

表 1　网络部署参数

参数	数值
L	400 m
V	24
U	160
η_v	40 m · s^{-1}
R	40 m
B	20 MHz
N	111
η_u	5 m · s^{-1}
UAV 分组	无, {4}
$t_{\max}$	30 000
τ	0.005 s
t_T	5 s

4.1　UAV 基站间不同频率分配方案性能对比

在样本部署过程中,可以使用不同的频率分配方案。当网络中的所有 UAV 可以共用一个频率,形成频率的完全复用;也可以将 UAV 分组,令每组 UAV 使用不同频率,形成频率的部分复用。在本文中,根据算法 3,将网络中的 UAV 分为 4 组,复用 6 个频率。此外,引入了 Max-SINR 方法作为传统移动性管理方案,用于性能评估。该传统方案将在每个时间步使用户切换至 SINR 最大的 UAV 上。将所提算法与传统算法的 2 种不同频率分配方案进行性能对比,实验结果如图 3 所示。

表 2　自组织网络动态运行相关参数

参数	数值 (SINR 准则)	数值 (RSRP 准则)
初始 t_{TTT}	0.1	0.1
初始 P_{Off}	0.5, {−3}	0.5, {−3}
初始 $P_{\mathrm{CIO},jk}$	0	0
Δt_{TTT}	0.01	0.01
ΔP_{Off}	0.1	0.1
ΔP_{CIO}	0.1	0.1
P_N	−117, {−122, −108} dB	−117, {−122, −108} dB
r_{th}	95%	95%
ΔR_{del}	−8 dB	−7 dB
ΔR_{add}	0.5 dB	0.3 dB
$e_{\mathrm{T},jk}$	10	10
t_{N}	0.05 s	0.05 s
t_M	3.2 s	3.2 s
s_{add}	5	5
s_{del}	5	5
P_L	−117 dB	−117 dB
$N_{\mathrm{HO}}^{\max}$	25	25
$N_{\mathrm{HO}}^{\min}$	5	5
N_{Ath}	3	3
N'_{Ath}	2	2

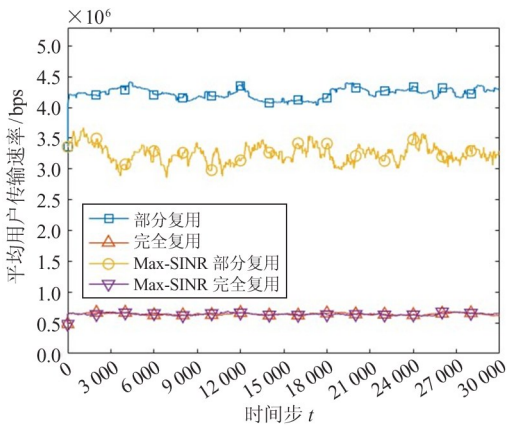

图 3　不同频率分配方案下的用户传输速率

频率完全复用时,所提方案的平均用户传输速率为 622 kB · s^{-1},平均 SINR 为 −8.07 dB,与 Max-SINR 方案的性能表现接近。由于干扰严重,所提方

案无法实现传输速率的改善。频率部分复用时，所提方案的平均用户传输速率为 4.02 MB · s^{-1}，平均 SINR 为 1.75 dB，而 Max-SINR 方案下的平均用户传输速率为 2.98 MB · s^{-1}。采取频率部分复用方案能够减少 UAV-BS 之间的干扰，改善所提方案的优化效果，实现较传统方案更高的网络服务性能。因此，后续实验均采用这一频率复用方案，对所提方案的优化效果展开进一步验证。

4.2　基于不同测量指标的 ANR 邻区优化方案对比

在本文中，ANR 功能用于在网络运行中优化邻区关系。为了验证 ANR 优化的有效性，设置错误的初始邻区配置阈值 P_N，使网络的初始邻区出现大量冗余或漏配，通过仿真实验分析 ANR 邻区优化情况。此外，ANR 优化模块不仅可以采用本文方案设计中使用的 SINR 作为测量指标，还可以以 RSRP 作为邻区优化的判断准则。本文将对比基于这 2 种测量指标的优化方案。

当初始邻区判断阈值 P_N 过大，网络在配置时将出现邻区漏配。相应地，当初始邻区判断阈值 P_N 过小，将出现邻区冗余。统计邻区错误数量作为 ANR 优化的性能指标。对于 UAV-BS v_j 和网络中另一 UAV-BS v_k，当 50% 及以上接入 v_j 的用户与 v_k 之间的 SINR γ_{lk} 大于 1.50 dB（SINR 指标）或 v_j 与 v_k 之间的距离小于 90 m（RSRP 指标）时，v_j 和 v_k 不具有邻区关系，则视为存在邻区漏配。当 50% 及以上接入 v_j 的用户 v_k 之间的 SINR γ_{lk} 小于 −8.00 dB（SINR 指标）或 v_j 与 v_k 的距离大于 220 m（RSRP 指标）时，则视为存在邻区冗余。

基于 SINR 指标，初始邻区阈值过大、过小情况下的邻区错误次数如图 4 和 5 所示。

统计结果表明，当阈值过大时，网络中存在的邻区漏配数量可以在 100 个 ANR 优化周期内快速减少。同时，当阈值过小时，网络中的冗余邻区能够在 20 个 ANR 优化周期内得到删除。

此外，不同初始邻区阈值下的用户传输速率如图 6 所示。三种情况下的平均传输速率在 4.00 MB · s^{-1} 附近波动，网络初始邻区参数的错误未对用户传输速率造成显著影响。上述仿真结果表明，尽管初始邻区的判断存在错误，但由于 ANR 优化模块的有效工作，邻区关系能够在短时间内恢复正常，因此，当用户需要切换至其他基站时，网络已经恢复正常运行，不会对用户的传输速率产生长期影响。

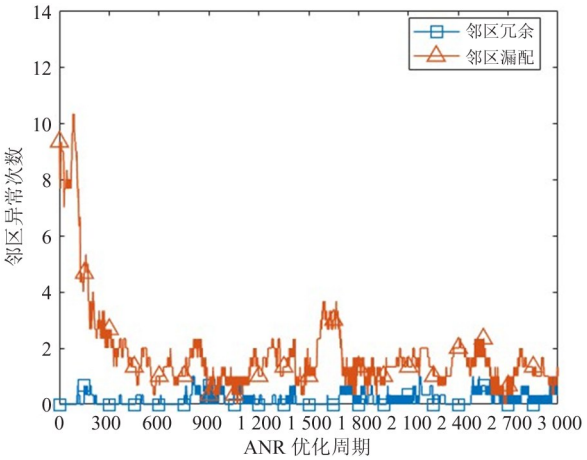

图 4　阈值过大时的邻区错误次数（SINR 指标）

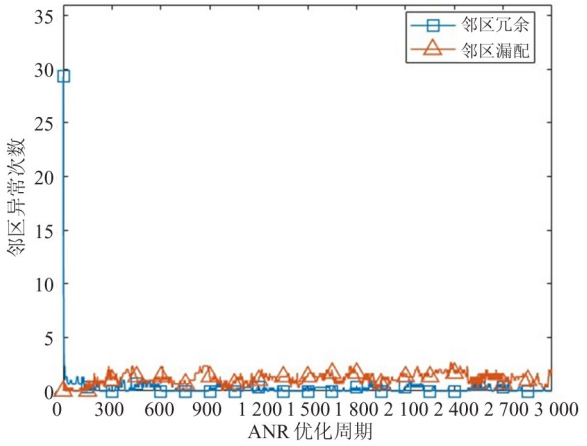

图 5　阈值过小时的邻区错误次数（SINR 指标）

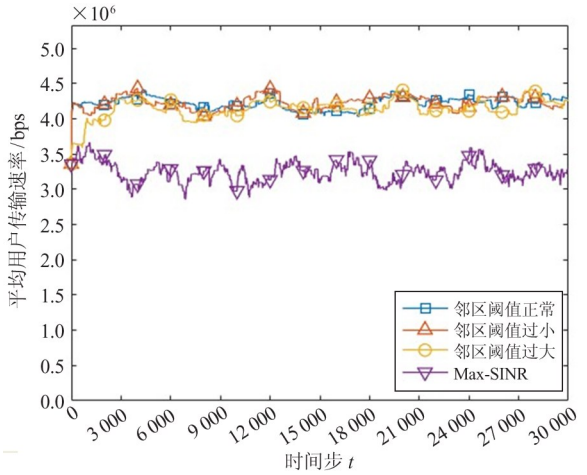

图 6　用户传输速率（SINR 指标）

基于 RSRP 指标的邻区错误次数和用户传输速率取得了与 SINR 指标近似的结果,如图 7 ~ 9 所示。三种情况的用户传输速率均保持在4.0 Mbps

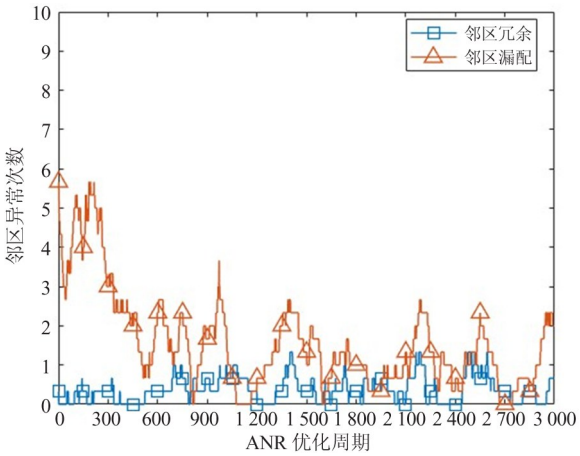

图 7　阈值过大时的邻区错误次数(RSRP 指标)

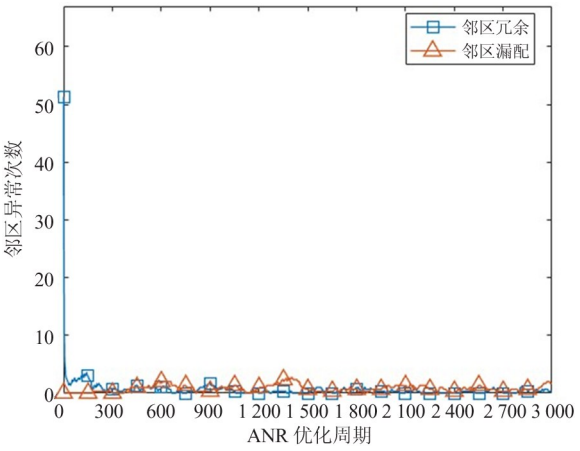

图 8　阈值过小时的邻区错误次数(RSRP 指标)

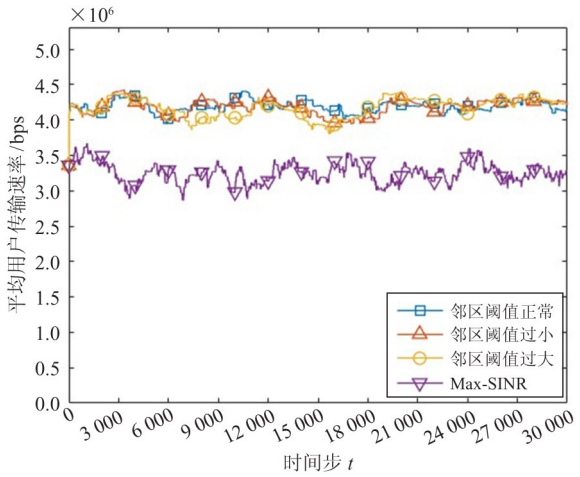

图 9　用户传输速率(RSRP 指标)

附近,高于 Max-SINR 方案,且邻区错误能够得到快速修正。

4.3　不同参数下 MRO 性能对比

本文中,MRO 可以优化切换参数,提高用户的切换成功率。为了验证 MRO 的有效性,设置一个过小的初始切换参数 $P_{\mathrm{Off}} = -3$,使当前小区信号强度还未降低时就发生大量切换。通过与正常情况下的网络性能进行对比,评估 MRO 的优化性能。两种情况的用户传输速率和切换成功率如图 10、11 所示。

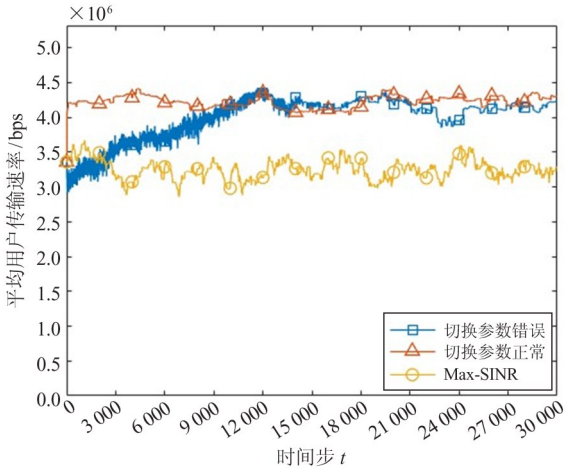

图 10　切换参数正常和错误情况下的用户传输速率对比

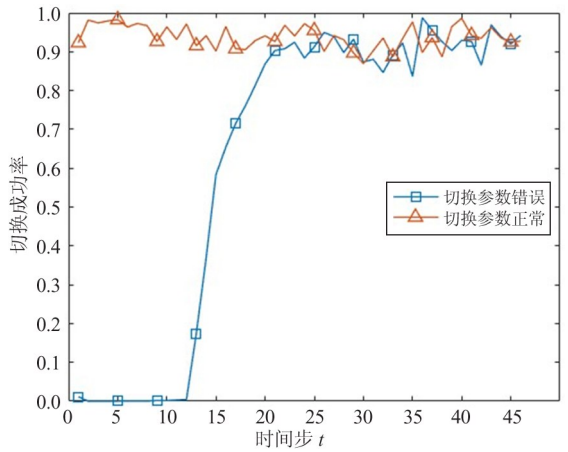

图 11　切换参数正常和错误情况下的切换成功率对比

当网络的切换参数过小时,用户将发生大量错误切换,使得切换成功率和传输速率降低。随着 MRO 功能对切换参数的不断调整,切换参数趋于正常,用户传输速率和切换成功率也随之改善,达到与正常情况相近的水平。

5 结 论

本文设计并搭建了具备自组织网络功能的无人机仿真平台,构建了从自组织网络建立到用户接入、切换全过程的仿真平台实现。然后,利用自组织网络功能对高动态的无人机网络进行移动性管理,并进行了仿真实验,对自组织网络功能及网络服务性能展开评估。仿真结果表明,无人机网络仿真平台在多种配置参数下,能够有效完成网络的自配置、自优化。在网络正常运行的情况下,相较于传统移动性管理方案,所提方案实现了更高的网络服务性能。此外,在网络参数配置错误时能够快速调整,使网络恢复到正常运行的状态。其中,ANR 功能能够有效纠正错误的初始邻区配置,保障后续功能正确运行。MRO 功能能够调整错误的切换参数配置,逐步改善网络服务性能至正常水平。因此,本文所实现的无人机自组织网络仿真平台能够实现自组织网络的基本功能,且基于该平台的移动性管理方案能够在不同的网络配置参数下有效保障网络的持续正常运行,实现网络服务性能的提升。

参考文献

[1] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016,54(5): 36-42.

[2] LI B, FEI Z, ZHANG Y. UAV communications for 5G and beyond: recent advances and future trends[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018,6(2):2241-2263.

[3] ZENG Y, WU Q, ZHANG R. Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2019,107(12):2327-2375.

[4] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015,18(2):1123-1152.

[5] 3GPP. Self-configuring and self-optimizing network(SON) use cases and solutions: 3GPP TR36.902 v9.3.1[S]. Valbonne: 3GPP, 2011.

[6] 魏垚. 蜂窝移动通信系统物理小区识别自组织技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2013.

[7] 闵仕君. LTE-Advanced 系统的物理小区标识和邻区关系自组织研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2013.

[8] 张羽. 蜂窝异构网络中自动邻区关系维护算法研究[D]. 北京:北京邮电大学,2014.

[9] 孙成丹,张洪岩,魏垚,等. LTE-Advanced 系统中 PCI 自配置仿真研究[J]. 电信科学,2013,29(7):30-36.

[10] ZHANG L, LIU Y, ZHANG M, et al. A two-layer mobility load balancing in LTE self-organization networks[C]//2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology. Jinan, China: IEEE, 2011:925-929.

[11] 刘志强. LTE 移动负载均衡技术研究[D]. 北京:中国科学技术大学, 2011.

[12] OH S, KIM H, NA J, et al. Mobility load balancing enhancement for self-organizing network over LTE system[M]//Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Springer, Cham, 2016: 205-216.

[13] ZIA N, MITSCHELE-THIEL A. Self-organized neighborhood mobility load balancing for LTE networks[C]//2013 IFIP Wireless Days (WD). Valencia, Spain: IEEE, 2013:1-6.

[14] 余建涛,胡宏林,金圣峣,等. 移动负载均衡与移动鲁棒性优化的冲突协调[J]. 计算机工程, 2012,38(1): 37-41.

[15] LATEEF H Y, IMRAN A, IMRAN M A, et al. LTE-advanced self-organizing network conflicts and coordination algorithms[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(3):108-117.

[16] 王波. LTE 网络自优化关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2011.

[17] MWANJE S S, ZIA N, MITSCHELE-THIEL A. Self-organized handover parameter configuration for LTE[C]// 2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Paris, France: IEEE, 2012:26-30.

[18] 秦文聪. LTE 系统自优化及自治愈技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2014.

[19] CHEN Y, LI N, ZHONG X, et al. Fair deployment of an unmanned aerial vehicle base station for maximal coverage[J]. IEICE Transactions on Communications, 2019,102(10):2014-2020.

[20] ZHANG M, FU S, FAN Q. Joint 3D deployment and power allocation for UAV-BS: a deep reinforcement learn-

ing approach[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021,10(10):2309-2312.

[21] 王超. 无人机基站部署与位置更新研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.

[22] HUANG D, CUI M, ZHANG G, et al. Trajectory optimization and resource allocation for UAV base stations under in-band backhaul constraint[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020, 2020(1):1-17.

[23] 仇琛. 无人机基站的动态部署与联合资源分配[D]. 北京:北京邮电大学, 2020.

[24] DING R, XU Y, GAO F, et al. Trajectory design and access control for air-ground coordinated communications system with multiagent deep reinforcement learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(8): 5785-5798.

[25] WU C P, LI Y R, WANG J L, et al. Learning-based downlink user selection algorithm for UAV-BS communication network[C]//2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas, USA: IEEE, 2020:1-5.

[26] 杨翰章. 无人机基站蜂窝网络下的部署方法及移动切换技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.

[27] 肖崛. 基于TD-LTE空中基站的容量仿真研究和实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2017.

[28] 牛明亮. 基于5G网络的无人机通信方案研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.

[29] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks 3GPP TR 38.811. V15.4.0[S]. Valbonne: 3GPP, 2020.

[30] 刘金灿. TD-LTE系统的PCI规划研究与应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014

[31] YU J, PENG M, LI Y. A physical cell identity self-organization algorithm in LTE-advanced systems[C]//The 7th International Conference on Communications and Networking in China. Kunming, China: IEEE, 2012:576-580.

[32] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); radio resource control (RRC); protocol specification:3GPP TS36.331 v15.19.0[S]. Valbonne:3GPP, 2022.

[33] 安新朝,索坤,王占华. LTE网络移动鲁棒性优化功能应用研究[C]//2017全国无线及移动通信学术大会论文集, 2017:122-126.

[34] 徐闯. 基于LTE小基站移动鲁棒性优化技术的研究[D]. 大连:大连交通大学, 2020.

Simulation and performance evaluation of mobility management in UAV self-organizing network

SUN Ao*, YANG Feng*, WU Wenjun*, SUN Teng**

(*Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

(**The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081)

Abstract

Unmanned aerial vehicle (UAV) networks, which can be dynamically deployed at low cost and provide flexible coverage on demand, can be used as a complement and extension of terrestrial networks to enhance network service performance. However, the high mobility of UAV creates challenge for network optimization and mobility management. The need for mobility management in highly dynamic UAV networks can be met by using self-organizing network (SON) technology. This paper refers to the 3GPP standards and technical specifications to construct a simulation platform for UAV self-organizing network from the establishment of self-organizing network to the user access and handoff, and carry out mobility management simulation and performance evaluation of UAV self-organizing network. The simulation results show that the simulation platform constructed in this paper can realize the self-configuration function of the network, and can carry out self-optimization when the parameters are unreasonable, so as to realize better network service performance than the traditional method.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), self-organizing network(SON), mobility management