

面向高动态应急场景的通导一体化网络快速部署方法

徐连明¹, 朱文迪², 王莉², 刘振宇^{2,3}, 张雨豪²

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学计算机学院 (国家示范性软件学院), 北京 100876;
3. 萨里大学 6G 创新中心, 萨里郡 吉尔福德 GU1 4AJ)

摘要: 针对应急现场人员移动和障碍物遮挡引发的网络通信速率与定位精度下降的问题, 聚焦无人机动态应急网络部署, 设计了通导耦合的伴随质量指标, 提出了面向通导一体化网络的非视距规避-虚拟力算法。具体来说, 设计了基于通信需求与定位需求梯度方向的虚拟引力建模方法, 实现加权通导需求驱动的无人机位置动态调整。在此基础上, 为了规避山体等障碍物遮挡导致的强衰落非视距链路, 设计了非视距链路规避的虚拟引力建模方法, 通过消除强衰落链路提升应急网络服务质量。所提非视距规避-虚拟力算法有效提升了动态场景下用户的通导效用与服务覆盖率, 并支持无人机动态部署方案的亚秒级快速输出。

关键词: 应急通信; 无人机网络动态部署; 通导一体化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025079

Rapid deployment method of integrated localization and communication network for high dynamic emergency scenarios

XU Lianming¹, ZHU Wendi², WANG Li², LIU Zhenyu^{2,3}, ZHANG Yuhao²

1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
2. School of Computer Science (National Pilot Software Engineering School), Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
3. 6G Innovation Centre, University of Surrey, Guildford GU1 4AJ, UK

Abstract: To address the decline in network communication rates and localization accuracy caused by personnel mobility and obstacle-induced obstructions, a dynamic emergency network deployment based on unmanned aerial vehicles (UAV) was investigated. An accompanying quality indicator (AQI) coupling the utilities of communication and localization was designed, and a non-line-of-sight (NLoS) avoidance-virtual force (NA-VF) algorithm for integrated localization and communication network was proposed. Specifically, a virtual attractive force modeling method based on the gradient directions of communication and localization demands was designed, enabling dynamic UAV position adjustments driven by weighted communication and localization requirements. Additionally, to mitigate severe fading effects of NLoS links caused by obstacles such as mountains, a virtual attractive force modelling method for NLoS link avoidance was proposed, improving the service quality of the emergency network by eliminating severe fading links. The proposed NA-VF algorithm significantly enhances the utilities of communication and localization and the service coverage rates for users in dynamic scenarios, while supporting sub-second UAV deployment.

Keywords: emergency communication, dynamic deployment of UAV network, integrated localization and communication

收稿日期: 2024-11-07; 修回日期: 2025-03-29

通信作者: 王莉, liwang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171054, No.62201089); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFC1511801); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.24820232023YQTD01); 国网冀北电力有限公司科技基金资助项目 (No.52018E230001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62171054, No.62201089), The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFC1511801), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.24820232023YQTD01), The State Grid Jibei Electric Power Company R&D Project (No.52018E230001)

0 引言

我国是世界上受自然灾害、事故灾难影响最为严重的国家之一。在自然灾害处置、事故灾难救援等突发公共事件中,救援人员往往面临“三断”(断路、断电、断网)场景:道路不畅,电力不足,移动通信基础设施缺失/损毁,同时,卫星导航信号由于建筑、山林遮挡,且Ku、Ka频段信号受雨天影响严重,容易发生卫星信号拒止现象。恶劣环境下应急通导保障能力严重不足,导致无法开展有效救援,亟须加强应急指挥通导保障能力建设。

在应急救援行动的各个阶段,对于通信、定位服务的需求不同。例如,灾情侦察阶段,需要为前线侦察视频回传业务提供大带宽通信支撑;在救援处置阶段,需要重点保障受灾区域位置信息感知,文本、语音、图像等关键指挥数据的稳定上传下达^[1]。传统应急救援依靠卫星信号定位,同时依靠经验架设固定基站,以保障前突救援人员的通信覆盖。然而,应急救援现场通常环境复杂,信号受遮挡严重,存在信号盲区,并且应急救援任务中,救援人员位置变化快,容易超出信号覆盖范围或进入信号盲区。传统方案往往不能为救援人员提供稳定的通信、定位保障,导致失联、失踪事件常有发生。

在国内外应急处置和保障中,无人机凭借其灵活性,常作为载体搭载应急通信基站,同时基于通导一体化信号测距定位,构建应急指挥通导一体化网络,保障灾区通信与定位服务覆盖。在应急领域使用较多的无人机有大型长航时固定翼无人机、系留无人机和小型化旋翼/固定翼无人机。大型长航时固定翼无人机滞空时间长、载荷大、飞行高度高,可提供大范围、长时间灾区通导保障,但因维护成本高,起飞区域受限,导致普及程度低,跨省调度容易错过救援的黄金时间;系留无人机同样具备长时间滞空的优点、载荷适中,但由于其地面线缆供电特性,飞行高度低,且移动受限,无法实现大范围、动态应急通导保障的需要;小型化旋翼/固定翼无人机滞空时间较短、载荷小、飞行高度高,但成本和起落限制低,随着无人机技术的成熟和基站的小型化,便携基站可挂载在小型化旋翼/固定翼无人机上,灵活提供应急通导服务,应用前景广阔。然而,便携基

站功率有限,覆盖能力不足,且应急场景用户通导需求多变,位置动态性强。因此,如何部署调度装配便携基站的小型化旋翼/固定翼无人机快速构建通导一体化的智能应急指挥通信网络是近年来研究者们重点关注的领域。

应急现场时间紧迫,需求多元,人员动态性强,对于部署决策有着较高的实时性要求。文献[2-4]研究了面向高能效与高时效感知数据采集等目标的无人机路径规划方法。文献[5]以最大化分级通信服务质量为目标,提出了一种新颖的粒子群惯性权重更新方法以优化无人机部署位置。文献[6]以最小化平方定位误差下界为目标,利用遗传算法求解卫星辅助下的无人机定位拓扑设计和飞行轨迹优化。文献[7]在维持编队控制刚性下以最小化位置估计的最大克拉美罗下界为目标,提出了一种高效的基于差分进化的方法来寻找无人机部署的次优解。文献[8]以最大化网络通导服务时间为目标,提出了一种精英导向的增强遗传算法以优化无人机网络拓扑。文献[9-11]分别采用多智能体强化学习,混合深度强化学习与联邦深度强化学习通过调整无人机部署位置与资源分配,优化网络吞吐量与能耗。

然而,现有基于启发式算法的无人机调度方法由于需要使用大量的随机与迭代搜索来提升网络性能,通常面临计算复杂度较高,部署方案输出慢的问题。现有基于深度学习、强化学习的方法,模型线下训练复杂,实际应用决策速度快,但场景泛化性差,应急现场环境条件变化会显著影响当前模型的决策质量,且无法及时现场训练/更新模型。以上方案均无法满足应急场景的高效调度和稳定通导服务覆盖需求。

为了在保障应急场景泛化性的同时满足快速部署决策需求,研究者们提出了一系列基于虚拟力(VF, virtual force)的无人机部署算法,通过将无人机抽象为势力场中的粒子,基于优化目标建立引力和斥力,使无人机在合力的作用下进行移动,从而实现快速、实时的动态部署。例如,文献[12-13]将无人机的通信覆盖问题建模为距离平方倒数映射的虚拟力模型,在低时间复杂度下,最小化无人机数量的同时最大化每架无人机之间的负载均衡。文献[14]将用户密度分布映射为虚拟引力,优化无人机水平位置,再基于粒子群算法优化高度,以提高

网络总吞吐量。

然而, 现有虚拟力模型仅考虑通信部署, 建模缺乏具体物理意义, 导致无法准确收敛到局部最优解。同时, 评价指标无法准确度量动态网络下的通信和定位服务质量。此外, 应急场景环境复杂, 常存在山体遮挡等非视距 (NLoS, non-line-of-sight) 链路, 导致应急网络通航性能下降。现有研究大多仅考虑针对障碍物的避撞, 没有考虑在多无人机组网中, 如何规避山体等障碍物导致的非视距链路以提升应急通信和定位服务质量。因此, 如何面向动态场景通航融合的部署需求, 设计具有非视距链路规避能力的低复杂度动态应急网络快速部署方法仍有待深入研究。

针对应急现场人员动态性强、部署时效性要求高和非视距链路引发的网络通信速率与定位精度下降的问题, 本文提出了一种非视距规避-虚拟力 (NA-VF, NLoS avoidance-virtual force) 算法, 有效提升了动态场景下机动网络的伴随质量, 并支持无人机部署方案的亚秒级快速输出。本文具体创新性内容如下。

1) 提出了通航耦合的伴随质量指标 (AQI, accompanying quality indicator), 考虑包含通信与定位服务覆盖率的通航加权效用。

2) 设计了基于通信需求与定位需求梯度方向的虚拟引力建模方法, 通过零阶优化估计加权通航效用梯度, 提升算法收敛质量。

3) 设计了非视距链路规避的虚拟引力建模方法, 规避山体等障碍物遮挡导致的强衰落非视距链路, 提升网络的通航伴随质量。

1 系统模型

在应急场景中, 公网缺失、卫星拒止、环境复杂, 常利用搭载通航一体基站设备的无人机构建应急指挥通信网络, 以保障应急救援中的通信、定位需求。在基站退服区域, 部署无人机作为空中基站为用户提供通信服务。在地面卫星拒止区域, 利用无人机的高度优势, 获取位置信息, 并作为锚节点为用户提供协作定位服务, 如图 1 所示。由于应急场景更注重服务覆盖率, 且存在环境差异性、救援救灾需求多样性, 需选择适配的通航能力量化指标衡量网络的伴随质量, 保障通信、定位服务精准盲。本节将介绍基本通航能力量化方式与通航耦合的伴随质量指标。

定义用户集合为 $\mathcal{U} = \{1, \dots, u, \dots, |\mathcal{U}|\}$ 。假设所有用户位于地面水平面, 需要应急网络提供通信与定位服务。用户 u 的坐标为 $\mathbf{u}_u = [x_u, y_u, 0]$ 。定义无人机集合为 $\mathcal{M} = \{1, \dots, m, \dots, |\mathcal{M}|\}$ 。假设所有无人机位于同一高度, 定义无人机 m 的坐标为 $\mathbf{s}_m = [x_m, y_m, h]$ 。每架无人机可以在自身能力范围内同时提供通航服务, 组网模式为长期演进技术 (LTE, long term evolution) 组网。定义障碍物 $\mathcal{O} = \{\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2\}$ 为线段状山脊障碍物的两 endpoints。

1.1 通信指标

本文采用无人机基站与用户的下行通信链路可达速率作为用户的通信指标。无人机基站与用户之间的信号传输采用林区信道模型中的倾斜信道模型。在倾斜信道模型中, 无人机基站与用户之间的总路径损耗由对数距离损耗、阴影衰落和林区中的

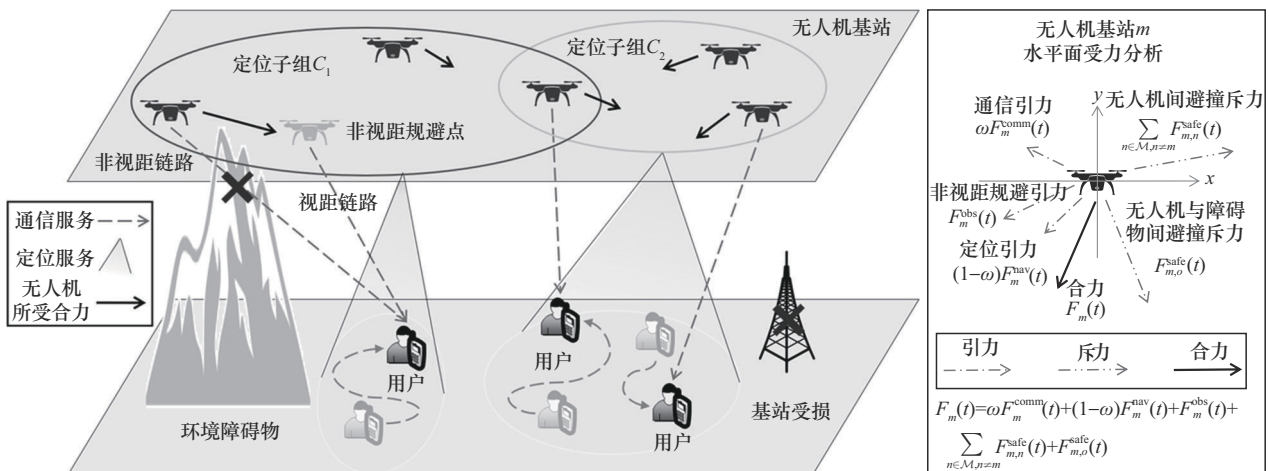


图 1 面向高动态应急场景的通航一体化网络快速部署场景

额外损耗组成。定义无人机 m 与用户 u 之间的总路径损耗为 $L_{m,u}$ (dB), 根据国际电信联盟的植被衰减标准 (ITU-R Recommendation P.833-9) [15] 有

$$L_{m,u} = L^{\text{FSPL}}(d_0) + 10\beta \lg\left(\frac{d_{m,u}}{d_0}\right) + X_\delta + L_{m,u}^{\text{Slant}} \quad (1)$$

其中, d_0 为参考距离, $d_{m,u} = \|\mathbf{s}_m - \mathbf{u}_u\|$ 为无人机和用户间的距离, β 表示路径损耗指数, X_δ 表征信道中阴影衰落的影响, 服从均值为 0、标准差为 δ 的高斯分布, $L^{\text{FSPL}}(d_0)$ 为自由空间路径损耗, 可以表示为

$$L^{\text{FSPL}}(d_0) = 20 \lg\left(\frac{4\pi f d_0}{c}\right) \quad (2)$$

其中, f 、 c 分别表示载波频率与光速。 $L_{m,u}^{\text{Slant}}$ 表示无人机 m 与用户 u 之间的林区额外损耗, 可以表示为

$$L_{m,u}^{\text{Slant}} = A(f \cdot 10^{-6})^B \text{dep}_{m,u}^C (\theta_{m,u} + E)^G \quad (3)$$

其中, A 、 B 、 C 、 E 与 G 为环境参数, $\theta_{m,u}$ 为无人机 m 相对用户 u 的仰角, $\text{dep}_{m,u}$ 为无人机 m 与用户 u 之间的植被路径长度, 可以用植被高度 h_{tree} 和 $\theta_{m,u}$ 表示

$$\text{dep}_{m,u} = \frac{h_{\text{tree}}}{\sin \theta_{m,u}} \quad (4)$$

当无人机与地面用户之间被山体遮挡时, 对于微波频段的跨山通信, 散射传播损耗将显著增加[16]。因此, 本文假定无人机和用户间的通信链路在山体遮挡的情况下会引入额外路径损耗 L^{obs} , 需要进行非视距规避以恢复通信质量。

对于应急通信覆盖, 无人机 m 与用户 u 间信噪比为

$$\gamma_{m,u} = \frac{p_m}{10^{\frac{L_{m,u} + W}{10}}} \quad (5)$$

其中, p_m 为无人机 m 的发射功率, W (dB) 为噪声功率。当信噪比满足 $\gamma_{m,u} \geq \gamma_{\text{comm}}^{\text{th}}$ 时, 则无人机 m 可为用户 u 提供通信服务。同时, 定义二元变量 $\alpha_{m,u}^{\text{comm}}$ 表示无人机 m 是否计划为用户 u 提供通信服务, 即

$$\alpha_{m,u}^{\text{comm}} = \begin{cases} 1, \text{无人机 } m \text{ 为用户 } u \text{ 提供通信服务} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

定义 B_m 为无人机 m 的通信带宽, 采用时分多址接入用户, 无人机 m 与用户 u 间通信链路可达速

率为

$$R_{m,u} = \frac{1}{\sum_{u=1}^{|U|} \alpha_{m,u}^{\text{comm}}} B_m \text{lb}(1 + \gamma_{m,u}) \quad (7)$$

1.2 定位指标

本文采用以无人机基站为锚点的到达时间 (TOA, time of arrival) 定位技术定位, 以定位误差的克拉美罗界 (CRLB, Cramer-Rao lower bound) 作为用户的定位指标[17]。假定无人机由于其高海拔高灵活性的特点, 可通过卫星定位系统获得精确位置信息并进行时间同步校准。对于定位地面节点的水平面坐标, 至少需要 3 架无人机进行协同定位。当无人机 m 与用户 u 间信噪比满足 $\gamma_{m,u} \geq \gamma_{\text{nav}}^{\text{th}}$ 时, 则无人机 m 可为用户 u 提供定位服务。定义二元变量 $\alpha_{m,u}^{\text{nav}}$ 表示无人机 m 是否计划为用户 u 提供定位服务, 即

$$\alpha_{m,u}^{\text{nav}} = \begin{cases} 1, \text{无人机 } m \text{ 为用户 } u \text{ 提供定位服务} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

接下来, 定义包含所有 3 架无人机的集合为 $\mathcal{K} = \{\mathcal{C}_1, \dots, \mathcal{C}_k, \dots, \mathcal{C}_K\}$, 无人机定位子组总数为 K , \mathcal{C}_k 为第 k 个无人机子组, 表示为 $\mathcal{C}_k = \{k_0, k_1, k_2\}$, 其中, k_0 、 k_1 和 k_2 分别表示 3 架无人机, 定义矩阵

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} x_{k_0} - x_{k_1} & y_{k_0} - y_{k_1} \\ x_{k_0} - x_{k_2} & y_{k_0} - y_{k_2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

当待定位用户位置可解时, \mathbf{A}_k 需为满秩矩阵, 即 $\text{rank}(\mathbf{A}_k) = 2$ 。定义用户 u 的候选无人机子组 \mathcal{K}_u 为

$$\mathcal{K}_u = \left\{ \mathcal{C}_k \mid \text{rank}(\mathbf{A}_k) = 2 \text{ 且 } \sum_{m \in \mathcal{C}_k} \alpha_{m,u}^{\text{nav}} = 3, \forall \mathcal{C}_k \subset \mathcal{K} \right\} \quad (10)$$

假定服务于用户 $\mathbf{u}_u = [x_u, y_u, 0]$ 的定位无人机子组为第 k 个子组 $\mathcal{C}_k = \{k_0, k_1, k_2\}$, 由于用户高度已知, 基于 TOA 定位技术测距模型可以推导在三维环境下, 用户 u 水平方向定位误差的 CRLB 为

$$J_u = \sum_{i=1}^2 \mathbf{F}_u^{-1}(i, i) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{F}_u^{-1} = (\mathbf{Q}_u^T \mathbf{R}_u^{-1} \mathbf{Q}_u)^{-1}$ 为费希尔 (Fisher) 信息矩阵的逆, $\mathbf{R}_u = c^2 \text{diag}(\text{Var}_{k_0,u}, \text{Var}_{k_1,u}, \text{Var}_{k_2,u})$ 为测距误差的协方差矩阵。其中, 采用导频对信号到

达时间进行测量,随着信噪比(SNR, signal to noise ratio)的降低,测量误差的标准差 $\sqrt{\text{Var}_{m,u}}$ 呈增大趋势^[18-19]。

$$\sqrt{\text{Var}_{m,u}} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi\sqrt{\gamma_{m,u}}B_m} \quad (12)$$

此外, Fisher 信息矩阵中, \mathbf{Q}_u 为

$$\mathbf{Q}_u = \begin{bmatrix} \frac{x_u - x_{k_0}}{d_{k_0}} & \frac{y_u - y_{k_0}}{d_{k_0}} & \frac{-h}{d_{k_0}} \\ \frac{x_u - x_{k_1}}{d_{k_1}} & \frac{y_u - y_{k_1}}{d_{k_1}} & \frac{-h}{d_{k_1}} \\ \frac{x_u - x_{k_2}}{d_{k_2}} & \frac{y_u - y_{k_2}}{d_{k_2}} & \frac{-h}{d_{k_2}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $d_{k_l} = \|\mathbf{s}_{k_l} - \mathbf{u}_u\|, l \in \{0,1,2\}$ 为第 k_l 架无人机与用户 u 的距离。

1.3 伴随质量指标

网络伴随质量指标为网络通信效用与网络定位效用的加权和。具体来说,将观察时隙分为 T 个时隙,用集合表示为 $\mathcal{T} = \{1, \dots, t, \dots, T\}$ 。考虑应急场景为用户提供通信与定位服务覆盖的需求。定义达到通信服务阈值 $R_{\text{comm}}^{\text{th}}$ 的用户数量为

$$N_{\text{comm}}^{\text{val}}(t) = \sum_{u=1}^{|\mathcal{U}|} \sum_{m=1}^{|\mathcal{M}|} \alpha_{m,u}^{\text{comm}} \max(\text{sgn}(R_{m,u}(t) - R_{\text{comm}}^{\text{th}}), 0) \quad (14)$$

定义达到定位服务阈值 $J_{\text{nav}}^{\text{th}}$ 的用户数量为

$$N_{\text{nav}}^{\text{val}}(t) = \sum_{u=1}^{|\mathcal{U}|} \max(\text{sgn}(J_{\text{nav}}^{\text{th}} - J_u(t)), 0) \quad (15)$$

因此, t 时刻的通信服务率 $\text{serv}_{\text{comm}}(t) = \frac{1}{|\mathcal{U}|} N_{\text{comm}}^{\text{val}}(t)$ 和定位服务率 $\text{serv}_{\text{nav}}(t) = \frac{1}{|\mathcal{U}|} N_{\text{nav}}^{\text{val}}(t)$ 分别表示能够接受通信和定位服务的用户数量和总用户数量的比值。

本文使用所有用户在时刻 t 的平均可达通信速率加上加权通信服务率,即

$$U_{\text{comm}}(t) = \frac{1}{|\mathcal{U}|} \sum_{u=1}^{|\mathcal{U}|} \sum_{m=1}^{|\mathcal{M}|} \alpha_{m,u}^{\text{comm}} R_{m,u}(t) + \gamma \text{serv}_{\text{comm}}(t) \quad (16)$$

表征网络的通信效用。使用所有用户在时刻 t 的定位误差的平均 CRLB 加上加权定位服务率,即

$$U_{\text{nav}}(t) = -\frac{1}{|\mathcal{U}|} \sum_{u=1}^{|\mathcal{U}|} J_u(t) + \gamma \text{serv}_{\text{nav}}(t) \quad (17)$$

表征网络的定位效用。定义时刻 t 网络的伴随质量指标为

$$\text{AQI}(t) = \omega U_{\text{comm}}(t) + (1 - \omega) U_{\text{nav}}(t) \quad (18)$$

其中, $\omega \in [0,1]$ 用于平衡网络通信性能与网络定位性能的权重。

2 问题建模

本文定义了网络的伴随质量指标,以最大化服务时间内的网络伴随质量为优化目标,以通导服务连接、通信接入上限、飞行安全距离和飞行范围等为约束条件,联合优化无人机部署位置以及无人机与通导用户的关联。

具体来说,无人机基站 m 两次部署的移动距离需小于最大值 d_m^{max} , 即

$$\|\mathbf{s}_m(t+1) - \mathbf{s}_m(t)\| \leq d_m^{\text{max}} \quad (19)$$

同时,在任意时刻 t , 无人机间的距离需不小于安全距离 d_m^{safe} , 表示为

$$\|\mathbf{s}_m(t) - \mathbf{s}_n(t)\| \geq d_m^{\text{safe}} \quad (20)$$

无人机基站 m 将会受到当前时刻障碍物上距离其最近的点 $\mathbf{o}_m(t)$ 的斥力作用,无人机与障碍物间的距离不小于安全距离 d_o^{safe} , 表示为

$$\|\mathbf{s}_m(t) - \mathbf{o}_m(t)\| \geq d_o^{\text{safe}} \quad (21)$$

对于地面用户,假定其在一定范围的受灾区域内进行匀速运动,每 t_u^{step} 个时隙的速度相同,并使用随机运动模型来描述用户移动方向的切换。由于地面用户的移动速度有限,用户 u 在任一时段内移动距离需小于最大值 d_u^{max} , 即

$$\|\mathbf{u}_u(t+1) - \mathbf{u}_u(t)\| \leq d_u^{\text{max}} \quad (22)$$

综上所述,该通导一体化网络部署问题建模为

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mathcal{S}(t)\}, \{\mathcal{A}(t)\}} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{AQI}(t) \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \sum_{m \in \mathcal{M}} \alpha_{m,u}^{\text{comm}}(t) = 1, \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T} \\ & \text{C2: } \sum_{m \in \mathcal{M}} \alpha_{m,u}^{\text{nav}}(t) = 3, \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T} \\ & \text{C3: } \sum_{u \in \mathcal{U}} \alpha_{m,u}^{\text{comm}}(t) \leq \text{th}_{\text{max}}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall t \in \mathcal{T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{C4: } & \|s_m(t+1) - s_m(t)\| \leq d_m^{\max}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall t \in \mathcal{T} \\
\text{C5: } & \|s_m(t) - s_n(t)\| \geq d_m^{\text{safe}}, \forall m, n \in \mathcal{M}, m \neq n, \forall t \in \mathcal{T} \\
\text{C6: } & \|s_m(t) - o_i(t)\| \geq d_o^{\text{safe}}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall o_i \in \mathcal{O}, \forall t \in \mathcal{T} \\
\text{C7: } & \|u_u(t+1) - u_u(t)\| \leq d_u^{\max}, \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T} \\
\text{C8: } & x_u(t) \in [-L_x^u, L_x^u], y_u(t) \in [-L_y^u, L_y^u], \\
& \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T} \\
\text{C9: } & x_m(t) \in [-L_x^m, L_x^m], y_m(t) \in [-L_y^m, L_y^m], \\
& \forall m \in \mathcal{M}, \forall t \in \mathcal{T}
\end{aligned} \quad (23)$$

其中, 优化目标 $\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{AQI}(t)$ 为网络的时段 AQI; 优化变量 $\{\mathcal{S}(t)\}$ 为 t 时刻无人机部署位置集合, 优化变量 $\{\mathcal{A}(t)\} = \{\alpha_{m,u}^{\text{comm}}(t), \alpha_{m,u}^{\text{nav}}(t)\}$ 为 t 时刻无人机为用户提供通信与定位服务的匹配关系; 约束条件 C1 表示需关联一架候选无人机为用户提供通信网络接入; 约束条件 C2 表示需关联 3 架候选无人机为用户提供定位服务; 约束条件 C3 限定了单个无人机基站的最大通信接入用户数量; 约束条件 C4 表示无人机的飞行能力约束, 相邻两时刻部署的间隔距离应不大于最大值 d_m^{\max} ; 约束条件 C5 表示任意时刻任意 2 架无人机的距离需要不小于安全距离 d_m^{safe} , 以防发生碰撞; 约束条件 C6 表示任意时刻无人机与障碍物之间的距离需要不小于安全避障距离 d_o^{safe} ; 约束条件 C7 表征了地面用户有限时间内的移动能力约束; 约束条件 C8 和 C9 表征了用户和无人机的活动范围。

3 非视距规避-虚拟力算法

对于上述优化问题, 传统的应急网络部署方法通常采用基于启发式算法的集中式求解方法, 这些方法通常需要生成大量随机样本并择优迭代, 同时需要通过匹配将前后部署位置进行时间上的移动轨迹关联, 在实际应用中通常面临着计算复杂度高和空间连续性差等问题, 难以满足应急现场临时无人机网络快速高效部署的需求。为了实现应急网络的高效部署, 本文设计了非视距规避-虚拟力算法。该算法的基本思想是通过构造目标驱动的引力场和避障的斥力场共同作用的虚拟力场, 动态更新无人机与用户通导服务匹配关系, 搜索目标势函数的提升方向来寻找最优路径, 使基站可以沿虚拟合力方向动态调整位置。

为了实现通导一体化的应急网络覆盖, 本文将

每架无人机基站的运动建模为 5 种虚拟力影响的结果: 1) 用户对无人机基站的通信虚拟引力, 该引力将吸引无人机基站向所匹配用户分布更密集的区域靠拢, 从而达到提升平均通信速率的目的; 2) 用户对无人机基站的定位虚拟引力, 该引力将吸引各自定位子组中的无人机基站向平均定位误差 CRLB 方向减小的方向移动, 从而达到提升平均定位精度的目的; 3) 无人机基站的非视距链路规避虚拟引力, 该引力将吸引无人机基站向可以规避非视距链路的位置移动, 从而提升无线链路质量; 4) 无人机基站之间的虚拟斥力, 该斥力可以避免无人机之间的相对距离过近带来的碰撞等安全问题, 同时能够在运动调整的过程中避免基站的覆盖范围有较大重叠浪费; 5) 无人机基站与障碍物之间的虚拟斥力, 该斥力可以避免基站与障碍物碰撞。

3.1 通导需求虚拟引力建模

本节将介绍通导需求虚拟引力的建模及无人机与用户通导服务匹配关系更新策略。如图 1 所示, 通导需求虚拟引力的作用是将无人机牵引向其匹配的用户以保障通信服务质量。该力的设计主要对应于优化目标中的网络通信效用, 因此将通导需求虚拟引力建模为当前匹配关系下零阶优化求得的局部网络通信效用的梯度方向。然而, 原通信效用在服务用户前后效用突变且不具有梯度变化, 无法有效引导用户服务率与平均速率的提升。因此, 针对通信优化目标, 构建异梯度的连续单调通导需求虚拟引力效用

$$U_{F_comm}^{m,u}(t) = \begin{cases} R_{m,u}(t) & , R_{m,u}(t) < 0.1R_{comm}^{\text{th}} \\ \left(1 + \frac{\gamma}{R_{comm}^{\text{th}}}\right) R_{m,u}, 0.1R_{comm}^{\text{th}} \leq R_{m,u}(t) \leq 1.1R_{comm}^{\text{th}} \\ R_{m,u}(t) + \gamma & , R_{m,u}(t) > 1.1R_{comm}^{\text{th}} \end{cases} \quad (24)$$

其中, 通过设计阈值下限, 避免在无人机接近力平衡状态时被当前难以服务的用户无效拉扯; 在区间中有潜力且未达到通信服务阈值的用户, 依据通信效用, 产生更大的引力; 通过预留超出 10% 的阈值上限, 避免虚拟力在阈值处来回拉扯导致乒乓效应。无人机基站 m 受到所匹配用户的虚拟通信引力表示为

$$\mathbf{F}_m^{\text{comm}}(t) = K_1 \sum_{u \in \mathcal{U}} \alpha_{m,u}^{\text{comm}}(t) \left(\frac{\partial U_{F_comm}^{m,u}(t)}{\partial x}, \frac{\partial U_{F_comm}^{m,u}(t)}{\partial y} \right) \quad (25)$$

其中, K_1 为通导引力系数, $\alpha_{m,u}^{\text{comm}}(t)$ 为 t 时刻无人机 m 与用户的通信匹配关系, 该匹配关系随着无人机和用户的移动而变化。采用贪婪策略初始化匹配, 随后用户 u 在每个时刻都会探查和其他无人机的链路情况, 如果发现新的最优链路速率较当前链路速率提升超过 20%, 则有 70% 的概率切换通信匹配关系。设置切换概率可以有效避免通信连接不稳定导致的乒乓效应。

定位虚拟引力的设计主要对应于优化目标中的定位效用。本文面向 TOA 定位方式, 将定位虚拟引力建模为当前匹配关系下零阶优化求得的局部定位效用的梯度方向。同理, 原定位效用在服务用户前后效用突变且不具有梯度变化, 因此, 针对定位优化目标, 构建异梯度的连续单调定位虚拟力效用

$$U_{F_{\text{nav}}}^{m,u}(t) = \begin{cases} -J_u(t) + \gamma, J_u(t) < 0.9J_{\text{nav}}^{\text{th}} \\ \left(\frac{\gamma}{1.1J_{\text{nav}}^{\text{th}}} - 1 \right) J_u(t), 0.9J_{\text{nav}}^{\text{th}} \leq J_u(t) \leq 2J_{\text{nav}}^{\text{th}} \\ -J_u(t), J_u(t) > 2J_{\text{nav}}^{\text{th}} \end{cases} \quad (26)$$

CRLB 期望最小化, 与通信速率相反, 因此, 通过设计阈值上限, 避免在无人机接近力平衡状态时被当前难以服务的用户无效拉扯; 在区间中有潜力且未达到定位服务阈值的用户, 依据定位效用, 产生更大的引力; 通过预留降低 10% 的阈值下限, 避免虚拟力在阈值处来回拉扯导致乒乓效应。无人机基站 m 受到所匹配用户的虚拟定位引力表示为

$$\mathbf{F}_m^{\text{nav}}(t) = K_1 \sum_{u \in \mathcal{U}} \alpha_{m,u}^{\text{nav}}(t) \left(\frac{\partial U_{F_{\text{nav}}}^{m,u}(t)}{\partial x}, \frac{\partial U_{F_{\text{nav}}}^{m,u}(t)}{\partial y} \right) \quad (27)$$

其中, $\alpha_{m,u}^{\text{nav}}(t)$ 为 t 时刻无人机 m 与用户的定位匹配关系, 该匹配关系随着无人机和用户的移动而变化。采用贪婪策略初始化匹配, 用户 u 在每个时刻都会从候选无人机子组 $\mathcal{K}_u(t)$ 中重新匹配当前最优无人机定位子组 $\mathcal{C}_k(t)$, 使当前用户的定位误差 CRLB 最小。

3.2 非视距链路规避虚拟引力建模

非视距链路规避虚拟引力的作用是将无人机牵引至可以向地面用户提供视距链路的位置。结合应急现场的地图信息或者无线环境感知等手段, 可以

获得障碍物信息, 进而能够计算向所服务的用户集合提供视距链路的位置。因此, 本文提出了非视距链路规避点求解算法, 对于存在非视距连接下的无人机基站 m 及其提供通信和定位服务的用户集合 \mathcal{U}_m 计算其非视距链路规避点的位置 $\mathbf{p}_m^{\text{obs}}$ 。非视距链路规避往往会显著提升通导效用, 因此, 非视距链路规避虚拟引力的优先级较高, 方向建模为从基站当前位置指向非视距链路规避点的位置。具体而言, 无人机基站 m 受到所服务用户的非视距链路规避虚拟引力表示为

$$\mathbf{F}_m^{\text{obs}}(t) = K_2 \sum_{u \in \mathcal{U}} \alpha_{m,u}^{\text{NLoS}}(t) (\mathbf{p}_m^{\text{obs}}(t) - \mathbf{s}_m(t)) \quad (28)$$

其中, K_2 为非视距链路规避引力系数, $\mathbf{p}_m^{\text{obs}}(t)$ 为基站 m 当前通导服务匹配下的非视距链路规避点的坐标, $\mathbf{s}_m(t)$ 为无人机基站 m 当前位置坐标。 t 时刻无人机 m 与用户 u 的通信或定位链路是否存在非视距表示为

$$\alpha_{m,u}^{\text{NLoS}}(t) = \begin{cases} 1, \alpha_{m,u}^{\text{comm}}(t) + \alpha_{m,u}^{\text{nav}}(t) \geq 1 \text{ 且 链路 与 山体 相交} \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (29)$$

该参数随着无人机与用户的通导匹配关联而变化。

算法 1 中给出了 t 时刻当无人机基站 m 与所服务的用户集合之间存在非视距链路时如何结合无人机的当前位置 $\mathbf{s}_m(t)$ 、用户位置 $\{\mathbf{u}_1(t), \mathbf{u}_2(t), \dots, \mathbf{u}_{|\mathcal{U}_m|}(t)\}$ 和障碍物端点位置 $\{\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2\}$ 求取非视距链路规避点的位置 $\mathbf{p}_m^{\text{obs}}(t)$ 。假定障碍物投影为线段, 高度高于无人机常规飞行高度。首先, 从无人机的当前位置, 向经过用户与障碍物两端点的直线引出垂线求出垂足位置, 并将垂足位置加入潜在位置集合 \mathcal{F} 。然后, 从潜在位置集合 \mathcal{F} 中筛选出与无人机所服务的用户不存在非视距链路的必定非空位置集合 \mathcal{P} 。最后, 为了降低无人机飞往非视距链路规避点的距离, 从 \mathcal{P} 中选取距离无人机最近的点作为非视距链路规避点。图 2 展示了当障碍物两侧都存在用户, 且无人机与障碍物左侧的 2 个用户的链路被阻隔为非视距时, 通过算法 1 求取的非视距链路规避点。从图 2 可以看到, 非视距链路规避点在保持和原有视距用户链路连接的同时, 可以实现与障碍物左侧 2 个用户的非视距链路规避。

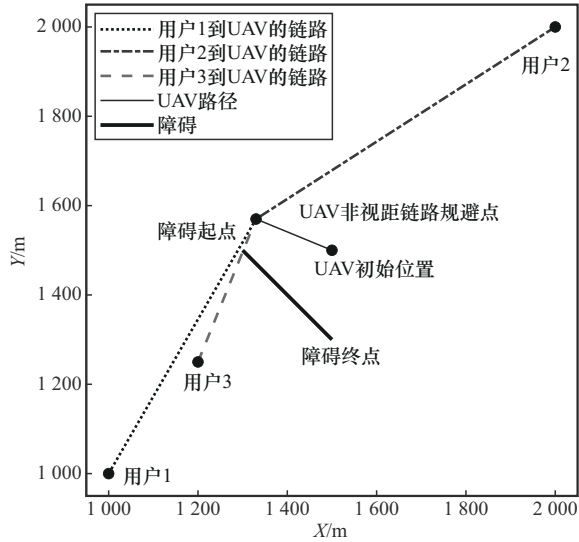


图 2 非视距链路规避点的位置示意

算法 1 非视距链路规避点求解算法

输入 t 时刻无人机 m 的初始位置 $s_m(t)$, 无人

机 m 服务用户集合的位置 $\{u_1(t), u_2(t), \dots, u_{|U_m|}(t)\}$, 障碍物端点位置 $\{o_1, o_2\}$

输出 无人机 m 的非视距链路规避点的位置 $p_m^{\text{obs}}(t)$

1) 初始化

2) 初始化无人机的潜在位置集合 \mathcal{F} 为空集, 可行位置集合 P 为 $\{o_1, o_2\}$

3) 对于 $\{u_1(t), u_2(t), \dots, u_{|U_m|}(t)\}$ 中的每一个用户位置 $u_i(t)$ 和障碍物的端点 o_j , 迭代 ($1 \leq i \leq |U_m|, 1 \leq j \leq 2$)

4) 计算穿过 $u_i(t)$ 和 o_j 的直线到无人机最近的点 $p_{ij}(t)$, 并将其放入集合 \mathcal{F} 。其中, $p_{ij}(t)$ 可以通过点到直线垂足位置的计算式来求解, 即

$$p_{ij}(t) = o_j + \frac{(s_m(t) - o_j)(u_i(t) - o_j)}{\|u_i(t) - o_j\|^2} (u_i(t) - o_j)$$

5) 迭代结束

6) 对于 \mathcal{F} 中的每一个位置 $p_{ij}(t)$, 计算任意 $u_i(t)$ 和该 $p_{ij}(t)$ 构成的线段是否与开线段 $o_1 o_2$ 相交, 即是否存在非视距路径。如果不存在相交, 则将该位置加入可行位置集合 P

7) 从可行位置集合 P 中选取距离 $s_m(t)$ 最近的位置作为 $p_m^{\text{obs}}(t)$

3.3 无人机避撞虚拟斥力建模

在虚拟引力的作用下, 无人机基站将向着用户聚集, 用户分布密集的区域可能会分布多个无人机基站, 无人机基站之间的间距可能会小于安全距离, 同时产生冗余覆盖。因此, 需要设计无人机基站间的斥力, 该斥力能够使无人机基站之间保持合适的距离约束, 也能防止无人机基站在动态部署过程中发生碰撞。设置无人机基站间的最小相对距离阈值为 d_m^{safe} , 无人机基站 m 将受到该邻居无人机基站 n 产生的虚拟斥力, 计算式为

$$F_{m,n}^{\text{safe}}(t) = K_3 \frac{\max(d_m^{\text{safe}} + d_{\text{buff}} - \|s_m(t) - s_n(t)\|, 0)(s_m(t) - s_n(t))}{(\|s_m(t) - s_n(t)\| - d_m^{\text{safe}})^2} \quad (30)$$

其中, K_3 为斥力系数, 防碰撞的优先级高于其他一切服务、规避等需求, 因此 K_3 大于其他所有系数。 d_{buff} 为避撞缓冲距离, 当无人机基站间距离小于安全距离 d_m^{safe} 与 d_{buff} 之和时, 斥力将使 2 架无人机基站顺着二者连线相互远离, 且距离越近斥力越大。如果 2 架无人机基站间距离大于阈值 $d_m^{\text{safe}} + d_{\text{buff}}$, 则不会产生该虚拟斥力。

当应急现场存在障碍 (树林、山峰等) 时, 无人机基站 m 需要与障碍物保持安全距离。在基站的移动过程中, 如果与障碍物 $\{o_1, o_2\}$ 的相对距离小于预先设置的安全距离 d_o^{safe} 与避撞缓冲距离 d_{buff} 之和时, 无人机基站 m 将会受到当前时刻障碍物上距离其最近的点 $o_m(t)$ 的斥力作用, 该斥力的设计主要用于应对无人机基站与障碍物的避撞约束, 具体为

$$F_{m,o}^{\text{safe}}(t) = K_3 \frac{\max(d_o^{\text{safe}} + d_{\text{buff}} - \|s_m(t) - o_m(t)\|, 0)(s_m(t) - o_m(t))}{(\|s_m(t) - o_m(t)\| - d_o^{\text{safe}})^2} \quad (31)$$

其中, $F_{m,o}^{\text{safe}}(t)$ 斥力方向由障碍物上的 $o_m(t)$ 指向受作用的无人机基站位置 $s_m(t)$ 。

3.4 无人机虚拟合力建模与移动模型

t 时刻无人机基站 m 所受虚拟合力将由以上 5 种虚拟力共同影响决定, 即

$$F_m(t) = \omega F_m^{\text{comm}}(t) + (1 - \omega) F_m^{\text{nav}}(t) + F_m^{\text{obs}}(t) + \sum_{n \in \mathcal{M}, n \neq m} F_{m,n}^{\text{safe}}(t) + F_{m,o}^{\text{safe}}(t) \quad (32)$$

进一步地, 考虑无人机基站 m 的移动能力, 将

t 时刻的移动速度表示为

$$\mathbf{v}_m(t) = \frac{\mathbf{F}_m(t)}{|\mathbf{F}_m(t)|} \min(d_m^{\max}, |\mathbf{F}_m(t)|) \quad (33)$$

其中, d_m^{\max} 为无人机基站 m 在单位时间内的最大移动距离。因此, 给定 t 时刻无人机 m 的坐标 $\mathbf{s}_m(t)$, 无人机基站 m 在 $t+1$ 时刻更新后的位置为

$$\mathbf{s}_m(t+1) = \mathbf{s}_m(t) + \mathbf{v}_m(t) \quad (34)$$

需要注意的是, 非视距链路规避引力在无人机到达非视距链路规避点之后将会置零。此时, 非视距链路规避引力之外的合力占据主导地位, 可能会使基站再次回到非视距区域。具体而言, 对于障碍物两侧都存在无人机基站要服务的用户的情况, 无人机所受的通导引力等力的合力可能会指向非视距区域, 使得无人机再次回到非视距区域, 使链路在视距和非视距的交界处循环变化。针对上述情况, 本文通过将障碍物扩大 d_{amp} 的距离来计算非视距链路规避点, 从而避免无人机再次进入非视距区域。

4 仿真结果与性能分析

4.1 参数设定

仿真基于 Intel i9-14900HX、Matlab2023b 平台进行, 主要参数如表 1 所示, 其中用户分布和无人机的部署范围为 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$, 初始位置均为随机生成。基于表 1 参数设定, 本节实验结果为用户与无人机初始位置随机生成进行 100 次蒙特卡罗实验结果的均值。

4.2 通导耦合效用分析

用户静态分布下的网络伴随质量指标 $\text{AQI}(t) = \omega U_{\text{comm}}(t) + (1 - \omega)U_{\text{nav}}(t)$ 是 t 时刻网络通信效用与网络定位效用加权和, 本节仿真分析了用户静态场景下算法收敛时部署结果的 AQI。为了对比所提 NA-VF 算法通导耦合效用随通信权值 ω 的变化, 并进一步分析通信效用与定位效用对无人机网络拓扑资源的竞争关系, 本节对比了无非视距链路规避引力的所提虚拟力算法 (VF)、粒子群优化 (PSO) 算法、面积覆盖的静态部署 (Static) 和非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 的性能。其中, PSO 粒子规模为 150 个, 最大迭代轮数为 50 轮; Static 为面向整个部署区域的 AQI 最优的部署, 为 1 000 个粒子, 150 轮的 PSO 求得; NSGA-II 种群规模为 400 个, 最大迭代轮数为 150 轮。

表 1 仿真中的主要参数

| 参数 | 数值 |
|---|--|
| 无人机、用户区域 | $[-1\ 500, 1\ 500] \text{ m} \times [-1\ 500, 1\ 500] \text{ m}$ |
| 默认无人机数量 $ \mathcal{M} $ /架 | 12 |
| 默认用户数量 $ \mathcal{U} $ /个 | 30 |
| 默认通信权值 ω | 0.5 |
| 服务率权值 γ | 1×10^5 |
| 障碍物位置 $\{\sigma_1, \sigma_2\}$ /m | $\{(-1\ 000, 0), (0, -1\ 000)\}$ |
| 载波频率 f /GHz | 1.4 |
| 林区信道参数 A, B, C, E, G | 0.25、0.39、0.25、0、0.05 |
| 树冠高度 h_{tree} /m | 5.2 |
| FSPL 参考距离 d_0 /m | 1 |
| 路径损耗因子 β | 2 |
| 无人机飞行高度 h /m | 200 |
| 山体遮挡额外路径损耗 L^{obs} /dB | 200 |
| 每架无人机发射功率 P /W | 2 |
| 每架无人机带宽 B /MHz | 10 |
| 通信服务 SNR 阈值 $\gamma_{\text{comm}}^{\text{th}}$ /dB | 0 |
| 定位服务 SNR 阈值 $\gamma_{\text{nav}}^{\text{th}}$ /dB | -10 |
| 通信服务速率阈值 $R_{\text{comm}}^{\text{th}}$ /(Mbit·s ⁻¹) | 1 |
| 定位服务 CRLB 阈值 $J_{\text{nav}}^{\text{th}}$ | 1 000 |
| 无人机单位时间最大移动距离 d_m^{\max} /m | 25 |
| 无人机间安全距离 d_m^{safe} /m | 100 |
| 无人机与障碍物安全距离 d_o^{safe} /m | 100 |
| 避撞缓冲距离 d_{buff} /m | 100 |
| 用户同方向持续运动时限 t_u^{step} | 10 |
| 通导引力系数 K_1 、非视距链路规避引力系数 K_2 、斥力系数 K_3 | $1, 5 \times 10^{10}, 5 \times 10^{15}$ |
| 障碍物扩大距离 d_{amp} /m | 150 |

在无人机为 12 架、用户数量为 30 个的多种随机场景下, 收敛 AQI、通信速率和定位误差 CRLB 随 ω 的变化如图 3 和图 4 所示。无非视距链路规避引力的 VF 由于障碍物两侧均存在无人机, 对通信优化影响较小, 但对于构型需求复杂的定位优化来说, 障碍物两侧无人机分布不一定能够满足定位需求。由于无法解决障碍物对链路的影响, 因此链路 SNR 下降, 测距精度显著降低且不稳定, 带来更大的定位误差。Static 部署能为部署区域带来稳定的通信、定位覆盖, 但无法提供更高的通信速率或更低的定位误差。除 Static 部署外, 所有算法的通信速

率和定位误差CRLB均随着通信权值 ω 的增加呈递增趋势，且NA-VF算法与PSO递增稳定。因此在该类场景下，能够通过调整 ω 来匹配不同的通导需求，实现按需部署。综合考虑通导效用，NA-VF算法在不同 ω 下能够达到与PSO相似的收敛AQI。NA-VF算法不同 ω 下的平均收敛AQI相较于PSO仅降低2.56%，相较于Static部署提升17.51%。

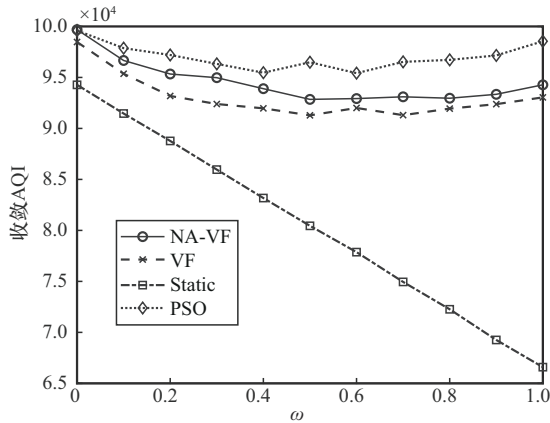
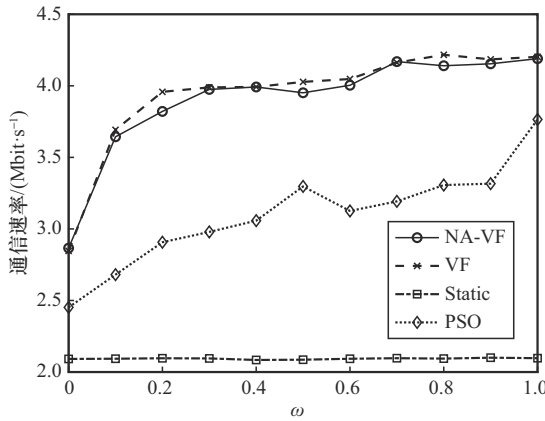
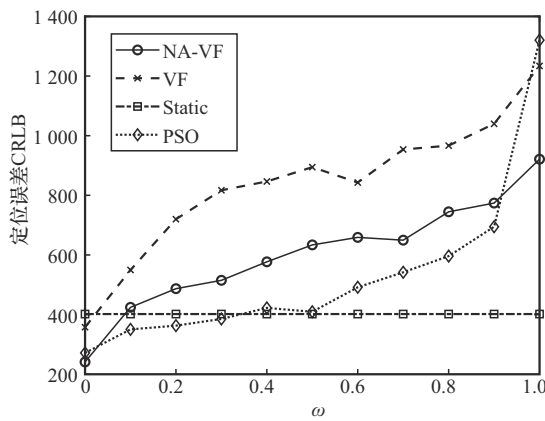


图3 收敛AQI随 ω 的变化



(a) 通信速率随 ω 的变化



(b) 定位误差CRLB随 ω 的变化

图4 通信速率与定位误差CRLB随 ω 的变化

不同算法随通信权值 $\omega \in [0,1]$ 变化得到的通导效用Pareto前沿如图5所示。以某一典型场景为例，通导效用对无人机网络拓扑资源呈现竞争关系，且NA-VF算法与PSO均能达到与NSGA-II相近的通导效用前沿。

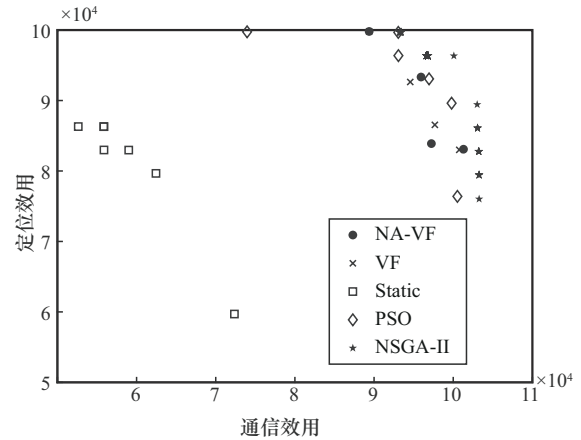


图5 通导效用Pareto前沿

不同算法运行所需的时间成本和通导效用Pareto前沿超体积(HV, Hypervolume)如表2所示，其中，构网时间是指算法运行至第一次在某30轮迭代中通信服务率变化小于0.001时，算法运行至该30轮开头所需的时间，加上无人机依据算法结果部署到目标位置的总时间。单次决策时间是指输出一次可用部署结果所需的时间。Static部署可离线计算，故仅需考虑无人机部署至目标位置的时间；PSO与NSGA-II由于其启发式算法的特性，无法实时输出中间结果指导部署；NA-VF算法的迭代过程是模拟无人机从当前位置如何逐步运动到最终部署位置，即每轮迭代输出都是当前无人机的运动方向与步长。Pareto前沿超体积是衡量前沿上解集质量的综合指标，表2计算Pareto前沿HV时假定参考点为 $(5 \times 10^4, 5 \times 10^4)$ 。NA-VF算法解集质量与PSO相近，能够针对单个通导需求组合快速求解。NSGA-II虽然具有更好的解集质量，但由于其一次求解多种通导需求组合的算法特性，计算成本远高于其他算法。对于固定场景，可以用NSGA-II预先求得不同通导需求组合下的部署策略，但其特点不适合高动态的应急救援场景。

综合图3与表2可得，相比于PSO，NA-VF算法在平均收敛AQI性能损失不超过3%的情况下，

构网时间降低 91.27%，且支持亚秒级单次决策，显著提升了算法在实际应急部署场景的可用性。

表 2 不同算法运行所需的时间成本和通导效用 Pareto 前沿超体积

| 算法 | 构网时间/s | 单次决策时间/s | Pareto 前沿超体积 |
|---------|----------|----------|--------------------|
| NA-VF | 60.69 | 0.07 | 2.47×10^9 |
| VF | 56.09 | 0.07 | 2.45×10^9 |
| Static | 38.16 | — | 2.53×10^8 |
| PSO | 695.48 | 661.93 | 2.58×10^9 |
| NSGA-II | 5 515.05 | 5 481.50 | 2.59×10^9 |

4.3 用户数量与无人机数量影响分析

图 6 和图 7 对比了不同无人机数量和不同

用户数量下的收敛 AQI 与构网时间，其中 $\omega = 0.5$ ，无人机数量默认值为 12 架，用户数量默认值为 30 个。

所有算法的收敛 AQI 随着无人机数量的增加而增加，随着用户数量的增加而降低。VF 由于缺少非视距链路规避策略，存在非视距链路导致性能降低。NA-VF 算法能够取得和 PSO 相近的收敛 AQI，均优于 Static 部署，且能够适应无人机与用户数量的变化。值得一提的是，当无人机数量增加时，NA-VF 算法的无人机平均部署移动距离减少，构网时间出现下降趋势，且收敛 AQI 更接近 PSO。当用户数量增加时，NA-VF 算法的时间复杂度仅呈低斜率变化。然而，随着无人机与用户规模的扩大，PSO 的时间复杂度呈指数或高斜率增长。相比于 PSO 等启发式算法，NA-VF 算法能

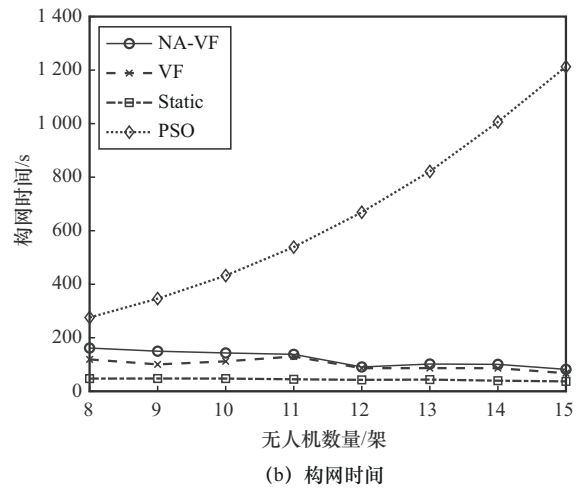
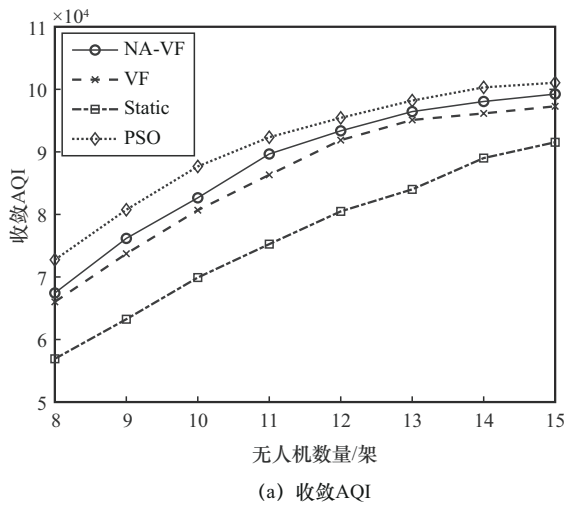


图 6 不同无人机数量下的收敛 AQI 与构网时间

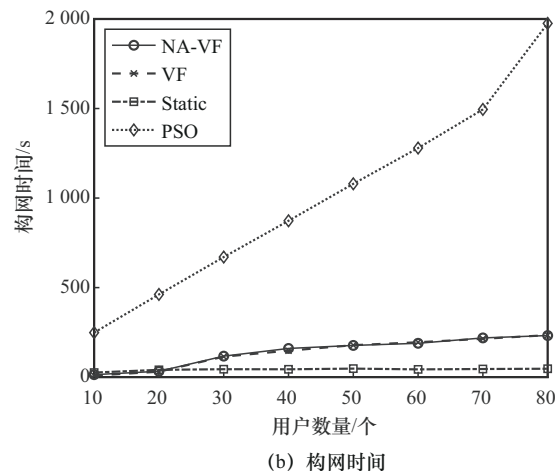
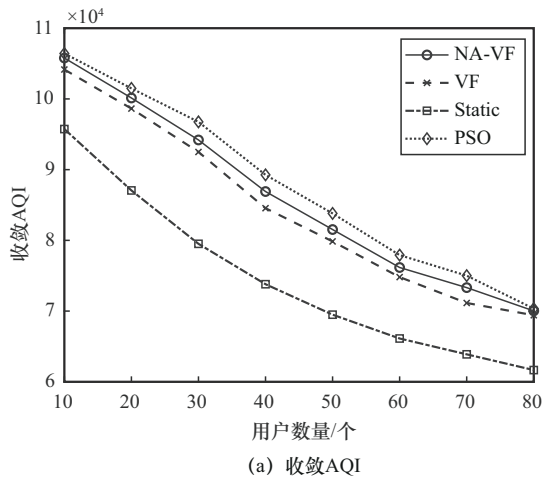


图 7 不同用户数量下的收敛 AQI 与构网时间

够适用于洪水、地震救援等各种中、大规模应急部署场景，实现快速决策。

4.4 用户移动速度影响分析

用户动态场景下的网络伴随质量通过时段AQI衡量，即 $\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T AQI(t)$ 。为了对比用户移动速度对算法性能的影响，假设30个用户以10s为间隔随机切换移动方向，不同算法的12架无人机初始位置为各自针对用户初始位置的收敛部署结果，无人机依据1Hz频率的极大似然实时定位解算结果，以最大飞行速度进行动态部署，统计在30min任务时间内，网络的时段AQI、通信服务率与定位服务率。

NA-VF算法由于其低复杂度与可输出单次决策的特点，在动态场景下能够保持较高的时段AQI和通信服务率与定位服务率，如图8和图9所示。受限于定位频率，在用户以超过40km/h高速移动时，定位误差发散，导致时段AQI和通信服务率下降。VF受非视距链路影响，性能略有降低。Static能为部署区域带来稳定的通信、定位覆盖，但通信服务率低。PSO由于决策时间长，网络无法及时跟随人员移动而调整，导致时段AQI随用户移动速度增加而显著下降。用户动态场景，NA-VF算法性能显著优于PSO。当用户移动速度为0~40km/h时，相比于PSO时段AQI的明显下降，NA-VF算法的时段AQI下降减少86.86%，相比于Static，时段AQI提升7.47%。本文所提NA-VF算法由于其低复杂度且稳定的决策时间，能够适用于动态部署场景，持续提供稳定的网络通信与定位服务保障。

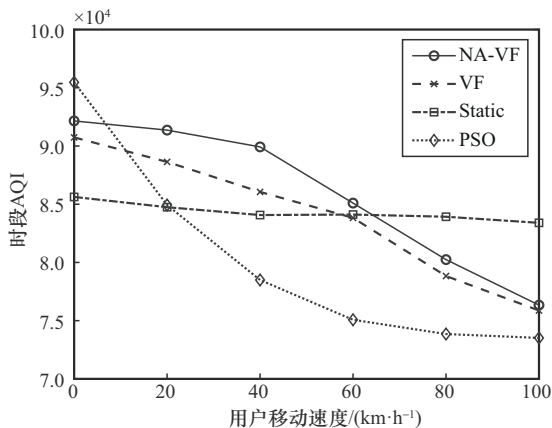
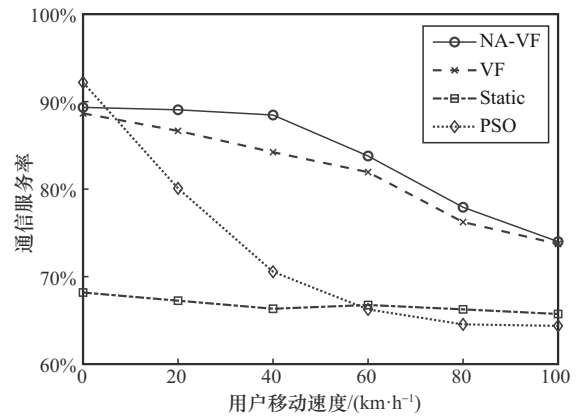
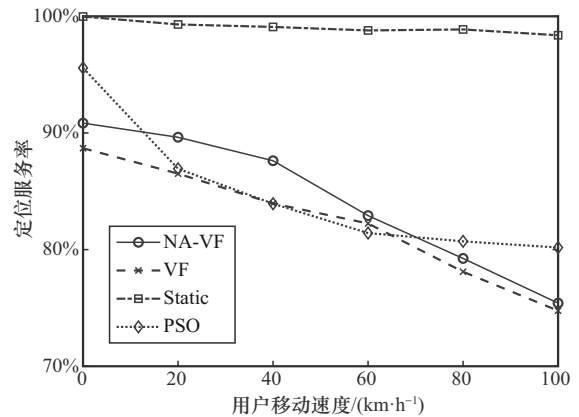


图8 时段AQI随用户移动速度的变化



(a) 通信服务率受用户移动速度的影响



(b) 定位服务率受用户移动速度的影响

图9 通信服务率和定位服务率受用户移动速度的影响

4.5 山地林区应急救援场景应用分析

动态场景下，NA-VF算法与传统面积覆盖的Static均展现出了良好的性能。本节针对一个山地林区真实应急救援场景进行模拟，以验证NA-VF算法相较于Static的有效提升。该场景模拟救援队绕山搜寻被困群众，救援人员被分为2个小队（簇），每个小队包含10个人（乘载具）。2个小队自山体一侧出发，分别从2个方向绕过山体，最终在山体的另一侧汇合。山体两端点为{(500, -500), (-500, 500)}，2个小队的运动路径分别为：由(-900, -1200)处出发，经(1200, -1200)，到达(1200, 900)处；由(-1200, -900)处出发，经(-1200, 1200)，到达(900, 1200)处。2个小队的人员均跟随其簇头运动，簇头运动速度为40km/h，队员与簇头之间的最远距离不超过350m，并随机变化。不同算法的8架无人机初始位置为各自针对用户初始位置的收敛部署结果，无人机依据1Hz频率的极大似然实时定位解算结果，以最大飞行速度进行动态部署，统计在约6min任务时间内，网络的通信

服务率、通信速率、定位服务率、定位误差 CRLB。

2 种算法的中间部署结果如图 10 和图 11 所示, 实际伴随效果如表 3 所示。由图 10 和图 11 可知, NA-VF 算法能够使无人机伴随用户移动。由表 3 可知, NA-VF 算法相较于 Static 通信服务率提升 4.20 倍, 通信速率提升 11.17 倍, 定位服务率提升 1.55 倍, 定位误差 CRLB 降低 98.31%, 为应急救援任务的开展提供了更有效的通导保障。

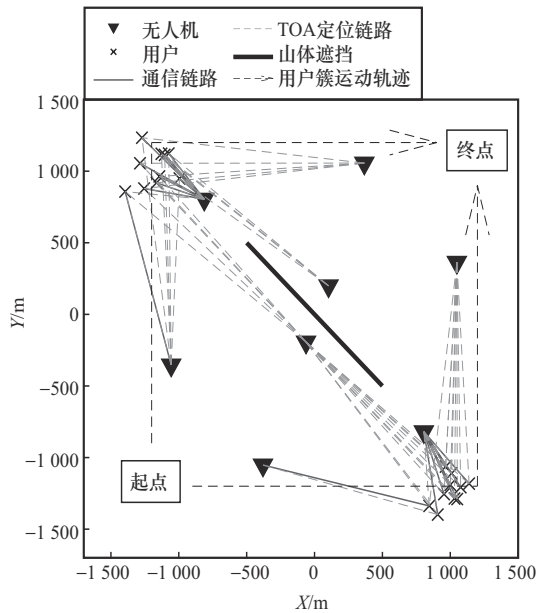


图 10 Static 的中间部署结果

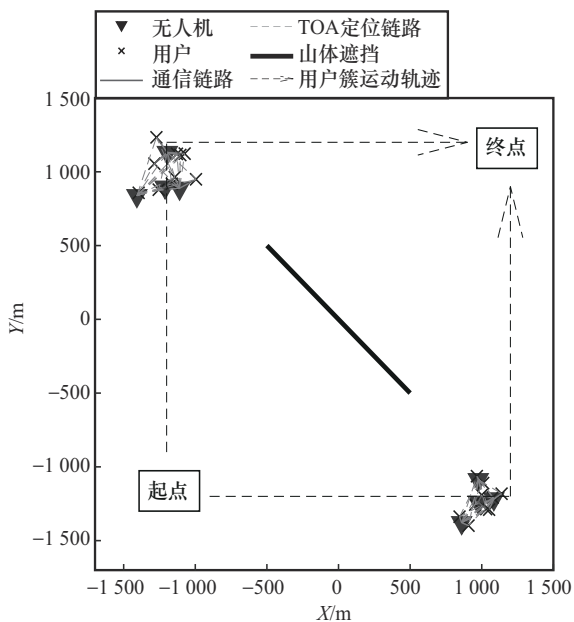


图 11 NA-VF 算法的中间部署结果

表 3 2 种算法的实际伴随效果

| 算法 | 通信服务率 | 通信速率/ (Mbit·s ⁻¹) | 定位服务率 | 定位误差 CRLB |
|--------|----------|----------------------------------|----------|----------------------|
| Static | 19.24 % | 0.69 | 39.16 % | 2.54×10 ³ |
| NA-VF | 100.00 % | 8.40 | 100.00 % | 42.96 |

5 结束语

本文针对灾害现场人员移动及障碍物遮挡引发的网络通信速率与定位精度下降的问题, 设计了通导耦合的伴随质量指标, 提出了面向通导一体化网络的非视距规避-虚拟力算法。所设计的基于通信需求与定位需求梯度方向的虚拟引力和非视距链路规避的虚拟引力, 在保障应急网络伴随质量的前提下有效降低了网络部署决策时间。仿真结果展示了相对于现有的启发式网络部署算法, 对动态场景具有更好的伴随性, 更适应实际应急救援现场网络调度的时效性需求。

参考文献:

- [1] 王莉, 费爱国, 张平, 等. 智能应急指挥通信网络新框架与关键技术研究[J]. 通信学报, 2023, 44(6): 1-11.
WANG L, FEI A G, ZHANG P, et al. Research on new architecture and key technologies of intelligent emergency command communication network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(6): 1-11.
- [2] AHMED S, CHOWDHURY M Z, JANG Y M. Energy-efficient UAV relaying communications to serve ground nodes[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(4): 849-852.
- [3] DO DUY T, NGUYEN L D, DUONG TRUNG Q, et al. Joint optimisation of real-time deployment and resource allocation for UAV-aided disaster emergency communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(11): 3411-3424.
- [4] WANG T Z, LIU Z Y, XU L M, et al. An efficient and robust UAVs' path planning approach for timely data collection in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 914-919.
- [5] WU X W, WANG L, XU L M, et al. Joint optimization of UAVs 3-D placement and power allocation in emergency communications[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [6] ZHAO Y, LI Z, CHENG N, et al. UAV deployment strategy for range-based space-air integrated localization network[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [7] LIU Q R, LIU R K, WANG Z J, et al. UAV swarm-enabled localization in isolated region: a rigidity-constrained deployment perspective[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(9): 2032-2036.

- [8] YU X Y, LIU Z Y, XU L M, et al. Lifetime maximization for UAV-enabled integrated localization and communication networks in emergency scenarios[C]//Proceedings of the 2022 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 905-909.
- [9] WANG L Y, ZHANG H X, GUO S S, et al. 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.
- [10] MA X Y, HU S T, ZHOU D Y, et al. Adaptive deployment of UAV-aided networks based on hybrid deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [11] XU X Y, FENG G, QIN S, et al. Joint UAV deployment and resource allocation: a personalized federated deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 4005-4018.
- [12] ZHAO H T, WANG H J, WU W Y, et al. Deployment algorithms for UAV airborne networks toward on-demand coverage[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 2015-2031.
- [13] WANG H J, ZHAO H T, WU W Y, et al. Deployment algorithms of flying base stations: 5G and beyond with UAVs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10009-10027.
- [14] WANG L Y, ZHANG H X, GUO S S, et al. 3D UAV deployment in multi-UAV networks with statistical user position information[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(6): 1363-1367.
- [15] International Telecommunication Union. Attenuation in vegetation: ITU-R Recommendation P.833-9[S]. 2016.
- [16] WANG L G, ZHU H G. Simple engineering algorithms of transmission loss in short range troposcatter communications across mountains[J]. Radio Engineering, 2018, 48(6): 512-515.
- [17] DAI Z C, WANG G, JIN X P, et al. Nearly optimal sensor selection for TDOA-based source localization in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12031-12042.
- [18] ZHU W D, HAN Y H, WANG L, et al. Pilot optimization for OFDM-based ISAC signal in emergency IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(18): 29600-29614.
- [19] LI B W, WANG X B, XIN Y, et al. Value of service maximization in integrated localization and communication system through joint resource allocation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(8): 4957-4971.

[作者简介]



徐连明 (1981-), 男, 山东潍坊人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为通导组网、边缘网络、定位导航等。



朱文迪 (1999-), 男, 湖北武汉人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为应急指挥通信、定位系统、无人机通导一体化网络部署等。



王莉 (1982-), 女, 河南濮阳人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为应急指挥通信、能源互联网、边缘计算等。



刘振宇 (1995-), 男, 河南新乡人, 博士, 萨里大学研究员, 主要研究方向为基于人工智能的无线通信、通导组网等。



张雨豪 (2001-), 男, 河南新乡人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为定位导航、通导组网等。