

DOI:10.20079/j. issn. 1001-893x. 221006004

泊松点距离约束下无人机辅助地面应急网络覆盖性能研究^{*}

乌云嘎^{a,b}, 姚媛媛^{a,b}, 潘春雨^{a,b}, 岳新伟^{a,b}, 李兴华^{a,b}

(北京信息科技大学 a. 信息与通信工程学院; b. 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100101)

摘要: 在用户数量激增的应急通信场景下, 为保证地面用户的通信质量, 提出了基于距离约束的用户自适应接入方案。首先采用泊松点距离约束策略 (Poisson Point under Distance Constraint, PPDC) 对无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 的位置进行建模, 避免无人机区域重叠带来的干扰问题。其次, 引入基站负载传输协议 (Base Station Load Transfer Protocol, BSLTP), 当接入基站的 用户数量超过给定阈值时, 超载用户由无人机提供服务。此外, 分别分析了地面基站和无人机的覆盖性能, 得到了系统整体覆盖概率, 并研究了无人机高度、覆盖半径、激增用户密度对网络覆盖性能的影响。最后, 通过仿真验证了理论结果的正确性, 且所提部署方案能够有效提升网络覆盖性能。

关键词: 应急通信; 无人机 (UAV); 距离约束; 泊松点过程 (PPP); 覆盖性能

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号: TN929.5; V279 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2024)02-0230-09

Research on Coverage Performance of UAV-assisted Ground Emergency Network with Poisson Point under Distance Constraint

WU Yunga^{a,b}, YAO Yuanyuan^{a,b}, PAN Chunyu^{a,b}, YUE Xinwei^{a,b}, LI Xuehua^{a,b}

(a. School of Information and Communication Engineering; b. Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to ensure the communication quality of ground users, a user-adaptive access scheme based on the distance constraint is proposed in the scenario of emergency communication with a large increase in the number of users. Firstly, to avoid the interference caused by the overlapping area of unmanned aerial vehicles (UAVs), Poisson Point under Distance Constraint (PPDC) is proposed to model the location of UAVs. Secondly, the Base Station Load Transfer Protocol (BSLTP) is introduced, and when the number of connecting base station users exceeds a given threshold, the overloaded users are served by UAVs. In addition, the coverage performance of the ground base station and UAV is analyzed, and the overall coverage probability of the system is obtained. The influence of UAVs' height, coverage radius, and the density of a surge of users on the network performance is analyzed. Finally, the simulation verifies the accuracy of the theoretical results, and the network coverage performance can be effectively improved by the proposed deployment scheme.

Key words: emergency communication; unmanned aerial vehicles (UAV); distance constraint; Poisson point process (PPP); coverage performance

^{*} 收稿日期: 2022-10-06; 修回日期: 2022-11-20

基金项目: 北京市属高等学校优秀青年人才培养计划项目; 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金 (L192022, L212026); 北京市教育委员会科学研究计划项目 (KM202011232002); 泛网无线通信教育部重点实验室 (BUPT) 项目 (KFKT-2020105)

通信作者: 乌云嘎 Email: wuyunga520@bistu.edu.cn

0 引 言

在我国的传统应急通信措施中,将应急通信车作为地面中继,存在范围小、成本较高、无法快速部署等问题,且由于地面环境的约束,通信车难以找到合适的放置位置;应急卫星通信由于其传输链路过长,难以实现即时通信,且较难应用于商业;D2D (Device-to-Device) 通信虽然可以实时通信,但其覆盖范围小,传输链路有限,难以满足应急通信需求。

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 作为 5G 的关键技术之一,具有高机动性、灵活部署、良好视距链路等优势^[1],无人机辅助地面网络正在成为一种潜在的应急通信解决方案^[2]。文献[3-5]考虑的大多为单无人机辅助地面网络的方案,难以实现地面多用户的覆盖。

目前,已有许多文献展开了对多无人机辅助地面网络建模的相关研究。文献[6-8]的研究中,无人机的数量与位置通常为固定值,忽略了无人机部署的随机性。因此,为满足应急区域内的容量需求,通过部署大规模无人机来评估网络性能更具有现实意义。

随机几何作为一种被广泛使用的数学工具,可以应用于大规模节点部署和性能分析,这也为无人机辅助地面网络的研究提供了参考。文献[9]将地面基站 (Ground Base Station, GBS) 与无人机的位置建模为两个独立的齐次泊松点过程 (Homogeneous Poisson Point Process, HPPP),根据链路状态分析不同信道模型下的网络覆盖性能。文献[10]将无人机的位置建模为二项式点过程 (Binominal Point Process, BPP),研究了发射节点的固定位置和随机位置对覆盖性能的影响。文献[11]用空间泊松点过程 (Spatial Poisson Point Process, SPPP) 对无人机的位置进行建模,提出了高度和发射功率优化算法,以最大化系统吞吐量。但上述文献没有考虑到无人机部署中覆盖区域的重叠问题,可能会带来较大的干扰以及资源浪费。

文献[12]将无人机与地面用户的位置建模为基于距离约束的 Matern 聚类过程,通过配置发射功率、密度等参数分析网络性能。文献[13]提出了无人机辅助小区边缘用户的网络模型,将无人机与地面用户的位置建模为带有距离约束的 PCP,分析了网络的覆盖性能。然而,上述文献忽略了基站的满

载情况,这可能会影响到地面用户的通信质量。

考虑到应急场景中无人机与用户分布的随机性,为实现网络区域内用户通信质量的稳定,同时避免无人机覆盖区域重叠带来的干扰,根据上述分析,考虑应急通信场景下用户激增的情况,本文将新增用户的位置建模为泊松点过程 (Poisson Point Process, PPP),位于地面基站覆盖范围外的用户由无人机提供服务;位于地面基站覆盖范围内的用户,基站没有满载时由地面基站提供服务,根据基站负载传输协议 (Base Station Load Transfer Protocol, BSLTP),超过基站满载用户数量时的用户由无人机提供服务。该协议能较好地协调无人机与地面基站之间的通信容量,可有效实现地面用户全覆盖。为提高无人机部署效率,本文提出泊松点距离约束策略 (Poisson Point under Distance Constraint, PPDC) 下的无人机部署方案,利用随机几何工具分析了用户、基站之间的干扰。基于所提网络部署模型,综合分析了无人机的高度、新增用户密度、无人机覆盖半径等参数对网络覆盖性能的影响,通过设置系统参数可改善网络性能,对应急通信场景中无人机的应用具有一定的意义。

1 系统模型

1.1 无人机辅助地面基站网络模型

本文考虑由地面基站、大规模无人机、地面用户组成的上行链路。如图 1 所示,在应急通信场景下会,用户数量激增,地面基站无法满足全部用户的通信需求,此时通过部署无人机作为空中基站为新增用户提供通信服务,可有效提高网络整体覆盖率。图 1(a)所示为正常通信情况下,基站服务在其覆盖半径内原始用户的场景。图 1(b)所示为应急通信场景中用户激增情况下,所提无人机辅助地面网络部署方案,当地面基站超载时,新增用户可由无人机提供通信服务以保证应急通信场景下的用户通信质量。其中,地面基站的分布服从密度为 λ_g 的 PPP Φ_g 。将原始用户的位置建模为泊松簇过程 (Poisson Cluster Process, PCP) Φ_{gu} ,密度为 λ_{gu} 。原始用户以每个地面基站为父点,成簇地分布在以地面基站为圆心、半径为 R_g 的圆形区域内,且子过程之间是相互独立的。应急通信场景下,新增用户的分布服从

密度为 λ_a 的 PPP Φ_a , 假设所有用户具有相同的传输功率 P 。无人机群的分布服从密度为 λ_u 的带有距离约束的 PPP Φ_u , 即无人机的覆盖区域不存在覆盖冗余, 且无人机距离地面高度固定为 H 。

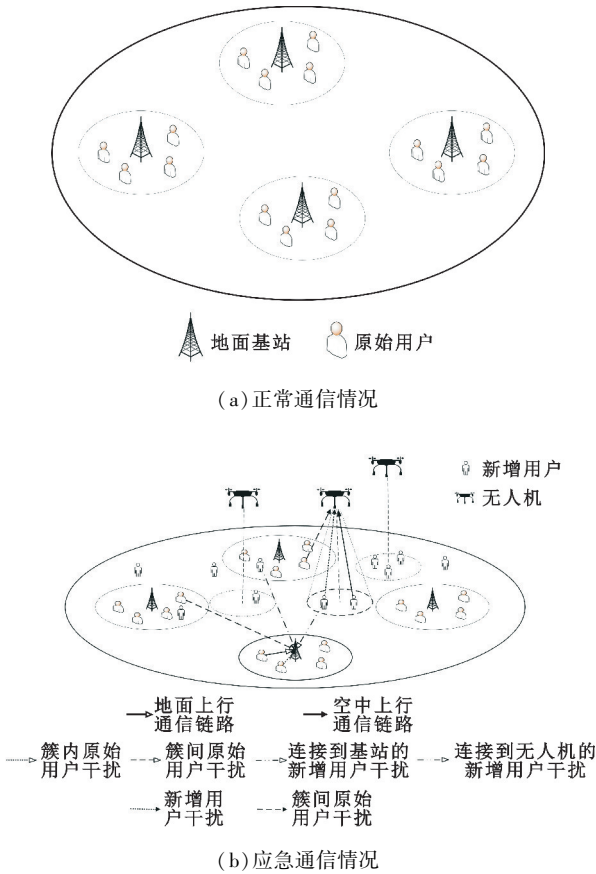


图 1 应急通信场景下无人机辅助地面网络部署场景
Fig. 1 UAV assisted ground network deployment under emergency communication scenario

用 $f(r)$ 表示地面基站覆盖范围内原始用户到目标基站的距离的概率密度函数:

$$f(r)=\begin{cases} \frac{2r}{R_g^2}, & r\leq R_g \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

无人机覆盖区域内的用户通常更为密集, 随着新增用户的增加, 无人机覆盖区域会产生覆盖重叠, 此时在其重叠区域内的用户会对相邻的无人机造成较大干扰。基于以上模型, 可采用带有距离约束的 PPP 对无人机的位置进行建模。

1.2 泊松点距离约束策略 (PPDC)

无人机覆盖区域内的用户通常更为密集, 随着新增用户的增加, 无人机覆盖区域会产生覆盖重叠, 此时在其重叠区域内的新增用户会对相邻的无人机

造成较大干扰。基于以上模型, 可采用泊松点距离约束策略 (Poisson Point under Distance Constraint, PPDC) 对无人机的位置进行建模。假设两个相邻无人机所服务的簇之间的水平距离为 $D=2R_u+\Delta(\Delta>0)$, R_u 为无人机所服务的簇半径。如图 2 所示, 将 PPDC 策略应用实际应急通信场景进行建模。此时, 无人机的覆盖区域没有发生重叠情况。

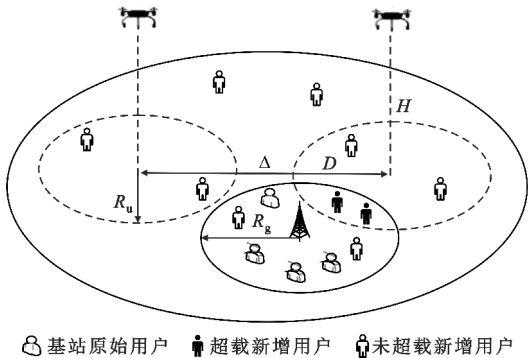


图 2 PPDC 策略与 BSLTP 协议下的无人机通信网络
Fig. 2 UAV communication network based on PPDC strategy and BSLTP protocol

1.3 基站负载传输协议 (BSLTP)

基于无人机辅助地面基站的网络模型, 本文提出一个基站负载传输协议, 该协议具体内容为: 每个基站在其覆盖范围内都有固定的所能服务的用户数量阈值 m , 在流量激增时基站覆盖范围内会出现新增用户。当新增用户数量 p 与基站原始用户数量 q 的总和超过阈值 m 时, 基站将不能为超出数量的新增用户提供服务, 此时, 这些用户将由位于其上方的无人机提供服务。如图 2 所示, 位于地面基站覆盖范围内的超载新增用户将由位于其上方的无人机提供通信服务。

1.4 信道和干扰模型

1.4.1 信道模型

无人机辅助地面新增用户进行通信, 由于地面存在高楼等障碍的阻挡, 无人机与用户之间的链路既存在视距链路 (Line of Sight, LoS), 也存在非视距链路 (None Line of Sight, NLoS)。本文考虑用 h 表示莱斯信道增益, h 由 LoS 信道矩阵分量 h_{LoS} 和 NLoS 信道矩阵分量 h_{NLoS} 组成, 因此空地信道增益 h 可以表示为

$$h=\sqrt{\frac{K}{K+1}}|d|^{-\alpha}h_{LoS}+\sqrt{\frac{1}{K+1}}|d|^{-\alpha}h_{NLoS} \tag{2}$$

式中: K 表示莱斯因子,定义为直达信号与散射信号功率之比($K \rightarrow 0$ 时莱斯分布可近似为瑞利分布, $K \rightarrow \infty$ 时空地信道为 LoS 信道); d 为无人机到用户的距离; α 为路径损耗系数。为便于计算,在本文中考虑 $K \rightarrow 0$ 的散射场景,此时,信道模型服从瑞利分布,传输信道服从均值为 1 的指数分布^[19]。

1.4.2 地面基站处的干扰模型

网络模型图如图 1(b) 所示,随机选择一个地面基站作为目标地面基站 g_0 ,位于其覆盖范围内的典型原始用户 x_0 向其发送信号,此时,簇内和簇间其他原始用户对该基站分别产生干扰 I_{intra} 和 I_{inter} ,同时,应急场景下连接到基站和无人机的新增用户分别对其产生干扰 I_{add}^g 和 I_{add}^u 。

假设典型原始用户 x_0 向地面基站发送信号的传输功率为 P_{x_0} ,目标基站 g_0 接收到来自其覆盖范围内的用户 x_0 的功率为

$$S_g = P_{x_0} h_{x_0,g_0} \|x_0\|^{-\alpha_g} \tag{3}$$

式中: h_{x_0,g_0} 表示典型原始用户 x_0 与目标地面基站 g_0 之间的信道增益; $\|x_0\|$ 表示典型原始用户到目标基站 g_0 的距离; α_g 表示地面路径损耗系数。

来自簇内其他原始用户的干扰可表示为

$$I_{\text{intra}} = \sum_{x \in N_{g_0} \setminus x_0} P_x h_{x,g_0} \|x\|^{-\alpha_g} \tag{4}$$

式中: N_{g_0} 表示同一时间向目标基站发送信息的地面基站覆盖范围内原始用户集合; $N_{g_0} \setminus x_0$ 表示目标基站覆盖范围内除典型原始用户外的其他原始用户的集合; h_{x,g_0} 为簇内其他原始用户 x 与目标基站 g_0 之间的信道增益; $\|x\|$ 为簇内其他原始用户 x 到目标基站的距离。

来自簇间其他原始用户的干扰可表示为

$$I_{\text{inter}} = \sum_{g \in \Phi_g \setminus g_0} \sum_{y \in \Phi_g} P_y h_{y,g} \|y\|^{-\alpha_g} \tag{5}$$

式中: Φ_g 表示向目标基站发送信息的地面基站覆盖范围内原始用户集合; h_{y,g_0} 为簇内其他原始用户 y 与目标基站 g_0 之间的信道增益; $\|y\|$ 为簇内其他原始用户 y 到目标基站的距离。

来自应急场景下连接到无人机的新增用户的干扰可表示为

$$I_{\text{add}}^u = \sum_{z_u \in \Phi_{a,u}} P_{z_u} h_{z_u,g_0} \|z_u\|^{-\alpha_g} \tag{6}$$

式中: $\Phi_{a,u}$ 表示向目标基站发送信息的连接到无人机的新增用户的集合; h_{z_u,g_0} 为簇内其他原始用户 z_u

与目标基站 g_0 之间的信道增益; $\|z_u\|$ 为簇内其他原始用户 z_u 到目标基站的距离。

来自应急场景下连接到地面基站的新增用户的干扰可表示为

$$I_{\text{add}}^g = \sum_{z_g \in \Phi_{a,g}} P_{z_g} h_{z_g,g_0} \|z_g\|^{-\alpha_g} \tag{7}$$

式中: $\Phi_{a,g}$ 表示向目标基站发送信息的连接到基站的新增用户的集合; h_{z_g,g_0} 为簇内其他原始用户 z_g 与目标基站 g_0 之间的信道增益; $\|z_g\|$ 为簇内其他原始用户 z_g 到目标基站的距离。

因此,在目标地面基站处的信干噪比 (Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR) 为

$$R_{\text{SINR}} = \frac{P_{x_0} h_{x_0,g_0} \|x_0\|^{-\alpha_g}}{I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + I_{\text{add}}^u + I_{\text{add}}^g + \sigma^2} \tag{8}$$

式中: σ^2 为加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 功率;由于 I_{intra} , I_{inter} , I_{add}^g , I_{add}^u 来自互不相关的干扰源,这些干扰相互独立。

1.4.3 无人机处的干扰模型

随机选择一个无人机作为目标无人机 u_0 ,位于其覆盖范围内的典型新增用户 x'_0 向其发送信号,地面基站覆盖范围内的原始用户对该无人机产生干扰 I_g ,其他新增用户对该无人机产生干扰 $I_{\text{add}}^{u,g}$ 。

假设典型原始用户 x'_0 向无人机发送信号的传输功率为 $P_{x'_0}$,目标无人机 u_0 接收到来自其覆盖范围内的新增用户 x'_0 的功率为

$$S_u = P_{x'_0} h_{x'_0,u_0} \|x'_0\|^{-\alpha_u} \tag{9}$$

式中: $h_{x'_0,u_0}$ 表示典型原始用户 x'_0 与目标无人机 u_0 之间的信道增益; $\|x'_0\|$ 表示用户 x'_0 到目标无人机 u_0 的距离; α_u 表示空地路径损耗系数。

来自其他新增用户 x' 的干扰可表示为

$$I_{\text{add}}^{u,g} = \sum_{x' \in \Phi_{a,ug} \setminus x'_0} P_{x'} h_{x',u_0} \|x'\|^{-\alpha_u} \tag{10}$$

式中: $\Phi_{a,ug}$ 为向目标无人机发送信息的连接到无人机和基站的新增用户的集合, $\Phi_{a,ug} = \Phi_{a,u} \cup \Phi_{a,g}$; h_{y',u_0} 为地面基站覆盖范围外的新增用户 y' 与目标无人机 u_0 之间的信道增益; $\|y'\|$ 为地面基站覆盖范围外的新增用户 y' 到目标无人机 u_0 的距离。

来自地面基站覆盖范围内的原始用户的干扰可表示为

$$I_g = \sum_{y' \in N_g} P_{y'} h_{y',u_0} \|y'\|^{-\alpha_u} \tag{11}$$

式中: N_g 为所有基站覆盖范围内原始用户的集合;

h_{y',u_0} 为地面基站覆盖范围内原始用户 y' 与目标无人机 u_0 之间的信道增益; $\|y'\|$ 为地面基站覆盖范围内的原始用户 y' 到目标无人机 u_0 的距离。

因此,在目标无人机处的信干噪比为

$$R_{\text{SIN}_u} = \frac{P_{x'} h_{x',u_0} \|x'_0\|^{-\alpha_u}}{I_g + I_{\text{add}}^u + \sigma^2} \quad (12)$$

由于 I_g 和 I_{add}^u 来自互不相关的干扰源,这些干扰相互独立。

2 覆盖性能分析

本文分别从地面基站和无人机的角度来分析网络覆盖性能,此外,还综合分析了系统覆盖性能。

2.1 地面基站覆盖概率

地面基站覆盖概率定义为典型用户向目标地面基站成功发送信息的概率,即在目标地面基站处接收到的 SINR 超过目标阈值 γ_g 的概率,可表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{cov}}^g(\gamma_g) &= P_r \{R_{\text{SIN}} > \gamma_g\} = \\ &P_r \left\{ \frac{P_{x_0} h_{x_0,g_0} \|x_0\|^{-\alpha_g}}{I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + I_{\text{add}}^u + I_{\text{add}}^g + \sigma^2} \geq \gamma_g \right\} = \\ &P_r \left\{ h_{x_0,g_0} \geq \frac{\gamma_g (I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + I_{\text{add}}^u + I_{\text{add}}^g + \sigma^2) \|x_0\|^{\alpha_g}}{P_{x_0}} \right\} = \\ &e^{-\rho \sigma^2} E_{I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + I_{\text{add}}^u + I_{\text{add}}^g} [e^{-\rho (I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + I_{\text{add}}^u + I_{\text{add}}^g)}] = \\ &e^{-\rho \sigma^2} \mathcal{L}_{I_{\text{intra}}}(\rho) \mathcal{L}_{I_{\text{inter}}}(\rho) \mathcal{L}_{I_{\text{add}}^u}(\rho) \mathcal{L}_{I_{\text{add}}^g}(\rho) \quad (13) \end{aligned}$$

式中: $\rho = \frac{r^{\alpha_g} \gamma_g}{P_{x_0}}$, $\mathcal{L}_{I_{\text{intra}}}(\rho) = E[e^{-\rho I_{\text{intra}}}]$, $\mathcal{L}_{I_{\text{inter}}}(\rho) =$

$E[e^{-\rho I_{\text{inter}}}]$, $\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^u}(\rho) = E[e^{-\rho I_{\text{add}}^u}]$, $\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^g}(\rho) = E[e^{-\rho I_{\text{add}}^g}]$

分别为干扰 I_{intra} , I_{inter} , I_{add}^u , I_{add}^g 的拉普拉斯变换。

在目标基站 g_0 处,受到来自簇内其他原始用户的干扰的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_{\text{intra}}}(\rho)$ 为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{intra}}}(\rho) &= \\ E_{x \in N_{g_0} \setminus x_0} [\exp(-\rho \sum_{x \in N_{g_0} \setminus x_0} P_x h_{x,g_0} \|x\|^{-\alpha_g})] &= \\ E_{x \in N_{g_0} \setminus x_0} \left[\prod_{x \in N_{g_0} \setminus x_0} E_{h_{x,g_0}} [\exp(-\rho P_x h_{x,g_0} \|x\|^{-\alpha_g})] \right] &= \\ E_{x \in N_{g_0} \setminus x_0} \left[\prod_{x \in N_{g_0} \setminus x_0} \frac{1}{1 + \rho P_x \|x\|^{-\alpha_g}} \right] &= \\ \left[\int_0^{\sqrt{R_g^2 + H^2}} \left(\frac{1}{1 + \rho P_x \|x\|^{-\alpha_g}} \right) \cdot f_{\|x\|}(x) dx \right]^{n-1} &= \end{aligned}$$

$$\left[\int_0^{\sqrt{R_g^2 + H^2}} \left(\frac{1}{1 + \rho P_x r^{-\alpha_g}} \right) \cdot f(r) dr \right]^{n-1} \quad (14)$$

式中: n 为每个基站覆盖范围内的原始用户数量;步骤(a)为 h_{x,g_0} 服从均值为 1 的指数分布求得;步骤(b)为笛卡尔坐标变换到极坐标求得。将式(1)代入式(14),并且令 $t = r^\alpha$,可将式(14)化简为

$$\mathcal{L}_{I_{\text{intra}}}(\rho) = \left[\frac{\delta}{R_g^2 s P_x} \int_0^{(R_g^2 + H^2)^{\frac{1}{\delta}}} \left(\frac{t^\delta}{t(s P_x)^{-1} + 1} \right) dt \right]^{n-1} \quad (15)$$

经过进一步转化,可得到 $\mathcal{L}_{I_{\text{intra}}}(\rho)$ 的表达式

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{intra}}}(\rho) &= \\ \left[\frac{(R_g^2 + H^2)^{\frac{1}{\delta} + 1} \delta}{R_g^2 \rho P_x (\delta + 1)} \cdot {}_2F_1 \left(1, \delta + 1; \delta + 2; -\frac{(R_g^2 + H^2)^{\frac{1}{\delta}}}{\rho P_x} \right) \right]^{n-1} &= \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\delta = \frac{2}{\alpha}$; ${}_2F_1(\cdot)$ 是高斯超几何函数。

在目标基站 g_0 处,受到来自簇间其他基站覆盖范围内原始用户的干扰的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_{\text{inter}}}(\rho)$ 为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{inter}}}(\rho) &= \\ E_{\Phi_g} \left[\prod_{g \in \Phi_g \setminus g_0} \exp(-\rho \sum_{x \in N_g} P_x h_{x,g_0} r^{-\alpha_g}) \right] &= \\ E_{\Phi_g} \left[\left[\prod_{g \in \Phi_g \setminus g_0} E_x \left[\prod_{x \in N_g} \frac{1}{1 + \rho P_x r^{-\alpha_g}} \right] \right] \right] &= \\ \exp \left[-\lambda_g \times \int_{R^2} \left(1 - \left[E_x \left[\frac{1}{(1 + \rho P_x r^{-\alpha_g})^n} \right] \right] \right) dr \right] &= \end{aligned} \quad (17)$$

式中:步骤(a)为 h_{x,g_0} 服从均值为 1 的指数分布求得;步骤(b)是由 PPP 的概率生成函数(Probability Generating Functional, PDFL)得到的结果。根据 Jensen 不等式: $[E_x(x)]^n \leq E_x(x^n)$,可以得到簇间其他基站内的原始用户对目标地面基站产生干扰的拉普拉斯变换的上界,该上界可由下式给出:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{inter}}}(\rho) &\leq \mathcal{L}_{I_{\text{inter}}}^{\text{up}}(\rho) = \\ \exp \left[-\lambda_g \times \left(\int_{R^2} f_{R_2}(r_2) dr \right) \times \int_{R^2} \left(1 - \frac{1}{(1 + \rho P_x r^{-\alpha_g})^n} \right) dr \right] &= \\ \exp \left[-2\pi \lambda_g \int_{R_g}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{(1 + \rho P_x r^{-\alpha_g})^n} \right) r dr \right] &= \end{aligned} \quad (18)$$

式中:步骤(a)是由笛卡尔坐标变换到极坐标得到的。

在目标基站 g_0 处,受到来自连接到无人机的新

增用户的干扰的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^u}(\rho)$ 为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{add}}^u}(\rho) &= \mathbb{E}_{z_u \in \Phi_{a,u}} \left[\exp(-\rho \sum_{z_u \in \Phi_{a,u}} P_{z_u} h_{z_u, g_0} \|z_u\|^{-\alpha_g}) \right] = \\ &= \mathbb{E}_{z_u \in \Phi_{a,u}} \left[\prod_{z_u \in \Phi_{a,u}} \mathbb{E}_{h_{z_u, g_0}} \left[\exp(-\rho P_{z_u} h_{z_u, g_0} \|z_u\|^{-\alpha_g}) \right] \right] = \\ &\exp(-2\pi P_{a,u} \lambda_a \int_0^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + \rho P_{z_u} \|z_u\|^{-\alpha_g}}\right) z_u dz_u) \quad (19) \end{aligned}$$

式中:步骤(a)是通过由 PPP 的概率生成函数得到的结果;步骤(b)是 h_{z_u, g_0} 服从均值为 1 的指数分布求得; $P_{a,u}$ 为新增用户中连接到无人机的概率,可表示为

$$P_{a,u} = P(i > n) = 1 - \frac{1}{n!} \Gamma(n+1, P_{\text{add}}^{u,g} \lambda_a \pi R_g^2) \quad (20)$$

式中: $P_{\text{add}}^{u,g}$ 为新增用户中连接无人机与基站的概率,可表示为

$$P_{\text{add}}^{u,g} = 1 - \exp(-\pi \lambda_u R_u^2) \times \exp(-\pi \lambda_g R_g^2) \quad (21)$$

经进一步转换, $\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^u}(\rho)$ 可表示为

$$\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^u}(\rho) = \exp(-\pi P_{a,u} \lambda_a \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (\rho P_{z_u})^\delta) \quad (22)$$

同理可得,来自应急场景下连接到地面基站的新增用户的干扰的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^g}(\rho)$ 的表达式为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{add}}^g}(\rho) &= \mathbb{E}_{x \in \Phi_{a,g}} \left[\exp(-\rho \sum_{x \in \Phi_{a,g}} P_x h_{x, g_0} \|x\|^{-\alpha_g}) \right] = \\ &\exp(-\pi P_{a,g} \lambda_a \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (\rho P_{z_g})^\delta) \quad (23) \end{aligned}$$

式中: $P_{a,g}$ 为新增用户中连接到地面基站的概率,可表示为

$$P_{a,g} = 1 - P_{a,u} = \frac{1}{n!} \Gamma(n+1, P_{\text{add}}^{u,g} \lambda_a \pi R_g^2) \quad (24)$$

将式(16)、(18)、(22)、(23)代入式(13),可得目标地面基站的覆盖概率表达式为

$$\begin{aligned} P_{\text{cov}}^g(\gamma_u) &= e^{-\rho \sigma^2} \times \\ &\left[\frac{(R_g^2 + H^2)^{\frac{1}{\delta}+1} \delta}{R_g^2 \rho P_x (\delta+1)} \cdot {}_2F_1\left(1, \delta+1; \delta+2; -\frac{(R_g^2 + H^2)^{\frac{1}{\delta}}}{\rho P_x}\right) \right]^{n_g-1} \times \\ &\exp\left[-2\pi \lambda_g \int_{\sqrt{R_g^2 + H^2}}^\infty \left(1 - \frac{1}{(1 + \rho P_x r^{-\alpha_g})^{n_g}}\right) r dr\right] \times \\ &\exp(-\pi P_{a,u} \lambda_a \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (\rho P_{z_u})^\delta) \times \\ &\exp(-\pi P_{a,g} \lambda_a \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (\rho P_{z_g})^\delta) \quad (25) \end{aligned}$$

2.2 无人机覆盖概率

无人机覆盖概率定义为典型用户向目标无人机

成功发送信息的概率,即目标无人机处接收到的 SINR 超过目标阈值 γ_u 的概率,表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{cov}}^g(\gamma_u) &= P_r \{ R_{\text{SIN}} > \gamma_u \} = \\ &P_r \left\{ \frac{P_{x'_0} h_{x'_0, u_0} \|x'_0\|^{-\alpha_u}}{I_g + I_{\text{add}}^{u,g} + \sigma^2} \geq \gamma_u \right\} = \\ &P_r \left\{ h_{x'_0, u_0} \geq \frac{\gamma_u (I_g + I_{\text{add}}^{u,g} + \sigma^2) \|x'_0\|^{\alpha_g}}{P_{x'_0}} \right\} = \\ &e^{-\rho \sigma^2} \mathcal{L}_{I_g}(s) \mathcal{L}_{I_{\text{add}}^{u,g}}(s) \quad (26) \end{aligned}$$

式中: $s = \frac{R^\alpha \gamma_g}{P_{x'_0}}$; $\mathcal{L}_{I_g}(s) = \mathbb{E}[e^{-s I_g}]$ 和 $\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^{u,g}}(s) = \mathbb{E}[e^{-s I_{\text{add}}^{u,g}}]$ 分别为干扰 I_g 和 $I_{\text{add}}^{u,g}$ 的拉普拉斯变换。

根据式(22)的推导,同理可得,在目标无人机 u_0 处,受到来自地面基站覆盖范围内原始用户的干扰的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_g}(s)$ 表达式为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_g}(s) &= \mathbb{E}_{x' \in N_g} \left[\exp(-\rho \sum_{x' \in N_g} P_{x'} h_{x', u_0} \|x'\|^{-\alpha_u}) \right] = \\ &\exp(-\pi n \lambda_g \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (s P_{x'})^\delta) \quad (27) \end{aligned}$$

在目标无人机 u_0 处,受到来自连接到无人机与地面基站的新增用户的干扰的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_{\text{add}}^{u,g}}(s)$ 表达式为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{add}}^{u,g}}(s) &= \mathbb{E}_{y' \in \Phi_{a,ug}} \left[\exp(-\rho \sum_{y' \in \Phi_{a,ug}} P_{y'} h_{y', u_0} \|y'\|^{-\alpha_u}) \right] = \\ &\exp(-\pi P_{\text{add}}^{u,g} \lambda_g \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (s P_{y'})^\delta) \quad (28) \end{aligned}$$

将式(27)、(28)代入式(26),可得目标无人机的覆盖概率表达式为

$$\begin{aligned} P_{\text{cov}}^u(\gamma_u) &= e^{-\rho \sigma^2} \times \exp(-\pi \lambda_g \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (s P_{x'})^\delta) \times \\ &\exp(-\pi P_{\text{add}}^{u,g} \lambda_g \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (s P_{y'})^\delta) \quad (29) \end{aligned}$$

2.3 系统覆盖概率

根据上述目标地面基站与目标无人机得覆盖概率表达式,可以得到系统覆盖率为

$$\begin{aligned} P_{\text{cov}} &= s_u \times P_{\text{cov}}^u + s_g \times P_{\text{cov}}^g = \frac{n_u}{N} [e^{-\rho \sigma^2} \times \\ &\left[\frac{(R_g^2 + H^2)^{\frac{1}{\delta}+1} \delta}{R_g^2 s P_x (\delta+1)} \cdot {}_2F_1\left(1, \delta+1; \delta+2; -\frac{(R_g^2 + H^2)^{\frac{1}{\delta}}}{s P_x}\right) \right]^{n-1} \times \\ &\exp\left[-2\pi \lambda_g \int_{R_g}^\infty \left(1 - \frac{1}{(1 + \rho P_x r^{-\alpha_g})^n}\right) r dr\right] \times \\ &\exp(-\pi P_{a,u} \lambda_a \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (\rho P_{z_u})^\delta) \times \\ &\exp(-\pi P_{a,g} \lambda_a \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (\rho P_{z_g})^\delta)] + \frac{n_g}{N} \cdot \end{aligned}$$

$$[e^{-\rho\sigma^2}\times\exp(-\pi\lambda_g\Gamma(1+\delta)\Gamma(1-\delta)(sP_{x'})^\delta)\times$$
$$\exp(-\pi P_{\text{add}}^{\text{u,g}}\lambda_g\Gamma(1+\delta)\Gamma(1-\delta)(sP_{y'})^\delta)] \tag{30}$$

式中: s_u 是连接无人机的用户占有所有用户之比; s_g 是连接地面基站的用户占有所有用户之比; n_u 是连接无人机用户的数量; n_g 是连接地面基站用户的数量; N 是所有用户的数量。

3 仿真验证

在本文所提的无人机辅助地面基站应急通信网络中,假设无人机的工作频率为 2.4 GHz,发射功率为 20 dBm,接收灵敏度为 -106 dBm,且无人机装备了全向天线用于通信。其中,理论结果通过公式推导得出,仿真结果基于蒙特卡罗方法,通过 1 000 次仿真得到。以地面基站和无人机的覆盖概率以及系统的覆盖概率作为性能指标,分析无人机高度 H 、新增用户密度 λ_a 、路径损耗系数 α_g 对网络性能的影响。系统参数在表 1 中给出。

表 1 系统参数		
Tab. 1 System parameters		
物理意义	参数	数值
地面基站覆盖半径	R_g/m	60
无人机覆盖半径	R_u/m	30,40,50
地面路径损耗系数	α_g	4
空地路径损耗系数	α_u	2,3,4
无人机高度	H/m	20 - 100
AWGN 功率	σ^2/dBm	-110
用户发射功率	P/W	0.1
地面基站密度	λ_g/km^{-3}	1.5×10^{-5}
新增用户密度	λ_u/km^{-3}	2×10^{-5} ,
		3×10^{-5} ,
		4×10^{-5} ,
		5×10^{-5}
无人机密度	λ_u/km^{-3}	$0-4\times10^{-4}$
地面基站阈值	γ_g/dB	-40 -20
无人机阈值	γ_u/dB	-40 -20

图 3 给出了不同无人机高度对无人机、地面基站和系统覆盖性能的影响。从图中可以看出,理论与仿真结果一致。由图 3(a)可见,在 SINR 阈值超过一定数值时,随着无人机高度的增加无人机覆盖性能下降。这是因为当无人机高度增大时,新增用户距离其服务无人机越来越远,导致无人机服务的

新增用户成功传输概率降低,无人机覆盖性能下降。由图 3(b)可见,无人机高度增加会使系统覆盖性能降低,这是因为无人机覆盖性能的降低导致系统覆盖性能降低。PPDC 策略下的系统覆盖性能要优于传统 PPP 策略,这是因为当无人机部署没有距离约束时,无人机覆盖区域会存在重叠,其他无人机覆盖范围内的新增用户距离典型无人机较近,干扰增大。

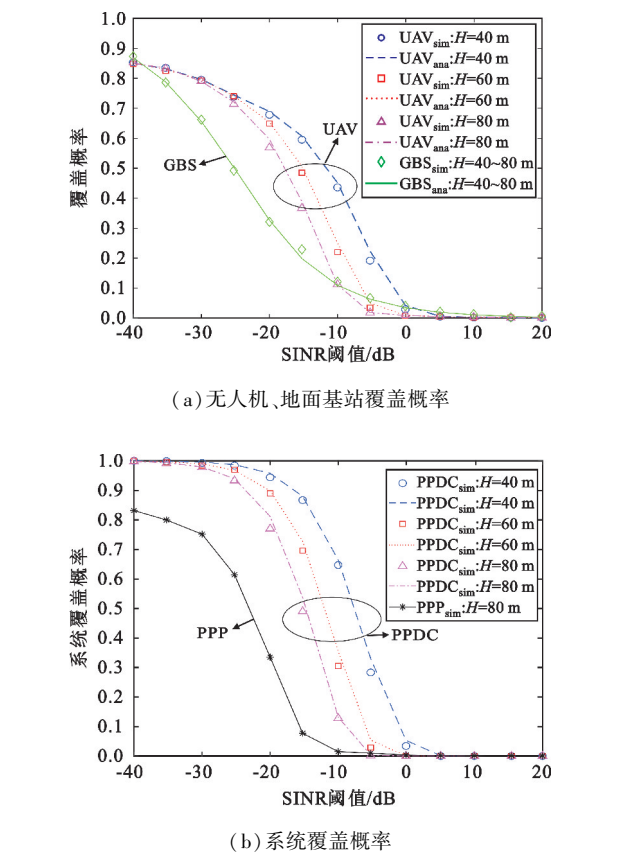
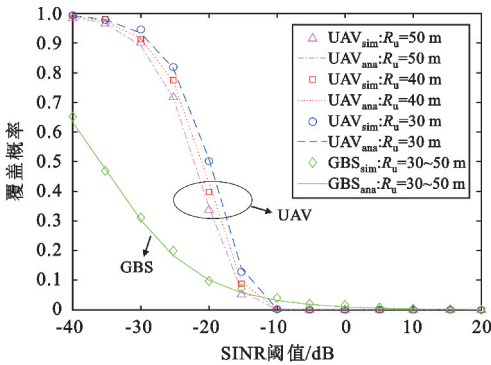
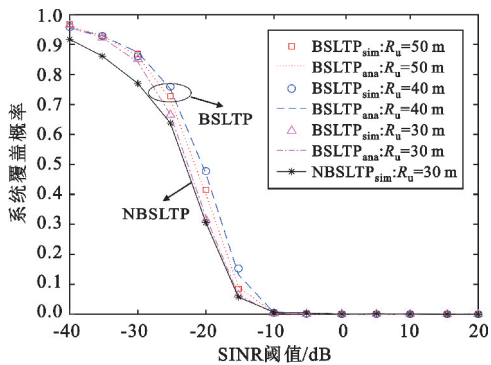


图 3 不同无人机高度下的无人机、地面基站以及系统覆盖概率
Fig. 3 Coverage probability of UAV, GBS and system under different UAV altitude

图 4 给出了不同无人机覆盖半径对无人机、地面基站和系统覆盖性能的影响。由图 4(a)可见,无人机的覆盖性能随着无人机覆盖半径的增加而下。这是因为当无人机覆盖半径增大时,新增用户距离其服务无人机距离变远,导致无人机服务的新增用户成功传输概率降低,无人机覆盖性能下降。由图 4(b)可见,引入 BSLTP 协议,系统覆盖性能得到提升。这是因为当基站为不限数量的用户提供服务时,势必要增大其覆盖范围内其他用户对目标通信用户的干扰,基站覆盖性能的下降,从而系统覆盖性能降低。



(a) 无人机、地面基站覆盖概率



(b) 系统覆盖概率

图 4 不同基站覆盖半径下无人机、地面基站以及系统覆盖概率

Fig. 4 Coverage probabilities of UAV, GBS and systems under different base station coverage radii

图 5 给出了不同新增用户密度和无人机高度对系统覆盖概率的影响。随着 H 增加,系统覆盖概率下降。这是由于本文假设无人机高度与无人机覆盖半径的比值为定值,从图 4(a) 中可知,无人机覆盖概率随着无人机覆盖半径的增大而下降,因此 H 增大,无人机覆盖概率降低,系统覆盖概率也随之降低。此外,可以从图中得出,随着新增用户的密度的增加,系统覆盖概率下降。

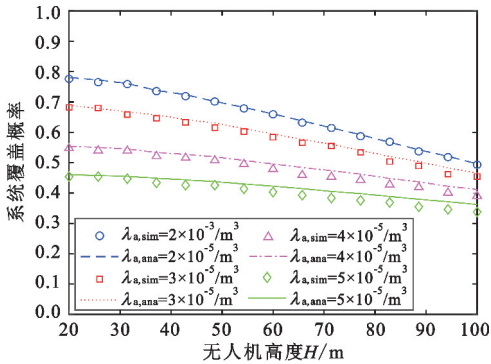


图 5 新增用户密度对系统覆盖概率的影响

Fig. 5 Influence of new user density on system coverage probability

图 6 给出了在固定地面用户发射功率的情况下,不同空地路径损耗系数对系统覆盖性能的影响。从图 6 中可以看出,减小空地路径损耗系数,使得有效传输信号强度增强,同时也增强了相邻无人机覆盖范围内用户的信号干扰强度,因此系统覆盖性能降低。

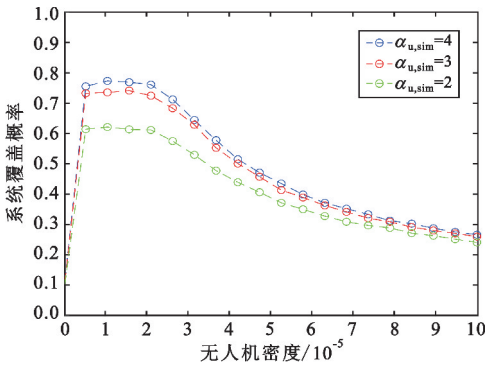


图 6 空地路径损耗对系统覆盖概率的影响

Fig. 6 Influence of path loss between air and ground on system coverage probability

4 结束语

本文针对无人机辅助用户激增应急通信场景的问题,考虑到无人机的随机部署会产生覆盖区域的重叠,提出了一种基于距离约束的用户自适应接入方案。在泊松点距离约束策略下,引入了控制连接基站用户数量的 BSLTP 协议,在用户激增的情况下,当连接到基站的用户数量超过给定阈值时,剩余用户就由无人机提供服务,以解决基站超载问题。理论分析和仿真结果验证了所提 PPDC 策略以及 BSLTP 协议下的网络覆盖性能得到了有效提升。本文所提方案对于无人机辅助地面网络中覆盖性能提升的研究有一定的参考意义。

下一步研究将重点关注移动无人机应急场景中的部署,对无人机辅助地面网络的性能进行更有效的提升。

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] 钟剑峰,王红军. 基于 5G 和无人机智能组网的应急通信技术 [J]. 电讯技术, 2020, 60(11) :1290-1296.

[3] GUPTA N, AGARWAL S, MISHRA D. UAV deployment for throughput maximization in a UAV-assisted cellular

communications[C]//Proceedings of 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Helsinki: IEEE, 2021: 1055–1060.

[4] WANG L, ZHANG H, GUO S, YUAN D. Deployment and association of multiple UAVs in UAV-assisted cellular networks with the knowledge of statistical user position [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6553–6567.

[5] MEI W, ZHANG R. UAV-sensing-assisted cellular interference coordination: a cognitive radio approach [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 799–803.

[6] BOSCHIERO M, GIORDANI M, POLESE M, et al. Coverage analysis of UAVs in millimeter wave networks: a stochastic geometry approach [C]//Proceedings of 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing. Limassol: IEEE, 2020: 351–357.

[7] RIHAN M, SELIM M M, XU C, et al. D2D communication underlaying UAV on multiple bands in disaster area: stochastic geometry analysis [J]. IEEE Access, 2019, 7: 156646–156658.

[8] ZHANG S, LIU J, SUN W. Stochastic geometric analysis of multiple unmanned aerial vehicle-assisted communications over Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5446–5460.

[9] MOULIN F D S, WIAME C, OESTGES C, et al. Stochastic geometry-based modelling of mobile uav relay networks under realistic fading [C]//Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference. Helsinki: IEEE, 2021: 1–7.

[10] ARMENIAKOS C K, BITHAS P S, KANATAS A G. SIR analysis in 3D UAV networks: a stochastic geometry approach [J]. IEEE Access, 2020, 8: 204963–204973.

[11] SHUKLA S, THAKUR R, AGARWAL S. Particle swarm optimization algorithms for altitude and transmit power adjustments in uav-assisted cellular networks [C]//Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference. Helsinki: IEEE, 2021: 1–6.

[12] 姚媛媛, 乌云嘎, 董瑶瑶, 等. 距离约束分簇策略下无人机群空地组网性能分析 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 951–959.

[13] YAO Y Y, WU Y G, ZHU Z Y, et al. Modeling and performance analysis in UAV-assisted cellular networks with clustered edge users [J]. Electronics, 2022, 11(5): 828–839.

[14] SONG X, YIN C, LIU D. Spatial throughput characterization in cognitive radio networks with primary receiver assisted carrier sensing based opportunistic spectrum access [C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Austin: IEEE, 2014: 1065–1070.

作者简介:

乌云嘎 女, 1998 年生于内蒙古呼伦贝尔, 2020 年获工学学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为无人机通信技术、无线通信关键技术等。

姚媛媛 女, 1988 年生于河南郑州, 2017 年获博士学位, 现为副教授, 主要研究方向为无线通信关键技术、无人机通信技术、智能超表面辅助通信等。

潘春雨 女, 1989 年生于河南新野, 2019 年获博士学位, 现为副教授, 主要研究方向为基于人工智能的移动通信网络、计算与资源管理技术、无人机通信技术等。

岳新伟 男, 1985 年生于河南虞城, 2018 年获博士学位, 现为副教授, 主要研究方向为无线通信关键技术、NOMA 技术、智能超表面辅助通信等。

李学华 女, 1977 年生于湖北荆州, 2008 年获博士学位, 现为教授, 主要研究方向为无线通信关键技术、物联网技术、智能边缘计算等。