

面向通信-导航-感知一体化的应急无人机网络低能耗部署研究

王莉¹, 魏青², 徐连明², 沈渊³, 张平⁴, 费爱国¹

(1. 北京邮电大学计算机学院(国家示范性软件学院), 北京 100876; 2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;
3. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 4. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 在事故灾难救援等突发公共事件中, 救援人员往往面临通信传输不畅、定位导航不稳、灾情感知不准的问题, 亟须部署一套应急无人机网络, 对受灾地区进行通信、导航、感知服务补盲。针对无人机续航能力受限的问题, 首先提出了一套网络拓扑可重构、节点角色可切换的通信-导航-感知一体化应急无人机网络低能耗部署方案, 然后设计了一种基于粒子群算法的层次化匹配决策算法, 联合求解无人机与通导感用户关联、多角色无人机通信资源分配以及无人机位置这 3 个子问题。仿真表明, 所提方案能够实现通导感多目标需求与受限网络资源的灵活适配, 极大降低了对无人机数量的需求与部署能耗。

关键词: 应急通信; 无人机网络部署; 通导感一体化; 无线资源分配

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022138

Research on low-energy-consumption deployment of emergency UAV network for integrated communication-navigating-sensing

WANG Li¹, WEI Qing², XU Lianming², SHEN Yuan³, ZHANG Ping⁴, FEI Aiguo¹

1. School of Computer Science (National Pilot Software Engineering School), Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
4. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: In public emergencies such as accident relief, rescue workers are faced with challenges, such as poor communication, unstable navigating, and inaccurate disaster sensing. It is necessary to deploy an emergency unmanned aerial vehicle (UAV) network to guarantee the services of communication-navigating-sensing. Aiming at alleviating the problem of limited energy of UAV, a low-energy-consumption deployment of an emergency UAV network was first proposed for integrated communication-navigating-sensing (ICNS). The proposed scheme was able to realize network topology reconstruction and role cognition on demand. Then, a particle swarm algorithm based hierarchical matching decision-making algorithm was presented to jointly optimize three sub-problems, including the associations between UAVs and users, the resource allocation for multi-role UAV communications, and the UAV position. Simulation results show that the proposed ICNS scheme can achieve flexible adaptation of the multi-objective requirements and limited network resources, and dramatically reduce the demand for the number of UAVs and the deployment energy consumption.

Keywords: emergency communication, UAV network deployment, integrated communication-navigating-sensing, wireless resource allocation

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-05-17

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2020YFC1511801); 国家自然科学基金资助项目(No.U2066201, No.62171054); 北京市自然科学基金资助项目(No.L192030)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFC1511801), The National Natural Science Foundation of China (No.U2066201, No.62171054), The Beijing Natural Science Foundation (No.L192030)

0 引言

在自然灾害处置、事故灾难救援、社会安全防护等突发公共事件中,救援人员面临公网通信基础设施缺失/损毁、卫星导航信号断续不稳、灾情感知手段受限等恶劣环境,亟须同时保障和提升通信、导航、感知三项关键服务。一般情况下,受灾区域的用户无法相互通信或与外部通信^[1],同时也无法支撑应急行动辅助决策需求,只能依赖经验制定指挥决策,从而导致应急精准响应能力下降。因此,“十四五”规划纲要中也特别提出“加强极端条件应急救援通信保障能力建设”,建立灵活机动、可靠融合的应急网络是应急管理的关键环节,是支持灾害响应和救援的重要部分^[2]。

与此同时,为了进一步全面增强应急救援保障能力,我国提出了“全灾种”“大应急”的新使命和任务要求,面对人员密集程度高、灾情种类多、地理环境复杂恶劣等更高挑战。不同灾种、不同规模、不同阶段的应急救援对通信、导航及感知(以下简称通导感)的服务能力有着差异化要求。在恶劣的资源受限环境下,需要灵活的网络部署来实现动态应急响应。由于应急事件中可调配资源有限、协同难度大,如何跨域考虑通信资源和指挥任务的融合,形成通信指挥协同的应急通信指挥网络,解决应急指挥现场有限的资源与应急业务刚性的需求之间的矛盾,对实现恶劣环境下高效救援决策和精准指挥有着重要作用。

无人机能够在不依赖现有基础设施的情况下,利用其搭载的传感器、小基站等快速部署应急网络,并通过动态网络自组,为应急区域同时增强通信、导航、感知服务,保障应急处置能力。当前大量工作研究了无人机网络部署。在通信方面,文献[3]利用图填充理论优化无人机部署位置,并根据天线波束宽度和覆盖需求调整无人机的高度,以在保证目标区域覆盖率的同时降低无人机部署数量和成本。文献[4]提出了能量高效的三维无人机基站部署方案,通过将部署问题在垂直和水平维度进行解耦以降低计算复杂度,在最小化无人机发射功率的同时最大化无人机基站覆盖的用户数量。在导航方面,文献[5]针对应急无人机网络部署,提出了一种基于粒子群优化的高效群体智能聚类算法,该算法利用粒子适应度函数确定无人机簇间距离、簇内距离、剩余能量和地理位置,设计改进的粒子群算法来降低计算复杂度和网络能耗。文献[6]

针对应急场景被困人员的搜救和定位问题,提出了无人机辅助的无线定位方法,可最小化无人机搜索能耗和待定位节点数量。在感知方面,文献[7]利用多架无人机提供实时感知服务,设计了一种感知-发送协议,分析了有效数据成功传输概率,并提出了一种增强的多无人机 Q 学习算法实现分布式无人机轨迹设计。文献[8]面向时延敏感感知业务,联合优化任务间路径、无人机与基站关联以及感知顺序以最小化任务完成总时间,并提出了一种基于空间修剪的轨迹搜索算法实现快速收敛。然而,上述工作都仅针对无人机单一部署目标进行了研究。

与此同时,将通信与导航、感知功能融合在同一系统中,不仅可以增强不同业务性能,还能够提高无线频谱、硬件设备等资源利用率,逐渐受到学术界和工业界的广泛关注。在学术界,针对通信-感知融合部署,文献[9]研究了通信和感知折中问题,通过对感知时间、传输时间、无人机轨迹以及任务调度的联合优化,最小化无人机感知多个任务的信息年龄,提高数据的“新鲜度”。文献[10]提出了一种新型的联合考虑通信、感知 2 个功能的无人机协同网络,并设计了新型的天线阵列来实现通信波束和感知波束的共享以提高整体性能。针对通信-导航融合部署,文献[11]提出了一种空地融合定位网络架构,联合优化无人机位置和功率以发挥无人机辅助定位的优势。无人机利用其灵活移动能力,以较高的概率获得视线线路,从而提供补充定位信息。同时,通导感服务的不同需求对拓扑结构和部署目标要求存在矛盾。例如到达时间(TOA, time of arrival)、到达时间差(TDOA, time difference of arrival)等测距方法,需要至少 3 个邻居节点作为定位锚点以保障二维定位精度。为实现三维定位或获得更高的精度,需增加更多有效锚点以补充协作定位信息^[12],这与减少无人机重叠覆盖的通信部署目标相悖。针对导航-感知融合部署,文献[13]部署多架装载传感器的无人机构成空中无线传感网络,在分析各传感器最优分布和位置误差的基础上,结合 TDOA 方法和到达频率差(FDOA, frequency difference of arrival)方法设计目标源位置估计方案。在工业界,2021 年 4 月 9 日,由中国移动和华为联合举办的“通信感知一体化”行业应用研讨会顺利召开。2021 年 12 月 30 日,在中国信通院 IMT-2020(5G)推进组指导下,华为在北京怀柔外场完成了全球首个面向 5G-Advanced 通信感知一体技术验证。中信科移动推

出“通信·导航·物联一体化”室内覆盖解决方案利用智慧室内分布天线内的蓝牙等物联单元实现室内通信网络信号覆盖、室内定位节点信息广播、物联信息收集等功能。然而，该方案主要解决智慧商场、智慧博物馆等场景的室内信号覆盖问题。综上所述，当前尚未有研究工作面向应急场景设计通导感多服务融合的应急无人机网络部署。

在实际应急场景中，应急业务需要通导感多种服务的共同支持。例如，在灾情态势感知中，每架无人机不仅需要感知其覆盖范围内的数据，保证感知质量，而且需要将感知的数据传输给中继节点或指挥中心进行数据处理和分析，同时无人机将对目标用户进行协作定位。由于应急场景环境复杂、变化动态，不确定因素较多，充分利用有限资源满足应急业务需求十分关键。一方面，无人机有限续航能力将极大影响网络性能和部署。尽管当前已有部分工作研究了无人机能耗模型并制定了相应的节能和低能耗部署策略^[3,14]，但仍未考虑通导感一体化部署中的能耗最小化问题。另一方面，无人机部署需考虑对无人机与用户关联、无人机位置以及通信资源等变量的优化。由于涉及对离散变量（例如无人机与用户关联的0-1变量）和连续变量（例如无人机功率变量）的联合优化，该优化问题为混合整数规划问题。图论的匹配理论为降低此类问题求解计算复杂度提供了新的思路。在匹配理论中，节点和优化目标分别映射为图的顶点和边，然后利用二分图、超图等算法求解以提升效率^[15]。同时，由于通导感服务需求随环境和任务的变化而不断变化，需通过切换无人机角色和更新部署以适应动

态通导感部署需求。因此，如何面向通导感融合的动态部署需求，设计多维变量联合优化方案以实现资源有限条件下的应急无人机网络低能耗部署有待深入研究。

1 通导感服务模式与能力量化

在应急场景中，由于基站退服、卫星拒止、环境复杂等情况，救援人员往往面临通信传输不畅、定位导航不稳、灾情感知不准等问题。面向通导感一体化的应急无人机网络低能耗部署场景如图1所示。由于无人机具有一定的飞行高度和灵活性，可以部署应急无人机网络以支持应急网络服务。例如，在基站退服区域，可部署无人机作为空中基站满足用户的通信需求；在卫星拒止区域，可利用无人机自身的位置信息以及接收的用户信号实现协作定位；在环境复杂区域，可部署无人机采集和回传数据以支持指挥决策。

由于应急场景存在环境差异性、救援救灾需求多样性，需选择适配的通导感服务模式和量化指标。本节将介绍基本的通导感服务模式和通导感能力量化方式。

1.1 通导感服务模式

1) 通信模式

应急场景中存在无人机与用户、用户间以及无人机间通信。根据通信方式的不同，数据传输可分为单播、广播以及多播等通信模式。相比于广播，多播可以只为特定对象传输数据。根据通信用户数量的不同，数据传输可分为单点和多点通信模式。在单点模式中，具有邻近特性的用户可采用设备到设备（D2D, device-to-device）通信技术，借助邻居

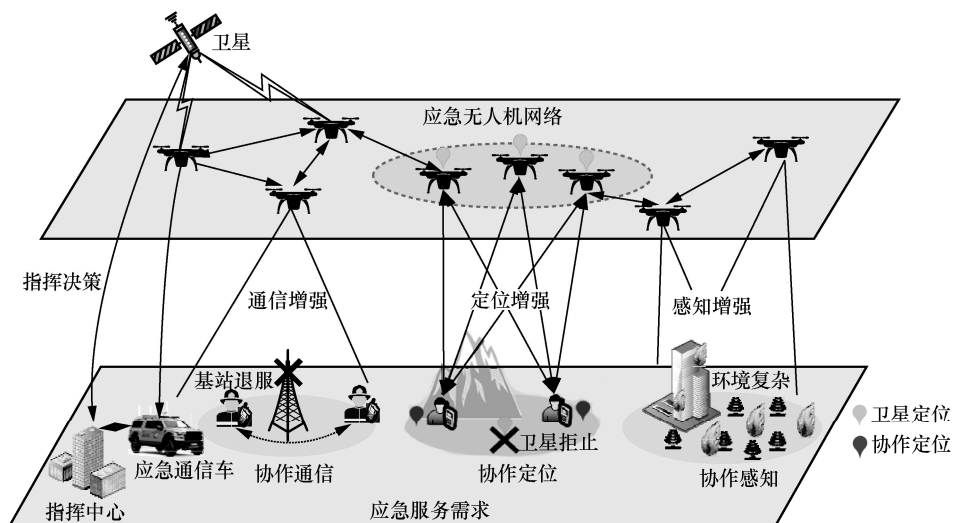


图1 面向通导感一体化的应急无人机网络低能耗部署场景

节点发现机制建立点到点通信连接。用户数据可不经网络中转而直接传输,从而实现快速部署和信息交互。在多点模式中,非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)技术是抗恶劣应急环境的有效手段之一。当用户信道质量不均衡时,可借助 NOMA 技术支持具有不同需求的用户接入,在保障弱信道用户通信需求下提升资源利用率。

2) 导航模式

应急场景中考虑对地面用户的定位。根据定位锚点的不同,定位模式包括卫星定位、基站定位、Wi-Fi 定位以及辅助全球卫星定位。在基站退服、卫星拒止等应急场景中,地面用户不能接收到基站或卫星信号,无法实现位置校准。由于无人机具有一定的飞行高度,可部署多架无人机作为定位锚点对地面用户协同定位。根据定位信息的不同,定位模式包含 TOA、TDOA、接收信号强度(RSSI, received signal strength indication)、到达角(AOA, angle of arrival)以及相位差(PDOA, phase difference of arrival)等。其中,TOA 和 TDOA 需根据接收信号获取测量时间,RSSI 需获取信号强度,AOA 测量节点间的角度,PDOA 测量信号传播的相位信息。

3) 感知模式

应急场景中车辆、地面用户以及传感器等都可实现数据感知和采集。在地形复杂、环境未知的应急场景中,可派遣无人机进行数据感知和回传。根据感知用户数量的不同,数据感知可分为单点和多点感知模式。在单点感知模式中,可采用 D2D 技术实现感知数据传输。在多点感知模式中,可利用 NOMA 技术、协作多点(CoMP, coordinated multiple point)传输技术等,通过节点协作提升感知速率和系统容量。此外,用户可利用携带的移动设备形成交互式的感知网络,通过群智感知收集数据、分析信息和共享数据。

1.2 通导感能力量化方式

1) 通信能力

通信能力包括通信组网能力、通信传输能力等。通信组网能力可用组网覆盖率、组网能耗以及组网成本等量化。通信传输能力可用数据速率、中断概率、能量效率等量化。由于应急场景环境复杂、变化动态,需根据信道状态信息(CSI, channel state information)的获取情况选择合适的量化指标。在完备 CSI 下,可根据信道具体值计算数据速率;在统计或部分 CSI 下,可根据信道统计值计算遍历速率、中断概率等。此外,考虑能量和功率有限情况,可利用能量效率

(EE, energy efficiency) 指标衡量网络性能。

2) 导航能力

导航能力包括定位频度、定位误差等。定位频度与相邻两次单次定位间隔大小有关。定位误差指估计值和真实值的偏差,可用均方误差(MSE, mean-square error)和均方根误差(RMSE, root mean square error)量化。理论研究通常用几何精度因子(GDOP, geometric dilution precision)量化定位方向上的估计误差,表示基本测距误差受发射端和接收端位置关系影响被放大的程度;使用克拉美罗下界(CRLB, Cramer-Rao lower bound)量化无偏估计量所能达到的最小方差。CRLB 与 Fisher 信息矩阵有关^[16-17]。

3) 感知能力

感知能力包括感知时间、感知比例以及覆盖范围等。感知时间反映了数据感知的有效性和及时性。感知比例表示待感知任务数与总任务数的比值,比值越大表示感知比例越高。覆盖范围与无人机高度和感知角度有关^[18]。为执行感知任务,感知节点应覆盖所有感知区域。

表 1 总结了通导感服务需求量化的主要指标。值得注意的是,应急无人机组网能有效解决应急场景中通信缺失、卫星拒止以及感知缺失等问题,然而通导感模式及能力量化指标需根据具体应急环境进行选择 and 组合。

2 无人机单目标部署模式及能耗分析

在确定通导感模式和能力量化指标后,解决应急场景中资源有限与应急紧迫业务刚性需求矛盾的另一关键问题是如何将资源分配和决策问题建立为资源管理问题。

本节将首先描述通导感一体化应急场景和信道模型,然后详细讨论通信、导航和感知单服务需求下的无人机单目标部署和能耗分析。

2.1 场景描述

通导感一体化场景需部署无人机实现对地面用户的通导感服务支持,如图 2 所示。定义用户集合为 $\mathcal{U} = \{1, \dots, u, \dots, |\mathcal{U}|\}$ 。假设所有用户位于水平面,可请求通导感中的一种或多种服务。定义用户 u 的坐标为 $\mathbf{q}_u = [x_u, y_u, 0]$, 状态向量为 $\mathbf{r}_u^{\mathcal{U}} = [r_u^c, r_u^p, r_u^s]$, 其中 r_u^c 、 r_u^p 和 r_u^s 均为二元变量,表示用户的通导感需求。当用户请求通导感服务时,对应变量为 1, 否则为 0。例如图 2 中 $\mathbf{r}_1^{\mathcal{U}} = [1, 0, 0]$

表 1 通导感服务需求量化的主要指标

服务	指标	描述	数学模型
通信	数据速率	信道信息传输速率上限	$r = B \log(1 + \text{SNR})$, B 表示传输带宽, SNR 表示信噪比
	中断概率	链路容量或信噪比小于阈值的概率	$\Pr\{r < r_{\min}\}$, r_{\min} 表示最小速率需求
	能量效率	单位能耗的数据速率	$\text{EE} = \frac{r}{E}$, E 表示总能耗
导航	均方误差	估计量与未知量的距离平方的期望	$\text{MSE} = \mathbb{E}[(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})^T]$, $\hat{\mathbf{x}}$ 表示估计值, \mathbf{x} 表示真实值
	几何精度因子	基本测距误差受发射端和接收端位置关系影响被放大的程度	$\text{GDOP} = \frac{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{P})}}{c\sigma_s}$, $\text{tr}(\mathbf{P})$ 表示估计误差的协方差矩阵的迹, c 表示光速, σ_s 表示到达时间的平均标准差
	克拉美罗下界	无偏估计量所能达到的最小方差	$\text{CRLB} = \mathbf{F}^{-1}$, $\mathbf{F} = \mathbb{E}\left[\frac{\partial \ln p(\mathbf{z} \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \left(\frac{\partial \ln p(\mathbf{z} \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\right)^T\right]$, \mathbf{z} 表示观测值, \mathbf{x} 表示真实值
感知	感知比例	感知任务数与总任务数的比值	$\frac{N_s}{N_{\text{total}}}$, N_s 表示感知任务数, N_{total} 表示总任务数
	覆盖范围	感知覆盖范围	$H \tan(\theta)$, H 表示无人机高度, θ 表示感知角度

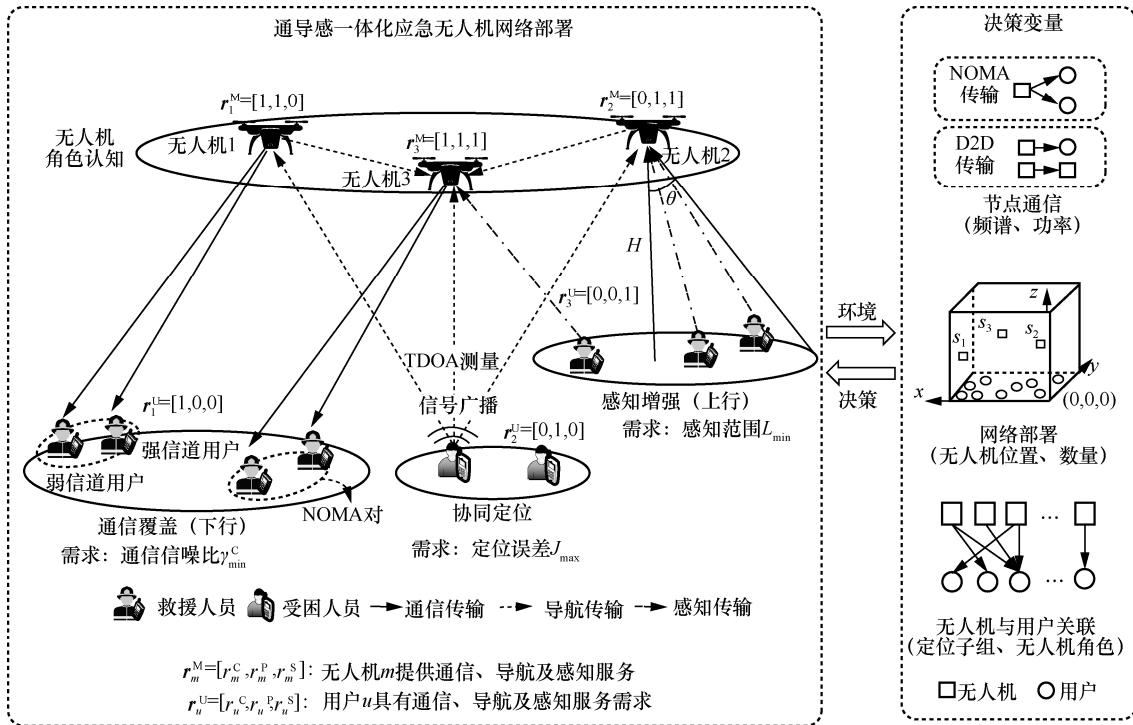


图 2 通导感一体化应急无人机网络部署决策示意

表示用户 1 具有通信服务需求。根据用户的服务需求, 将 \mathcal{U} 分为通信、导航及感知用户, 用户集合分别表示为 \mathcal{U}^C 、 \mathcal{U}^P 和 \mathcal{U}^S 。

定义无人机集合为 $\mathcal{M} = \{1, \dots, m, \dots, |\mathcal{M}|\}$, 无人机 m 的坐标为 $\mathbf{s}_m [x_m, y_m, z_m]$, 状态向量为 $\mathbf{r}_m^M = [r_m^C, r_m^P, r_m^S]$ 。每架无人机可提供通导感中的一种或多种服务。例如图 2 中 $\mathbf{r}_1^M = [1, 1, 0]$ 表示无人机 1 提供通信和导航服务。根据无人机的服务情况, 将 \mathcal{M}

分为通信、导航及感知无人机集合, 分别表示为 \mathcal{M}^C 、 \mathcal{M}^P 和 \mathcal{M}^S 。由于无人机的续航能力有限, 定义 N_{\max} 表示无人机的最大服务次数。任意一架无人机执行一次通信、导航或感知服务即作为一次服务。本文考虑旋翼无人机部署。表 2 总结了本文使用的主要参数。

2.2 信道模型

无人机 m 与用户 u 的通信距离表示为 $d_{m,u}^{\text{AG}} = \|\mathbf{s}_m - \mathbf{q}_u\|$, 该空地 (AG, air-to-ground) 信道

表 2 主要参数

参数	定义	参数	定义
\mathcal{U}^C 、 \mathcal{U}^P 和 \mathcal{U}^S	通信、导航及感知服务用户集合	\mathcal{Q}	观察时隙集合
\mathcal{M}^C 、 \mathcal{M}^P 和 \mathcal{M}^S	通信、导航及感知无人机集合	\mathcal{M}	无人机集合
\mathbf{P} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{S}	无人机功率分配、频谱分配及位置矩阵	\mathcal{U}	用户集合
\mathcal{G}_m^C 、 \mathcal{G}_m^P 和 \mathcal{G}_m^S	无人机 m 提供通信、导航或感知服务时的能耗	\mathcal{A}	无人机与通导感用户关联
$\alpha_{m,u}^C$ 、 $\alpha_{m,u}^P$ 和 $\alpha_{m,u}^S$	无人机 m 是否为用户 u 提供通信、导航或感知服务	E^P	无人机推动功耗
γ_{\min}^C 、 γ_{\min}^P 和 γ_{\min}^S	通信、导航及感知服务的 SINR 需求	E_m^H	无人机 m 的悬停功耗
C_0 、 C_1 和 C_2	通信、导航及感知服务数据大小	C_k	无人机定位子组 k
$\gamma_{m,u}^C$ 和 $R_{m,u}^C$	无人机 m 与通信用户 u 间 SINR 和数据速率	P_{\max}	无人机最大发射功率
$\gamma_{u,m}^{P,U}$ 和 $R_{u,m}^{P,U}$	无人机 m 与导航用户 u 间 SINR 及数据速率	B_m	无人机 m 的频谱带宽
$\gamma_{m,u}^S$ 和 $R_{m,u}^S$	无人机 m 与感知用户 u 间 SINR 和数据速率	P_{total}	无人机总发射功率
$\gamma_{k_1,k_0}^{P,V}$ 和 $R_{k_1,k_0}^{P,V}$	副站无人机 k_1 与主站无人机 k_0 的 SINR 及数据速率	$h_{m,u}^{\text{AG}}$	无人机 m 与用户 u 间信道增益
$\gamma_{k_2,k_0}^{P,V}$ 和 $R_{k_2,k_0}^{P,V}$	副站无人机 k_2 与主站无人机 k_0 的 SINR 及数据速率	$h_{m,n}^{\text{AA}}$	无人机 m 与无人机 n 间信道增益
$I_{u,k}^P$	无人机子组 C_k 是否为导航用户 u 提供服务	N_{\max}	无人机最大服务次数
\mathbf{s}_m	无人机 m 位置向量	\mathbf{q}_u	用户 u 位置向量
\mathbf{r}_m^M	无人机 m 状态向量	\mathbf{r}_u^U	用户 u 状态向量
B_{total}	无人机总频谱带宽	σ^2	噪声功率大小
d_{\min}	无人机间安全距离	L_{\min}	感知半径需求
d_{\max}	无人机最大移动距离	J_{\max}	最大定位误差

增益建模为

$$h_{m,u}^{\text{AG}} = \sqrt{\beta_{m,u}^{\text{AG}} g_{m,u}^{\text{AG}}} \quad (1)$$

其中， $\beta_{m,u}^{\text{AG}} = \beta_0 (d_{m,u}^{\text{AG}})^{-\alpha}$ 表示大尺度信道功率增益， $g_{m,u}^{\text{AG}}$ 表示小尺度衰落系数， β_0 表示在参考距离为 d_0 时的大尺度信道功率增益， α 表示信道衰落系数。由于无人机与用户间存在视线分量，假设 $g_{m,u}^{\text{AG}}$ 服从莱斯 (Rician) 衰落模型^[19]。

无人机 m 与无人机 n 的通信距离表示为 $d_{m,n}^{\text{AA}} = \|\mathbf{s}_m - \mathbf{s}_n\|$ ，该空空 (AA, air-to-air) 信道增益建模为

$$h_{m,n}^{\text{AA}} = \sqrt{\beta_{m,n}^{\text{AA}} g_{m,n}^{\text{AA}}} \quad (2)$$

其中， $\beta_{m,n}^{\text{AA}} = \beta_0 (d_{m,n}^{\text{AA}})^{-\alpha}$ 表示大尺度信道功率增益， $g_{m,n}^{\text{AA}}$ 表示小尺度衰落系数，服从莱斯衰落模型。各通信链路分布独立。

2.3 无人机推动能耗

假设所有无人机具有相同速度 V ，其单位时间的推动能耗可表示为^[20]

$$E^P = P_0 \left(1 + \frac{3V^3}{\ell^2} \right) + P_1 \left(\left(1 + \frac{V^4}{4v_r^4} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{V^2}{2v_r^2} \right)^2 + \frac{1}{2} AV^3 \quad (3)$$

其中， P_0 、 P_1 、 ℓ 、 v_r 和 A 均为常数，与无人机重量、机翼面积、空气密度等因素相关。

结合 E^P 表达式，当无人机 m 的悬停高度为 z_m 时，其单位时间的悬停能耗表示为

$$E_m^H = P_0 + P_1 + \Gamma (z_m - z_0) \quad (4)$$

其中， $P_0 + P_1$ 表示无人机高度为 z_0 时的悬停功耗， $\Gamma > 0$ 表示电动机速度乘数^[21]。

2.4 通信模式及能耗

1) 通信模式

当通信无人机服务多个通信用户时，该无人机利用 NOMA 技术进行数据传输，以解决用户信道质量不均衡问题。

根据用户数量和频谱复用情况，用户对包括 NOMA 对、OMA 对以及单用户对等类型。具体来说，当任意两用户与无人机间信道功率增益满足信道差最小值需求约束 ϵ_0 时，可作为 NOMA 用户对复用频谱。将 NOMA 对中弱 (信道) 用户和强 (信道) 用户分别标记为 W 和 S ，满足 $\frac{|h_{m,S}^{\text{AG}}|^2}{|h_{m,W}^{\text{AG}}|^2} \geq \epsilon_0$ 。弱

用户将强用户信号作为干扰以解调信号，强用户则

利用串行干扰消除（SIC, successive interference cancellation）技术移除弱用户信号^[22]。因此，弱用户和强用户的信干噪比可分别表示为

$$\begin{aligned}\gamma_{m,W}^C &= \frac{p_{m,W} |h_{m,W}^{AG}|^2}{|h_{m,W}^{AG}|^2 p_{m,S} + \sigma^2} \\ \gamma_{m,S}^C &= \frac{p_{m,S} |h_{m,S}^{AG}|^2}{\sigma^2}\end{aligned}\quad (5)$$

其中， $p_{m,W}$ 和 $p_{m,S}$ 分别表示无人机 m 分配给弱用户和强用户的发射功率， σ^2 表示噪声功率。此时，无人机 m 与弱用户和强用户的数据速率可分别表示为 $R_{m,W}^C = B_m \text{lb}(1 + \gamma_{m,W}^C)$ 和 $R_{m,S}^C = B_m \text{lb}(1 + \gamma_{m,S}^C)$ 。

当两用户不满足信道差值约束时，将作为 OMA 用户对平分频谱，不产生复用干扰。定义无人机 m 到用户 u 的发射功率为 $p_{m,u}$ ，其信噪比和数据速率可分别表示为 $\gamma_{m,u}^C = p_{m,u} |h_{m,u}^{AG}|^2 (\sigma^2)^{-1}$ 和 $R_{m,u}^C = \frac{B_m \text{lb}(1 + \gamma_{m,u}^C)}{2}$ 。此外，由于单用户对仅包含一个用户，因此该用户可使用专用频谱且没有复用干扰。此时无人机 m 与用户 u 间数据速率为 $R_{m,u}^C = B_m \text{lb}(1 + \gamma_{m,u}^C)$ 。

定义 γ_{\min}^C 为通信用户最小信干噪比需求。当无人机 m 与用户 u 间信干噪比满足 $\gamma_{m,u}^C \geq \gamma_{\min}^C$ 时，则可为用户 u 提供通信服务。同时，定义二元变量 $\alpha_{m,u}^C$ 表示无人机 m 与用户 u 的关联关系，则有

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

2) 通信能耗

通信无人机可服务多个请求通信服务的用户。通信无人机服务能耗包括传输能耗和悬停能耗，其悬停时间由具有最大传输时延的用户所决定。定义无人机 m 服务的通信用户集合为 \mathcal{U}_m^C ，通信服务的数据大小为 C_0 ，其通信能耗为

$$\mathcal{G}_m^C = C_0 \left(\underbrace{\varphi^H E_m^H \max_{u \in \mathcal{U}_m^C} \left(\frac{1}{R_{m,u}^C} \right)}_{\text{悬停}} + \underbrace{\sum_{u \in \mathcal{U}_m^C} p_{m,u} \frac{1}{R_{m,u}^C}}_{\text{传输}} \right) \quad (7)$$

其中， φ^H 表示悬停能耗与通信能耗间的权重系数。

2.5 导航模式及能耗

1) 导航模式

TDOA 定位方法具有高测距精度、易实现、低成本等特点。尽管 TDOA 需要定位节点间时钟同步，但不要求定位节点与待定位用户时间同步。因此本文考虑部署的无人机利用 TDOA 进行协作定位。无人机间可通过全球定位系统（GPS, global positioning system）获得位置信息并进行时间同步校准。为确定地面节点的二维坐标，至少需要三架无人机进行协同定位。

首先，由于信道具有对偶性，假设无人机-用户的上行链路与下行链路信道功率增益值近似相等。定义用户发射功率为 p_U ，无人机 m 与用户 u 的信噪比和数据速率可分别表示为 $\gamma_{m,u}^{P,U} = \frac{p_U |h_{m,u}^{AG}|^2}{\sigma^2}$ 和 $R_{m,u}^{P,U} = B_m \text{lb}(1 + \gamma_{m,u}^{P,U})$ 。定义 γ_{\min}^P 为导航用户最小信干噪比需求。当信干噪比满足 $\gamma_{m,u}^{P,U} \geq \gamma_{\min}^P$ 时，则无人机 m 可为用户 u 提供导航服务。

定义二元变量 $\alpha_{m,u}^P$ 表示无人机 m 是否为用户 u 提供导航服务，即

$$\alpha_{m,u}^P = \begin{cases} 1, & \text{无人机 } m \text{ 为用户 } u \text{ 提供导航服务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

接下来，定义包含所有三架无人机的集合为 $\mathcal{K} = \{C_1, \dots, C_k, \dots, C_K\}$ ，无人机子组总数为 K 。 C_k 为第 k 个无人机子组，表示为 $C_k = \{k_0, k_1, k_2\}$ ，其中， k_0 表示主站无人机， k_1 和 k_2 表示两架副站无人机。副站无人机使用正交频谱将测距信息及自身位置信息发送给主站无人机。候选无人机子组中的无人机需同时满足位置和通信需求。

定义 C_k 中三架无人机（即 k_0 与 k_1 和 k_2 ）的相对位置矩阵为

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

当导航用户位置可解时， \mathbf{A}_k 需为满秩矩阵，即

$$\text{rank}(\mathbf{A}_k) = 2 \quad (10)$$

具体推导参见附录 1。

副站无人机使用正交频谱将测距信息及自身位置信息发送给主站无人机。定义副站无人机 k_1 和 k_2 与主站无人机 k_0 间的信道增益分别为 h_{k_1,k_0}^{AA} 和

h_{k_2, k_0}^{AA} , 其信噪比分别为 $\gamma_{k_1, k_0}^{P,V} = \frac{p_{k_1} |h_{k_1, k_0}^{AA}|^2}{\sigma^2}$ 和 $\gamma_{k_2, k_0}^{P,V} = \frac{p_{k_2} |h_{k_2, k_0}^{AA}|^2}{\sigma^2}$, 其中 p_{k_2} 和 p_{k_1} 分别为无人机 k_2 和 k_1 的发射功率。为满足导航服务的数据传输需求 γ_{\min}^P , 要求

$$\gamma_{k_1, k_0}^{P,V} \geq \gamma_{\min}^P, \quad \gamma_{k_2, k_0}^{P,V} \geq \gamma_{\min}^P \quad (11)$$

对应数据速率为 $R_{k_1, k_0}^{P,V} = B_{k_1} \text{lb}(1 + \gamma_{k_1, k_0}^{P,V})$ 和 $R_{k_2, k_0}^{P,V} = B_{k_2} \text{lb}(1 + \gamma_{k_2, k_0}^{P,V})$, 其中, B_{k_1} 和 B_{k_2} 表示分配给无人机 k_1 和 k_2 的带宽。图3为无人机子组 C_k 与用户 u 间数据速率对应关系。

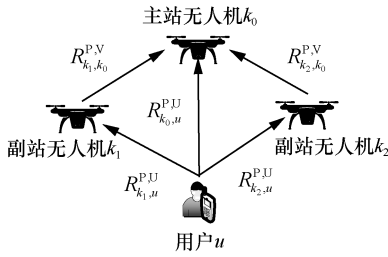


图3 无人机子组与用户间数据速率对应关系

根据式(10)和式(11), 候选无人机子组 S^P 为

$$S^P = \{C_k \mid \text{rank}(A_k) = 2 \text{ 且 } \gamma_{k_1, k_0}^{P,V} \geq \gamma_{\min}^P, \gamma_{k_2, k_0}^{P,V} \geq \gamma_{\min}^P, \forall C_k \subset \mathcal{K}\} \quad (12)$$

最后, 结合式(8)和式(12), 定义 $I_{u,k}^P$ 表示无人机子组 $C_k \subset \mathcal{K}^P$ 是否能为用户 u 提供导航服务, 即

$$I_{u,k}^P = \begin{cases} 1, & \sum_{m \in C_k} \alpha_{m,u}^P = 3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)表明, 当无人机子组 C_k 中三架无人机都为用户 u 提供导航服务时, 该子组可支持用户定位。

当无人机子组 C_k 对用户 u 提供导航服务时, 利用 CRLB^[16,23] 的迹 $J_{u,k}$ 衡量定位性能, 表示为

$$J_{u,k} = \text{tr}(\mathbf{Q}_{u,k}^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{Q}_{u,k})^{-1} \quad (14)$$

其中, $\text{tr}(\bullet)$ 表示矩阵的迹运算。

$$\mathbf{Q}_{u,k} = \begin{bmatrix} x_u - x_{k_1} & x_u - x_{k_0} & y_u - y_{k_1} & y_u - y_{k_0} \\ r_{k_1} & r_{k_0} & r_{k_1} & r_{k_0} \\ x_u - x_{k_2} & x_u - x_{k_0} & y_u - y_{k_2} & y_u - y_{k_0} \\ r_{k_2} & r_{k_0} & r_{k_2} & r_{k_0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_k = \text{cov}(\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T)$$

$$\mathbf{e}_k = [cn_{k_1, k_0}, cn_{k_2, k_0}]^T \quad (15)$$

其中, c 表示光速, n_{k_1, k_0} 和 n_{k_2, k_0} 分别表示副站无人机 k_1 和 k_2 与主站无人机 k_0 的时差测量误差。

2) 导航能耗

在导航服务中, 存在主站无人机和副站无人机 2 种导航无人机角色。

主站无人机不发射信号, 因此不产生传输能耗, 只有悬停能耗, 其悬停时间包括用户信号广播和副站无人机数据传输两部分。定义导航服务的数据大小为 C_1 , 当第 k 个导航子组(即 $C_k = \{k_0, k_1, k_2\}$) 服务导航用户 u 时, 主站无人机 k_0 的导航能耗为

$$\mathcal{G}_{u, k_0}^P = C_1 \varphi^H E_{k_0}^H \underbrace{\left(\max_{m \in C_k} \frac{1}{R_{m,u}^{P,U}} + \max \left\{ \frac{1}{R_{k_1, k_0}^{P,V}}, \frac{1}{R_{k_2, k_0}^{P,V}} \right\} \right)}_{\text{悬停}} \quad (16)$$

其中, $E_{k_0}^H$ 表示无人机 k_0 的悬停功耗, $\max_{m \in C_k} \frac{1}{R_{m,u}^{P,U}}$ 表示用户传输单位比特数据时子组 C_k 中无人机的最长接收时间, $\max \left\{ \frac{1}{R_{k_1, k_0}^{P,V}}, \frac{1}{R_{k_2, k_0}^{P,V}} \right\}$ 表示副站无人机 k_1 和 k_2 向主站无人机 k_0 传输单位比特数据的最长时间。

副站无人机的导航服务能耗包括传输能耗和悬停能耗。副站无人机 k_1 和 k_2 的导航能耗可分别表示为

$$\mathcal{G}_{u, k_1}^P = C_1 \underbrace{\left(p_{k_1} \frac{1}{R_{k_1, k_0}^{P,V}} \right)}_{\text{传输}} + \varphi^H E_{k_1}^H \underbrace{\left(\max_{m \in C_k} \frac{1}{R_{m,u}^{P,U}} + \frac{1}{R_{k_1, k_0}^{P,V}} \right)}_{\text{悬停}}$$

$$\mathcal{G}_{u, k_2}^P = C_1 \underbrace{\left(p_{k_2} \frac{1}{R_{k_2, k_0}^{P,V}} \right)}_{\text{传输}} + \varphi^H E_{k_2}^H \underbrace{\left(\max_{m \in C_k} \frac{1}{R_{m,u}^{P,U}} + \frac{1}{R_{k_2, k_0}^{P,V}} \right)}_{\text{悬停}} \quad (17)$$

其中, $E_{k_1}^H$ 和 $E_{k_2}^H$ 分别表示无人机 k_1 和 k_2 的悬停功耗。

结合式(16)和式(17), 根据导航无人机的不同角色, 为用户 u 提供定位服务的无人机 m 的导航能耗为

$$\mathcal{G}_{m,u}^P = \begin{cases} \mathcal{G}_{u, k_0}^P, & I_{u,k}^P = 1 \text{ 且 } m \text{ 为主站无人机 } k_0 \\ \mathcal{G}_{u, k_1}^P \text{ 或 } \mathcal{G}_{u, k_2}^P, & I_{u,k}^P = 1 \text{ 且 } m \text{ 为副站无人机 } k_1 \text{ 或 } k_2 \end{cases} \quad (18)$$

回顾式(13), 式(18)中 $I_{u,k}^P = 1$ 表示无人机子组 C_k 为用户 u 提供导航服务。定义 \mathcal{U}_m^P 表示无人机 m 服务的导航用户集合, 其导航能耗表示为

$$\mathcal{G}_m^P = \sum_{u \in \mathcal{U}_m^P} \mathcal{G}_{m,u}^P \quad (19)$$

2.6 感知模式及能耗

1) 感知模式

为提供感知服务，感知无人机需覆盖整个待感知区域。定义感知区域半径为 L_{\min} ，无人机传感器能探测的最大角度为 θ_0 ^[18]，则感知无人机 m 的高度 z_m 需满足

$$z_m \tan \theta_0 \geq L_{\min} \quad (20)$$

在感知模式中，用户通过时分多址（TDMA, time division multiple access）将数据上传给无人机。定义用户发射功率为 p_U ，无人机 m 接收到用户 u 数据的上行链路信干噪比为

$$\gamma_{m,u}^S = \frac{p_U |h_{m,u}^{\text{AG}}|^2}{\sigma^2} \quad (21)$$

此时，无人机 m 与用户 u 间的数据速率可表示为 $R_{m,u}^S = B_m \log(1 + \gamma_{m,u}^S)$ 。

定义 γ_{\min}^S 表示感知用户最小信干噪比需求。当无人机 m 与用户 u 间信干噪比满足 $\gamma_{m,u}^S \geq \gamma_{\min}^S$ 时，则可为用户 u 提供感知服务。同时，定义二元变量 $\alpha_{m,u}^S$ 表示无人机 m 是否为用户 u 提供感知服务，即

$$\alpha_{m,u}^S = \begin{cases} 1, \text{无人机}m\text{为用户}u\text{提供感知服务} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

因此，感知无人机 m 所服务的感知用户集合为 $U_m^S = \{u | \alpha_{m,u}^S = 1, \forall u \in U^S\}$ 。为满足所有感知用户的传输需求，每个请求感知服务的用户至少有一架无人机提供服务。

2) 感知能耗

感知无人机的服务能耗为悬停能耗，其悬停时间由用户传输时间决定。已知感知无人机 m 服务的感知用户集合为 U_m^S 。定义感知服务的数据大小为 C_2 ，其感知能耗为

$$\mathcal{G}_m^S = C_2 \varphi^H E_m^H \sum_{u \in U_m^S} \frac{1}{R_{m,u}^S} \quad (23)$$

其中， E_m^H 表示无人机 m 的悬停功耗。

3 通导感一体化无人机低能耗部署问题

第2节讨论了无人机在通信、导航及感知服务中的单目标部署模式及能耗。在通导感一体化场景中，需通过资源分配和部署决策以同时满足通导感多目标服务需求和有限资源约束，并降低无人机部署能耗。此外，在实际的应急场景中，用户位置和通导感需求随观察时间动态变化，需自适应调整和

更新无人机部署。

本节将首先建模通导感一体化应急无人机网络低能耗部署问题，然后提出一种低能耗部署算法实现问题分解和优化。

3.1 问题建模

将观察时期分为 Q 个时隙，时隙集合表示为 $\mathcal{Q} = \{1, \dots, q, \dots, Q\}$ 。由于飞行能力限制，无人机 m 在相邻两次部署的移动距离需小于最大值 d_{\max} ，即

$$\|s_m(q+1) - s_m(q)\| \leq d_{\max} \quad (24)$$

同时，无人机间安全距离需不小于最小值 d_{\min} ，即

$$\|s_m(q) - s_n(q)\| \geq d_{\min} \quad (25)$$

在时隙 q ，结合第2节讨论的不同角色无人机的服务能耗及推动能耗，所有通导感无人机的部署能耗为

$$E(q) = \sum_{m \in \mathcal{M}(q)} (r_m^C(q) \mathcal{G}_m^C(q) + r_m^P \mathcal{G}_m^P(q) + r_m^S \mathcal{G}_m^S(q) + \varphi^P E^P \|s_m(q) - s_m(q-1)\| V^{-1}) \quad (26)$$

其中， $\varphi^P > 0$ 为权重系数，表示飞行能耗在总能耗中的重要程度； $r_m^C(q)$ 、 $r_m^P(q)$ 和 $r_m^S(q)$ 表示无人机 m 在时隙 q 是否提供通信、感知或导航服务； $\|s_m(q) - s_m(q-1)\| V^{-1}$ 表示无人机 m 在相邻时隙移动的飞行时间。当 $q=1$ 时， $s_m(0)$ 表示无人机 m 的起点坐标，设置为坐标原点。

因此，观察时期 \mathcal{Q} 内所有通导感无人机的部署总能耗为

$$E_{\text{total}} = \sum_{q \in \mathcal{Q}} E(q) \quad (27)$$

以最小化无人机部署总能耗为优化目标，以通导感服务需求及有限资源为约束，联合优化无人机与通导感用户关联、多角色无人机通信资源优化以及无人机部署位置，该通导感一体化低能耗部署问题建模为

$$\mathcal{P}_1: \min_{\{A(q)\}, \{P(q)\}, \{B(q)\}, \{S(q)\}} E_{\text{total}}$$

$$\text{s.t. C1: } \sum_{m \in \mathcal{M}(q)} \alpha_{m,u}^C \geq 1, \forall u \in U^C(q), q \in \mathcal{Q}$$

$$\text{C2: } \sum_{m \in \mathcal{M}(q)} \alpha_{m,u}^S \geq 1, \forall u \in U^S(q), q \in \mathcal{Q}$$

$$\text{C3: } \sum_{C_k \subset \mathcal{K}(q)} I_{u,k}^P \geq 1, \forall u \in U^P(q), q \in \mathcal{Q}$$

$$\text{C4: } \sum_{u \in U(q)} (\alpha_{m,u}^C + \alpha_{m,u}^P + \alpha_{m,u}^S) \leq N_{\max}, \forall m \in \mathcal{M}(q), q \in \mathcal{Q}$$

$$\text{C5: } 0 \leq p_{m,S} < p_{m,W} \leq P_{\max}, \forall m \in \mathcal{M}(q), q \in \mathcal{Q}$$

$$\begin{aligned}
 \text{C6: } & 0 \leq p_{m,s} + p_{m,w} \leq P_{\text{total}}, \forall m \in \mathcal{M}(q), q \in \mathcal{Q} \\
 \text{C7: } & 0 \leq p_m \leq P_{\text{max}}, \forall m \in \mathcal{M}(q), q \in \mathcal{Q} \\
 \text{C8: } & 0 \leq \sum_{m \in \mathcal{M}(q)} B_m \leq B_{\text{total}}, \forall q \in \mathcal{Q} \\
 \text{C9: } & z_m \tan \theta_0 \geq L_{\text{min}}, \forall m \in \mathcal{M}^S(q), q \in \mathcal{Q} \\
 \text{C10: } & 0 \leq I_{u,k}^p J_{u,k} \leq J_{\text{max}}, \forall u \in \mathcal{U}^p(q), C_k \subset \mathcal{K}(q), q \in \mathcal{Q} \\
 \text{C11: } & s_m \in \mathcal{S}, \forall m \in \mathcal{M}(q), q \in \mathcal{Q} \\
 \text{C12: } & \|s_m(q) - s_n(q)\| \geq d_{\text{min}}, \forall m, n \in \mathcal{M}(q), m \neq n, q \in \mathcal{Q} \\
 \text{C13: } & \|s_m(q+1) - s_m(q)\| \leq d_{\text{max}}, \forall m \in \mathcal{M}(q), q \in \mathcal{Q} \quad (28)
 \end{aligned}$$

式(28)中, 优化变量包括无人机与通导感用户关联 $\mathcal{A}(q) = \{\mathcal{A}^C(q), \mathcal{A}^P(q), \mathcal{A}^S(q)\}$, 其中, $\mathcal{A}^C(q) = (\alpha_{m,u}^C)_{|\mathcal{M}(q)| \times |\mathcal{U}^C(q)|}$ 、 $\mathcal{A}^P(q) = (\alpha_{m,u}^P)_{|\mathcal{M}(q)| \times |\mathcal{U}^P(q)|}$ 和 $\mathcal{A}^S(q) = (\alpha_{m,u}^S)_{|\mathcal{M}(q)| \times |\mathcal{U}^S(q)|}$ 分别表示无人机与通信、导航及感知用户的关联关系; 无人机功率分配策略 $\mathbf{P}(q) = \{\mathbf{P}^C(q), \mathbf{P}^P(q)\}$, 其中, $\mathbf{P}^C(q) = (p_{m,u})_{|\mathcal{M}(q)| \times |\mathcal{U}^C(q)|}$ 和 $\mathbf{P}^P = (p_m)_{2|\mathcal{U}^P(q)| \times 1}$ 分别表示通信无人机与用户间发射功率以及导航无人机发射功率, $2|\mathcal{U}^P(q)| \times 1$ 表示每个导航用户需要两架副站无人机进行协同定位; 无人机频谱分配矩阵 $\mathbf{B}(q) = (B_m)_{1 \times |\mathcal{M}(q)|}$ 以及无人机位置矩阵 $\mathbf{S}(q) = [s_1(q), \dots, s_{|\mathcal{M}(q)|}(q)]$ 。

式(28)中约束 C1 和 C2 分别表示至少有一架无人机满足通信或感知业务用户需求; 约束 C3 表示每个导航用户至少存在一组导航无人机组服务; 约束 C4 表示每架无人机的最大服务次数为 N_{max} ; 约束 C5~C7 表示无人机的功率约束, 其中 P_{max} 和 P_{total} 分别表示无人机的最大发射功率和总功率; 约束 C8 表示分配给无人机的总带宽不超过 B_{total} ; 约束 C9 表示感知无人机的水平覆盖半径大于最小覆盖半径 L_{min} ; 约束 C10 表示用户定位误差需求, 其中 J_{max} 表示最大定位误差; 约束 C11 表示无人机部署位置区域 $\mathcal{S} = [X_{\text{min}}, Y_{\text{min}}, Z_{\text{min}}; X_{\text{max}}, Y_{\text{max}}, Z_{\text{max}}]$; 约束 C12 表示无人机间安全距离约束; 约束 C13 表示相邻时隙内无人机的移动距离约束。

3.2 通导感一体化无人机低能耗部署算法

因为 \mathcal{P}_1 是非凸非线性优化问题, 所以本文提出通导感一体化无人机低能耗部署 (ICNS-LEC, low-energy-consumption UAV deployment for integrated communication-navigating-sensing) 算法进行求解, 具体如算法 1 所示。ICNS-LEC 算法包括搜

索区域网格化、无人机部署和通信资源分配初始化、无人机部署和通信资源分配优化以及无人机位置更新 4 个阶段。

算法 1 通导感一体化无人机低能耗部署算法

输入 通导感用户集合 (即 \mathcal{U}^C 、 \mathcal{U}^P 和 \mathcal{U}^S)、网格边长 δ_0 、最大迭代次数 l_{max} 、收敛阈值 τ_0 、总时隙 \mathcal{Q} 、区域 $\mathcal{S} = [X_{\text{min}}, Y_{\text{min}}, Z_{\text{min}}; X_{\text{max}}, Y_{\text{max}}, Z_{\text{max}}]$

输出 无人机部署总能耗 E_{total}

第一步 搜索区域网格化

1) 根据 δ_0 将搜索区域 \mathcal{S} 网格化, 每个网格中心代表无人机可部署位置。

第二步 无人机部署和通信资源分配初始化

- 2) 为用户随机产生无人机候选部署位置。
- 3) 设置时隙 $q=1$, 输入通导感用户集合 $\mathcal{U}^C(q), \mathcal{U}^P(q), \mathcal{U}^S(q)$ 。
- 4) 初始化 $\{\mathbf{P}^{(0)}, \mathbf{B}^{(0)}, \mathbf{S}^{(0)}\}$: 利用贪婪算法为每个用户选择能耗最小的无人机部署位置 $\mathbf{S}^{(0)}$, 设置 $\mathbf{P}^{(0)}$ 中无人机发射功率为最大值 P_{max} , $\mathbf{B}^{(0)}$ 中无人机平分频谱 B_{total} 。

第三步 无人机部署和通信资源分配优化

- 5) 设置迭代次数 $l=0$, 能耗 $E^{(l)}=0$ 。
- 6) 求解无人机与通导感用户关联优化子问题 \mathcal{P}_{21} : 已知 $\{\mathbf{P}^{(l)}, \mathbf{B}^{(l)}, \mathbf{S}^{(l)}\}$, 求解 $\mathcal{A}^{(l+1)}$ (见 3.3 节)。
- 7) 求解多角色无人机通信资源优化子问题 \mathcal{P}_{22} : 已知 $\{\mathcal{A}^{(l+1)}, \mathbf{S}^{(l)}\}$, 求解 $\{\mathbf{P}^{(l+1)}, \mathbf{B}^{(l+1)}\}$ (见 3.4 节)。
- 8) 求解无人机部署优化子问题 \mathcal{P}_{23} : 已知 $\{\mathcal{A}^{(l+1)}, \mathbf{P}^{(l+1)}, \mathbf{B}^{(l+1)}\}$, 求解 $\mathbf{S}^{(l+1)}$ (见 3.5 节)。
- 9) 根据 $\{\mathcal{A}^{(l+1)}, \mathbf{P}^{(l+1)}, \mathbf{B}^{(l+1)}, \mathbf{S}^{(l+1)}\}$ 计算目标函数 $E^{(l+1)}$, 设置 $l=l+1$ 。

10) 重复步骤 6) ~ 步骤 9), 直到 $|E^{(l+1)} - E^{(l)}| \leq \tau_0$ 或 $l \geq l_{\text{max}}$ 。

11) 根据 $\{\mathcal{A}^*, \mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*, \mathbf{S}^*\}$ 计算 $E^*(q)$ 。

第四步 无人机位置更新

- 12) 设置 $q=q+1$, 输入通导感用户集合 $\mathcal{U}^C(q), \mathcal{U}^P(q), \mathcal{U}^S(q)$ 。
- 13) if $\{\mathcal{A}^*, \mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*, \mathbf{S}^*\}$ 满足用户通导感服务需求 (即 \mathcal{P}_1 中 C1~C3 和 C10), 根据 $\{\mathcal{A}^*, \mathbf{P}^*, \mathbf{B}^*, \mathbf{S}^*\}$ 计算 $E^*(q)$ 。
- 14) else
- 15) 返回第三步。

- 16) end if
 17) 重复步骤 12)~步骤 16), 直到 $q \geq Q$ 。
 18) 计算所有时隙的无人机部署总能耗 E_{total} 。

在搜索区域网格化阶段, 将部署区域划分为多个网格, 每个网格中心代表无人机可部署位置。

在无人机部署和通信资源分配初始化阶段, 利用贪婪算法初始化无人机部署。对于通信和感知用户, 首先根据用户通信和无人机覆盖需求确定无人机部署范围, 然后在部署范围内随机产生多个无人机位置, 并利用贪婪算法为每个通信及感知用户选择部署能耗最小的位置作为无人机初始部署位置; 对于导航用户, 首先根据用户通信需求确定无人机部署范围, 然后在部署范围内随机选择多个候选部署位置, 并根据无人机通信需求及位置约束, 从候选部署位置中产生多个无人机子组, 最后为每个导航用户选择能耗最小的无人机子组。设置无人机发射功率为最大值 P_{max} , 且无人机间平分频谱 B_{total} 。

在无人机部署和通信资源分配优化阶段, 需联合优化离散变量(即无人机与通导感用户关联)和连续变量(即通信资源和无人机位置)。本文将其拆分为3个优化子问题, 包括无人机与通导感用户关联优化子问题、多角色无人机通信资源优化子问题以及无人机部署优化子问题。通过3个子问题的迭代求解, 得到无人机部署及通信资源分配方案。表3总结了无人机部署和通信资源分配优化阶段的子问题优化变量和算法。

表3 无人机部署和通信资源分配优化阶段的子问题优化变量和算法

子问题	优化变量	算法
无人机与通导感用户关联优化	$\mathcal{A}(q)$	层次化匹配算法
多角色无人机通信资源优化	$\mathbf{P}(q)$ 和 $\mathbf{B}(q)$	凸优化
无人机部署优化	$\mathcal{S}(q)$	粒子群算法

最后, 在无人机位置更新阶段, 根据用户位置变化更新无人机部署。具体来说, 若当前无人机部署满足通导感用户需求时, 则计算无人机服务能耗; 若不满足, 则调整无人机位置以满足用户需求, 并计算无人机服务能耗与推动能耗。

在部署之前, 可派遣无人机基站巡航目标区域, 用户发送上行控制信令发起通导感定位服务需求, 例如导航用户发起定位服务请求^[24]并上报历史位置以指导后续无人机部署。

3.3 无人机与通导感用户关联优化子问题

在该子问题中, 已知无人机位置(即 $\mathcal{S}(q)$)及通信资源分配(即 $\mathbf{P}(q)$ 和 $\mathbf{B}(q)$), 需优化无人机与通导感用户关联变量(即 $\mathcal{A}(q)$)。结合问题 \mathcal{P}_1 中约束 C1~C4, 无人机与通导感用户关联优化子问题表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{21} : \min_{\mathcal{A}(q)} E(q) \\ \text{s.t. } \sum_{m \in \mathcal{M}(q)} \alpha_{m,u}^C \geq 1, \forall u \in \mathcal{U}^C(q) \\ \sum_{m \in \mathcal{M}(q)} \alpha_{m,u}^S \geq 1, \forall u \in \mathcal{U}^S(q) \\ \sum_{c_k \subset \mathcal{K}(q)} I_{u,k}^P \geq 1, \forall u \in \mathcal{U}^P(q) \\ \sum_{u \in \mathcal{U}(q)} (\alpha_{m,u}^C + \alpha_{m,u}^S + \alpha_{m,u}^P) \leq N_{\text{max}}, \forall m \in \mathcal{M}(q) \end{aligned} \quad (29)$$

回顾问题 \mathcal{P}_1 , 式(29)中优化变量具体为 $\mathcal{A}(q) = \{\mathcal{A}^C(q), \mathcal{A}^P(q), \mathcal{A}^S(q)\}$, 其中 $\mathcal{A}^C(q) = (\alpha_{m,u}^C)_{|\mathcal{M}(q)| \times |\mathcal{U}^C(q)|}$, $\mathcal{A}^P(q) = (\alpha_{m,u}^P)_{|\mathcal{M}(q)| \times |\mathcal{U}^P(q)|}$ 和 $\mathcal{A}^S(q) = (\alpha_{m,u}^S)_{|\mathcal{M}(q)| \times |\mathcal{U}^S(q)|}$ 分别表示无人机与通信、导航及感知用户的关联关系, $\alpha_{m,u}^C$ 、 $\alpha_{m,u}^P$ 和 $\alpha_{m,u}^S$ 均为 0-1 整数变量。因此 \mathcal{P}_{21} 为整数规划问题, 将利用图论和匹配理论求解。

相比通信和感知用户, 导航用户需多架无人机协同定位, 因此本文提出无人机与通导感用户层次化匹配算法, 首先满足导航用户需求, 再满足通信及感知用户需求。

导航用户与无人机子组关联层如图 4(a)所示。首先, 根据式(12), 基于无人机集合 \mathcal{M}' 构建候选导航无人机子组 \mathcal{S}^P , 将 \mathcal{S}^P 映射为点集 \mathcal{V} 。然后, 建立无人机子组 \mathcal{V} 与导航用户 \mathcal{U}^P 间的二分图 \mathcal{G}_1 , 无人机导航子组与导航用户间的边权值由无人机子组的导航能耗加权。最后, 利用改进贪婪算法为每个待导航用户选择能耗最小的无人机子组, 并确定无人机子组及导航用户与无人机关联 \mathcal{A}^P 。当已选出的无人机子组中存在无人机所服务的用户数超过最大服务次数 N_{max} , 则从 \mathcal{V} 中移除所有包含该无人机的无人机子组。例如, 在图 4(a)中, 根据导航用户与无人机子组关联结果, 可以得到第 1 组无人机服务 1 号~3 号导航用户, 第 5 组无人机服务 4 号导航用户。由于第 1 组无人机由 1 号~3 号无人机组成, 第 5 组无人机由 4 号~6 号无人机组成, 因此 {1,2,3} 号无人机均服务了 3 次用户, {4,5,6} 号无人机均服务了 1 次用户, 而无人机集合 \mathcal{M}' 中的 7 号无人机没有服务用户。

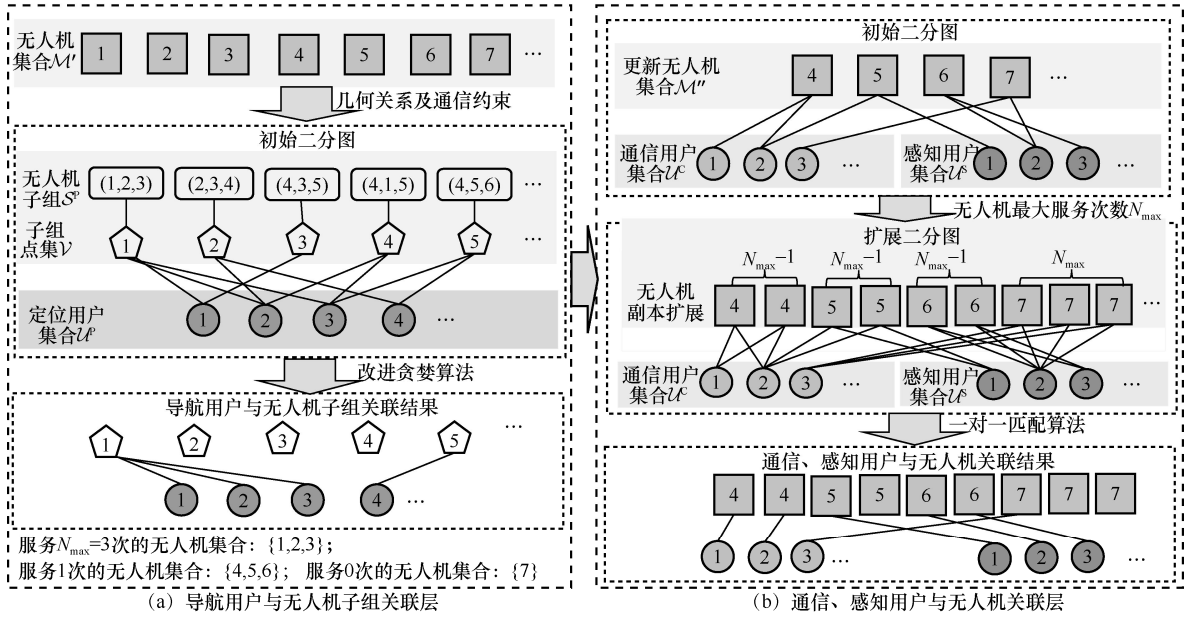


图 4 无人机与通导感用户层次化关联匹配算法示意 ($N_{\max}=3$)

通信、感知用户与无人机关联层如图 4(b)所示。首先，根据无人机集合 \mathcal{M}' 以及无人机与导航用户的关联矩阵 \mathbf{A}^p ，确定服务用户数小于最大服务次数 N_{\max} 的候选无人机集合 \mathcal{M}'' 。然后，建立无人机与通信及感知用户间的二分图 \mathcal{G}_2 。为简化求解过程，通信及感知用户与无人机间的边权值由无人机与用户的距离负值定义。由于每架无人机可为多个用户提供服务，因此无人机与通信、感知用户间的关联问题为一对多匹配问题。为求解该问题，根据每架无人机剩余服务次数扩展无人机节点，将该一对多匹配问题转换为一对一匹配问题。最后利用匹配算法得到通信、感知用户与无人机关联结果，即 \mathbf{A}^c 和 \mathbf{A}^s 。图 4 举例说明了 $N_{\max}=3$ 的情况。根据图 4(a) 中导航用户与无人机子组的关联结果，可得 4 号~6 号无人机均已服务 1 次，剩余可服务次数为 2，7 号无人机没有服务用户，剩余可服务次数为 3。因此在通信、感知用户与无人机的扩展二分图中，4 号~6 号无人机对应的边将扩展为 2 组副本，7 号无人机对应的边将扩展为 3 组副本。最后求解得到通信、感知用户与无人机关联关系。例如在图 4(b)中，4 号无人机服务 1 号和 2 号通信用户，5 号无人机服务 1 号感知用户，6 号无人机服务 2 号和 3 号感知用户，7 号无人机服务 3 号通信用户。

3.4 多角色无人机通信资源优化子问题

在该子问题中，已知无人机位置（即 $\mathbf{S}(q)$ ）及无人机与通导感用户关联（即 $\mathbf{A}(q)$ ），需优化通信

资源分配（即频谱 $\mathbf{B}(q)$ 和功率 $\mathbf{P}(q)$ ）。

为了简化，假设所有无人机平分频谱资源 B_{total} ，当无人机集合为 \mathcal{M}' 时， $B_m = \frac{B_{\text{total}}}{|\mathcal{M}'|}$ 。对于功率优化，由于在通导感一体化场景中，无人机存在单一角色（通信、导航以及感知）、双重角色（通信-导航、导航-感知以及通信-感知）及三重角色（通信-导航-感知），因此需根据无人机不同角色解决不同功率优化问题。值得注意的是，无人机将在不同时隙为用户提供服务，且感知无人机仅接收用户数据，不发送数据。因此，功率优化问题整体可分为三类：通信无人机功率优化、导航无人机功率优化以及通信-导航无人机功率优化。接下来将具体分析以上 3 种情况，并对其他情况进行说明。

1) 通信无人机功率优化

结合式(7)，通信无人机功率优化问题的优化目标可表示为

$$\mathcal{P}_{22.1} : \min_{\mathbf{p}_m^c} \left[C_0 \left(\varphi^H E_m^H \max_{u \in \mathcal{U}_m^c} \left(\frac{1}{R_{m,u}^c} \right) + \sum_{u \in \mathcal{U}_m^c} p_{m,u} \frac{1}{R_{m,u}^c} \right) \right] \quad (30)$$

其中，优化变量 $\mathbf{p}_m^c = (p_{m,u})_{u \in \mathcal{U}_m^c}$ 表示通信无人机 m 的发射功率向量， \mathcal{U}_m^c 表示其服务的通信用户集合。

当 $|\mathcal{U}_m^c| > 2$ 时，无人机将 \mathcal{U}_m^c 分成多个用户对。定义用户对集合为 $\mathcal{F}_m^c = \{1, \dots, f, \dots, F_m^c\}$ ，包括 NOMA 用户对、OMA 用户对及单用户对。所有用

用户对平分无人机 m 的频谱 B_m , 因此每个用户对频谱大小为 $\bar{B}_m = \frac{B_m}{F_m^c}$ 。与 OMA 对和单用户对不同,

在 NOMA 对中, 需优化无人机分配给强用户和弱用户的发射功率以满足用户功率和通信需求。

结合强用户和弱用户的速率表达式 (即 $R_{m,W}^c$ 和 $R_{m,S}^c$) 以及 \mathcal{P}_1 中功率约束 C5 和 C6, NOMA 对中功率优化子问题表示为

$$\begin{aligned} \min_{p_{m,W}, p_{m,S}} C_0 & \left(\varphi^H E_m^H \max \left(\frac{1}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,W}^c)}, \frac{1}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,S}^c)} \right) + \right. \\ & \left. \frac{p_{m,W}}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,W}^c)} + \frac{p_{m,S}}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,S}^c)} \right) \\ \text{s.t. C1: } & \gamma_{m,W}^c \geq \gamma_{\min}^c, \gamma_{m,S}^c \geq \gamma_{\min}^c \\ \text{C2: } & 0 \leq p_{m,S} < p_{m,W} \leq P_{\max} \\ \text{C3: } & 0 \leq p_{m,S} + p_{m,W} \leq P_{\text{total}} \end{aligned} \quad (31)$$

其中, 约束 C1 表示用户的信干噪比不小于最小阈值 γ_{\min}^c ; 约束 C2 和 C3 表示 NOMA 功率分配准则。

为求解式(31)中的非凸问题, 首先对目标函数进行转换。定义

$$t_m = \max \left(\frac{1}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,W}^c)}, \frac{1}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,S}^c)} \right) \quad (32)$$

表示无人机 m 所服务的通信用户传输单位比特数据的最长时间, 即任意用户传输单位比特数据的通信时延都需小于 t_m 。因此, 将式(31)转化为

$$\begin{aligned} \min_{p_{m,W}, p_{m,S}, t_m} C_0 & \left(\varphi^H E_m^H t_m + \frac{p_{m,W}}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,W}^c)} + \frac{p_{m,S}}{\bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,S}^c)} \right) \\ \text{s.t. C1: } & \bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,W}^c) \geq \frac{1}{t_m} \\ \text{C2: } & \bar{B}_m \text{lb}(1+\gamma_{m,S}^c) \geq \frac{1}{t_m} \\ \text{C3: } & \text{式(31)中约束C1~C3} \end{aligned} \quad (33)$$

式(33)中约束 C1 和 C2 源于式(32)。由于 t_m^{-1} 是关于 t_m 的凸函数, 约束 C1 为非凸的, 因此该问题仍为非凸问题。为求解式(33), 可利用连续凸逼近 (SCA, successive convex approximation) 方法^[25]将约束式(33)中约束 C1 和 C2 转换为线性约束, 然后通过 $p_{m,W}$ 、 $p_{m,S}$ 和 t_m 的迭代优化找到最优解以最小化目标函数。

在量化了所有用户对能耗后, 利用 KM (Kuhn-Munkres) 算法^[26]找到最优用户匹配以最小化该通信无人机的服务能耗。

2) 导航无人机功率优化

在无人机协同定位中, 主站无人机不传输数据, 仅接收两架副站无人机的定位信息。因此导航子组的导航无人机服务能耗将由副站无人机和用户决定。已知导航无人机子组 $C_k = \{k_0, k_1, k_2\}$, 以副站无人机 k_1 为例, 结合式(17), 该优化问题的优化目标为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{22.2}: \min_{p_{k_1}} C_1 & \left(p_{k_1} \frac{1}{R_{k_1, k_0}^{P,V}} + \varphi^H E_{k_1}^H \left(\max_{m \in C_k} \left(\frac{1}{R_{m,U}^{P,U}} \right) + \frac{1}{R_{k_1, k_0}^{P,V}} \right) \right) = \\ & \frac{C_1 (p_{k_1} + \varphi^H E_{k_1}^H)}{R_{k_1, k_0}^{P,V}} + \chi_{k_1}^P \end{aligned} \quad (34)$$

其中, 优化变量 p_{k_1} 表示副站无人机 k_1 的发射功率,

$\chi_{k_1}^P = C_1 \varphi^H E_{k_1}^H \max_{m \in C_k} \left(\frac{1}{R_{m,U}^{P,U}} \right)$ 表示与 p_{k_1} 无关的常数。结合 $R_{k_1, k_0}^{P,V}$ 的表达式和功率约束, 该功率优化问题等价于优化以下问题

$$\begin{aligned} \min_{p_{k_1}} & \frac{C_1 (p_{k_1} + \varphi^H E_{k_1}^H)}{B_{k_1} \text{lb}(1+\gamma_{k_1, k_0}^{P,V})} \\ \text{s.t. C1: } & 0 \leq p_{k_1} \leq P_{\max} \\ \text{C2: } & \gamma_{k_1, k_0}^{P,V} \geq \gamma_{\min}^P \end{aligned} \quad (35)$$

其中, $\gamma_{k_1, k_0}^{P,V}$ 表示副站无人机 k_1 和主站无人机 k_0 间的信干噪比。式(35)中仅存在单一优化变量, 当可行域存在时, 可利用 MATLAB 求得 p_{k_1} 的最优值。同样地, 可求得副站无人机 k_2 的最优功率 p_{k_2} 。最后根据副站无人机功率 p_{k_1} 和 p_{k_2} , 依据式(16)计算得到主站无人机 k_0 的导航能耗。

通信-导航无人机功率优化问题可结合问题 $\mathcal{P}_{22.1}$ 和 $\mathcal{P}_{22.2}$ 分为通信和导航 2 个部分进行功率优化。此处省略具体过程。

基于以上讨论, 可进一步计算得到双重和三重角色无人机的能耗。具体来说, 对于通信-感知 (或导航-感知) 无人机, 即在得到的通信 (或导航) 服务能耗上, 根据无人机服务的感知用户, 依据式(23)计算无人机的感知服务能耗; 对于通信-导航-感知无人机, 即在得到的通信和导航服务能耗上, 计算

无人机的感知服务能耗，最后得到无人机通感服务总能耗。

3.5 无人机部署优化子问题

在该子问题中，已知无人机与通感用户关联（即 $\mathcal{A}(q)$ ）以及通信资源分配（即 $\mathbf{P}(q)$ 和 $\mathbf{B}(q)$ ），需优化无人机部署（即 $\mathbf{S}(q)$ ）。

结合 \mathcal{P}_1 中约束 C9~C12，无人机部署子问题可以表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{23} : & \min_{\mathbf{S}(q)} E(q) \\ \text{s.t. C1:} & z_m \tan \theta_0 \geq L_{\min}, \forall m \in \mathcal{M}^S(q) \\ \text{C2:} & 0 \leq I_{u,k}^p J_{u,k} \leq J_{\max}, \forall u \in \mathcal{U}^p(q), C_k \in \mathcal{K}(q) \\ \text{C3:} & \mathbf{s}_m \in \mathcal{S}, \forall m \in \mathcal{M}(q) \\ \text{C4:} & \|\mathbf{s}_m(q) - \mathbf{s}_n(q)\| \geq d_{\min}, \forall m, n \in \mathcal{M}(q), m \neq n \end{aligned} \quad (36)$$

其中，优化变量 $\mathbf{S}(q) = [\mathbf{s}_1(q), \dots, \mathbf{s}_{|\mathcal{M}(q)}(q)]$ 为 $|\mathcal{M}(q)|$ 架无人机的部署位置矩阵。由于 \mathcal{P}_{23} 中约束的非凸非连续性，采用粒子群算法^[27]求解。

首先初始化粒子集合和更新速度。定义粒子集合为 \mathcal{D} ，每个粒子由随机选择的 $M'(1 \leq M' \leq M_{\max})$ 个网格组成，其中 M_{\max} 表示由部署区域 \mathcal{S} 确定的最远部署位置。在第 l 次迭代时，第 k 个粒子为 $\mathcal{O}_k(l)$ ，其第 m 位为 $\mathcal{O}_{k,m}(l)$ ，表示无人机 m 的部署位置。该粒子的更新速度为 $\mathbf{v}_k(l)$ ，其第 m 位为 $v_{k,m}(l)$ ，表示第 m 位的更新速度。然后，利用式(36)中约束构造惩罚函数，定义第 k 个粒子在第 l 次迭代时的适应度函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{J}_k(l) = & E_{\max} - E_k(l) - \\ & \underbrace{\kappa_1 \sum_{m \in \mathcal{O}_k(l)} r_m^S \max\{0, L_{\min} - z_m(l) \tan \theta_0\}}_{\text{C1: 覆盖范围约束}} - \\ & \underbrace{\kappa_2 \sum_{k \in \mathcal{K}(q)} \sum_{u \in \mathcal{U}^p(q)} I_{u,k}^p \max\{0, J_{u,k}(l) - J_{\max}\}}_{\text{C2: 定位误差约束}} - \\ & \underbrace{\kappa_3 \sum_{m \in \mathcal{O}_k(l)} \sum_{n \in \mathcal{O}_k(l), m \neq n} \max\{0, d_{\min} - \|\mathcal{O}_{k,m}(l) - \mathcal{O}_{k,n}(l)\|\}}_{\text{C4: 安全距离约束}} \end{aligned} \quad (37)$$

其中， E_{\max} 表示能耗上限， $E_k(l)$ 表示粒子 k 在第 l 次迭代时的部署能耗， κ_1 、 κ_2 和 κ_3 表示与约束相关的惩罚因子。适应度值越大，表示粒子适应性越高，粒子越优。通过计算每个粒子的适应度函数可以确定在第 l 次迭代时，粒子 k 的局部最优解 $\mathcal{O}_k^{\text{local}}(l)$ 及适应度 $\mathcal{J}_k^{\text{local}}(l)$ ，并根据所有粒子的局部最优解判断全局最优解 $\mathcal{O}^{\text{global}}(l)$ 及适应度 $\mathcal{J}^{\text{global}}(l)$ 。

接下来，根据局部最优解和全局最优解更新第 $l+1$ 次迭代中的粒子及粒子更新速度，即 $\mathcal{O}_k(l+1)$ 和 $\mathbf{v}_k(l+1)$ 。设置粒子速度更新范围为 $[v_{\min}, v_{\max}]$ ，部署位置更新范围为 $[1, M_{\max}]$ 。当迭代次数达到最大值 l_{\max} 时，算法收敛，输出最优粒子作为无人机部署位置 \mathbf{S} 。

算法 2 总结了本文提出的基于粒子群算法的通感无人机部署算法。步骤 12) 中的 \mathcal{g}_1 和 \mathcal{g}_2 表示区间 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数。

算法 2 基于粒子群算法的通感无人机部署算法

输入 初始化粒子集合 \mathcal{D} 、最大迭代次数 l_{\max} 、惯性权重因子 ρ 、位置加速常数 c_1, c_2 、粒子速度范围 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 、粒子范围 $[1, M_{\max}]$

输出 无人机部署位置 \mathbf{S}

- 1) 设置 $l = 0$, $\mathcal{J}_k^{\text{local}}(l) = 0$, $\mathcal{J}^{\text{global}}(l) = 0$;
- 2) for $k \in \mathcal{D}$
- 3) 根据式(37)计算适应度 $\mathcal{J}_k(l)$;
- 4) if $\mathcal{J}_k(l) > \mathcal{J}_k^{\text{local}}(l)$
- 5) 更新 $\mathcal{J}_k^{\text{local}}(l) = \mathcal{J}_k(l)$ 及对应的 $\mathcal{O}_k^{\text{local}}(l)$;
- 6) end if
- 7) end for
- 8) if $\mathcal{J}^{\text{global}}(l) < \max\{\mathcal{J}_1^{\text{local}}(l), \dots, \mathcal{J}_{|\mathcal{D}|}^{\text{local}}(l)\}$
- 9) 更新 $\mathcal{J}^{\text{global}}(l) = \max\{\mathcal{J}_1^{\text{local}}(l), \dots, \mathcal{J}_{|\mathcal{D}|}^{\text{local}}(l)\}$ 及对应的 $\mathcal{O}^{\text{global}}(l)$;
- 10) end if
- 11) for $k \in \mathcal{D}$
- 12) 更新粒子速度: $\mathbf{v}_k(l+1) = \rho \mathbf{v}_k(l) + c_1 \mathcal{g}_1 [\mathcal{O}_k^{\text{local}}(l) - \mathcal{O}_k(l)] + c_2 \mathcal{g}_2 [\mathcal{O}^{\text{global}}(l) - \mathcal{O}_k(l)]$
- 13) if $\forall 1 \leq m \leq M'$, 存在 $v_{k,m}(l+1) > v_{\max}$
- 14) 设置 $v_{k,m}(l+1) = v_{\max}$;
- 15) elseif $v_{k,m}(l+1) < v_{\min}$
- 16) 设置 $v_{k,m}(l+1) = v_{\min}$;
- 17) end if
- 18) end for
- 19) for $k \in \mathcal{D}$
- 20) 更新粒子: $\mathcal{O}_k(l+1) = \mathcal{O}_k(l) + \mathbf{v}_k(l+1)$
- 21) if $\forall 1 \leq m \leq M'$, 存在 $\mathcal{O}_{k,m}(l+1) > M_{\max}$
- 22) 设置 $\mathcal{O}_{k,m}(l+1) = M_{\max}$;
- 23) elseif $\mathcal{O}_{k,m}(l+1) < 1$
- 24) 设置 $\mathcal{O}_{k,m}(l+1) = 1$;

- 25) end if
- 26) end for
- 27) 设置 $l = l + 1$ ，返回步骤 2)，直到 $l = l_{\max}$ 。
- 28) 返回最优粒子作为无人机部署位置 S 。

3.6 无人机部署更新

当相邻时隙内用户位置发生变化，而当前无人机部署能满足用户需求（即问题 \mathcal{P}_1 中约束 C1~C3 和 C10）时，不改变无人机部署，此时无人机不产生推动能耗，仅产生服务能耗；若当前无人机部署不满足通导感用户需求，则需重新部署无人机，因此额外产生推动能耗。

为确定无人机推动能耗，定义在 q 时隙和 $q+1$ 时隙中无人机的部署位置集合分别为 $\mathcal{M}(q)$ 和 $\mathcal{M}(q+1)$ ，建立 $\mathcal{M}(q)$ 与 $\mathcal{M}(q+1)$ 间的二分图。在边权值定义中，若无人机 $m \in \mathcal{M}(q)$ 与无人机 $n \in \mathcal{M}(q+1)$ 间距离 $d_{m,n}^{AA} = \|s_m - s_n\|$ 小于 d_{\max} ，则无人机 m 和无人机 n 关联的边由 $-d_{m,n}^{AA}$ 加权，否则加权为负无穷。然后利用 KM 算法找到 $\mathcal{M}(q)$ 与 $\mathcal{M}(q+1)$ 的最大值匹配 ϕ 以最小化无人机总推动距离。 $\phi(m,n)=1$ 表示 $\mathcal{M}(q)$ 中无人机 m 将移动到 $\mathcal{M}(q+1)$ 中无人机 n 位置， $\phi(m,n)=0$ 表示 $\mathcal{M}(q+1)$ 中无人机 n 位置需派遣新无人机以满足用户需求。最后根据匹配结果计算得到无人机由于位置改变和增派所产生的推动能耗。

4 仿真结果及分析

仿真设置无人机可部署范围为 $[0 \text{ m}, 1 \text{ 000 m}] \times [0 \text{ m}, 1 \text{ 000 m}] \times [50 \text{ m}, 150 \text{ m}]$ 的三维空间。无人机推动及悬停能耗参数设置可参考文献[20]。

表 4 仿真中的主要参数设置

参数	取值	参数	取值	参数	取值
γ_{\min}^C	3 dB	C_0	1 Mbit	p_U	0.2 W
γ_{\min}^P	4 dB	C_1	1 kbit	θ_0	45°
γ_{\min}^S	2 dB	C_2	2 Mbit	α	2
σ^2	-60 dBm	P_{\max}	0.2 W	δ_0	50 m
J_{\max}	10 m	P_{total}	0.3 W	d_{\min}	5 m
E_{\max}	10^6 J	d_{\max}	25 m	ε_0	5
V	13 m/s	L_{\min}	$\frac{\sqrt{2}}{2} \delta_0$	d_0	1 m

表 4 总结了仿真中的主要参数设置。采用经典的高斯-马尔可夫模型^[28]模拟用户随机移动，将本文提出的通导感一体化部署方案与非通导感一体化部

署方案进行比较。在非通导感一体化部署中，无人机只能提供单一服务，因此无人机 m 的部署角色矢量 r_m^M 存在 3 种情况，即 $r_m^M = \{[1,0,0], [0,1,0], [0,0,1]\}$ 。

4.1 不同用户分布下无人机部署情况

本节考虑单一服务场景和多服务场景。设置通信、导航及感知用户（即 $|U^C|$ 、 $|U^P|$ 和 $|U^S|$ ）均为 10。

单一服务场景仅存在单一服务需求，用户 u 的服务状态矢量 r_u^U 存在 3 种情况，表示为 $r_u^U = \{[1,0,0], [0,1,0], [0,0,1]\}$ ，即用户请求通信、导航或感知服务。图 5 显示了单一服务场景中的用户分布。图 5(a) 的聚集场景显示三类用户分别独立分布在不超过 100 m 的方形区域，可明显划分通信、导航及感知服务区域；图 5(b) 的分散场景显示通信、导航及感知用户在 1 000 m 的方形区域随机分布，不能明显划分业务区域；图 5(c) 的混合场景显示可划分多个子区域，每个区域均分散存在通信、导航及感知服务用户。

在实际中，由于材料轻量化和电池蓄电能力提升等原因，无人机续航能力提升，无人机最大服务次数增加。图 6 显示了图 5 中不同场景部署的无人机数量随无人机最大服务次数（即 N_{\max} ）的变化情况。从图 6 可以看出，随着 N_{\max} 增加，所有方案需部署的无人机数量逐渐减少，且通导感一体化和非通导感一体化方案所需部署的无人机数量接近。这是因为单一角色无人机能够极大程度满足对应服务的用户需求，从而降低了多角色无人机的优势。

整体而言，从图 6 可以看出，相比于非通导感一体化部署，通导感一体化方案在 N_{\max} 较小且用户分散场景具有降低无人机数量的优势。这是因为其能利用无人机多角色能力为不同需求用户提供服务。

用户多服务场景中每个用户可具有多类服务需求，如图 7(a) 所示。图 7(a) 中不仅存在单一服务用户，还存在通导用户、通感用户、导感用户以及通导感用户。图 7(b) 显示了多服务场景中无人机部署数量随无人机最大服务次数（即 N_{\max} ）的变化情况。与图 6 结果类似，随着 N_{\max} 的增加，图 7 显示 2 种方案部署的无人机数量减少。相比于非通导感一体化方案，通导感一体化方案在 N_{\max} 较小时更具有减少无人机部署数量的优势。图 8 进一步显示了 $N_{\max} = 6$ 时的无人机部署结果。图 8(a) 显示在通导感一体化部署中，无人机利用多角色支持用户通导感多服务，存在三架通信-导航无人机（即 M_1^{C-P} 、

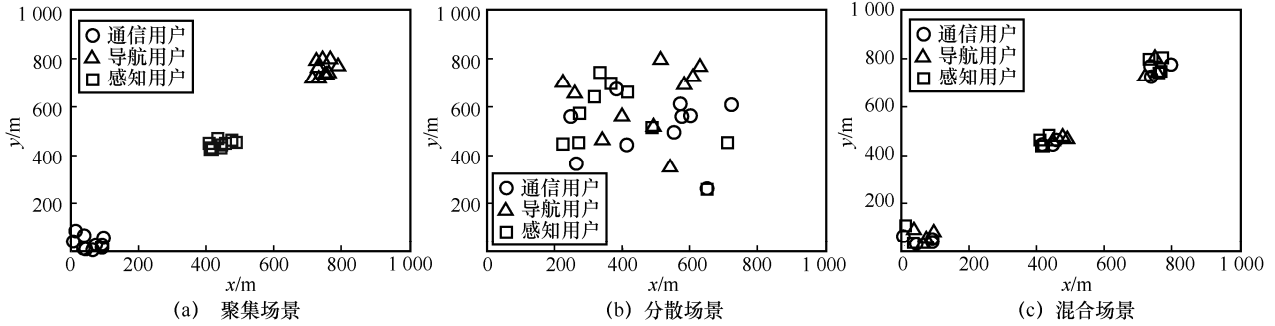


图 5 单一服务场景中的用户分布

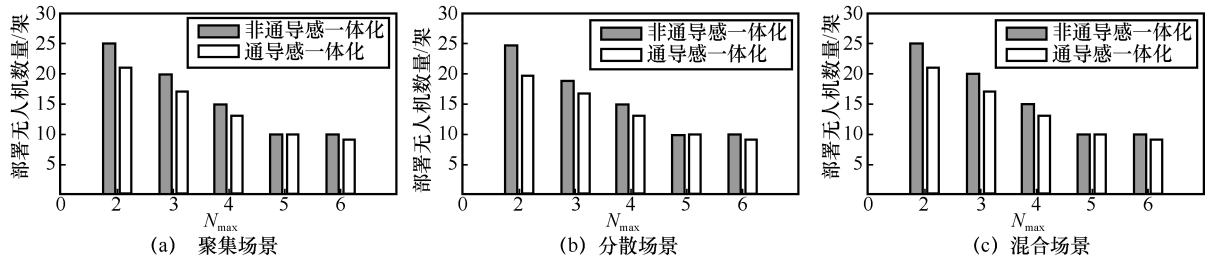


图 6 单一服务场景中无人机部署数量随无人机最大服务次数 (即 N_{max}) 的变化

M_2^{C-P} 和 M_3^{C-P}) 和一架通信-感知无人机 (即 M_1^{C-S}), 部署无人机总数为 10 架。在图 8(b) 的非通导感一体化部署中, 需部署 6 架导航无人机、3 架通信无人机和 3 架感知无人机, 部署无人机总数为 12 架。因此通导感一体化方案降低无人机部署成本约 16.7%。以下仿真设置 N_{max} 为 4, 考虑单一服务用户的分散场景。

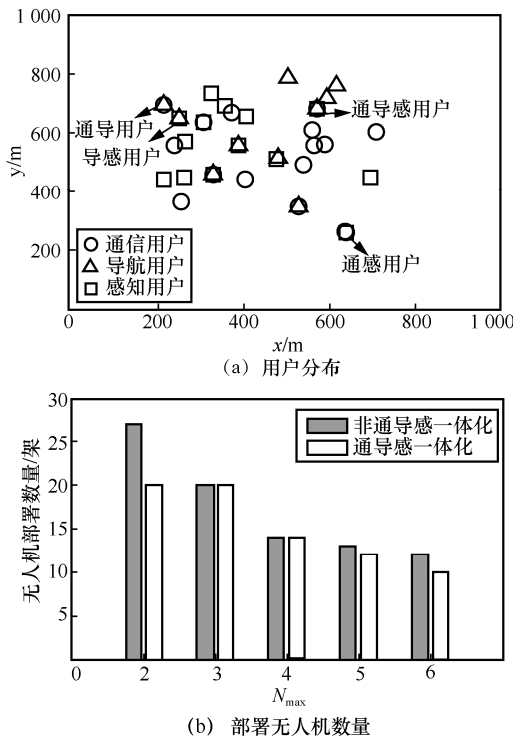


图 7 多服务场景中用户分布和无人机部署数量

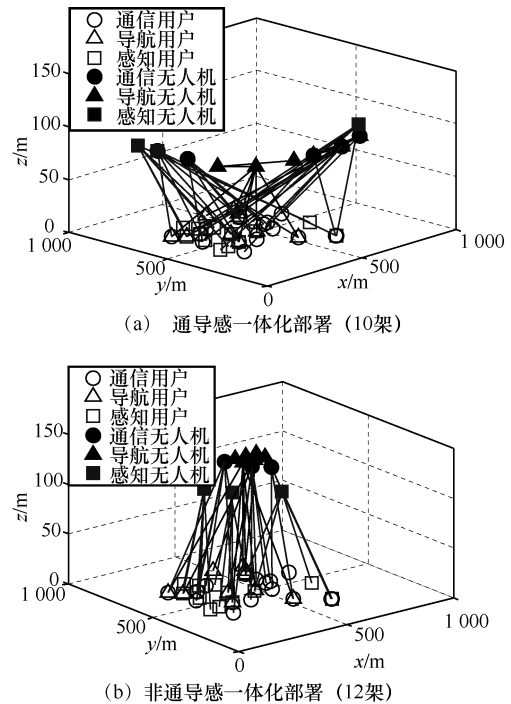


图 8 用户多服务场景中无人机静态部署

4.2 部署性能分析

当用户位置发生改变而部署的无人机不足以 满足用户需求时, 需更新无人机部署。

图 9 显示了无人机能耗随时间的变化情况。设置观察时间为 60 个时隙, 用户移动速度为 0.8 m/s, 导航和感知用户数量分别为 2 和 8。图 9 显示当通信用户数由 5 增加到 10 时, 需部署更多无人机来

支持通信服务，因此增加了部署能耗。随着时隙增加，无人机能耗呈小幅度增长趋势。这是由于用户移动增大了与无人机的相对距离，因此为满足用户需求，无人机需增大发射功率。图 9 表明 2 种部署方案均具有较好的稳健性。相比于非通导感一体化方案，通导感一体化方案降低了整体部署能耗和部署成本（即无人机数量）。

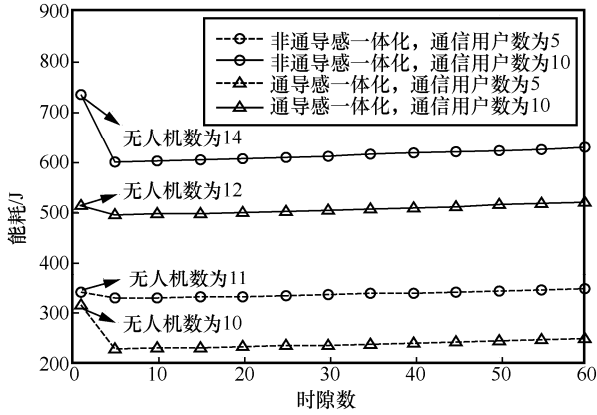


图 9 无人机能耗随时间的变化情况

表 5 显示了用户移动速度对所有时隙的平均能耗的影响。设置通信、导航和感知用户数均为 10，观察时间为 10 个时隙。表 5 表明对于非通导感一体化方案和通导感一体化方案，当用户移动速度从 0.4 m/s 增加到 1.2 m/s 时，能耗增长幅度较小，反映了用户平均移动速度对部署能耗和重新部署的无人机数量影响较小。相比于非通导感一体化方案，通导感一体化方案的能耗均值和方差更小。上述结果表明，通导感一体化部署在降低无人机部署成本的同时稳健性更高。这是因为通导感一体化部署可切换无人机角色以适应用户对通导感服务的动态变化。

表 5 用户移动速度对所有时隙的平均能耗的影响

方案	用户速度/(m·s ⁻¹)	能耗均值/J	能耗方差/J ²
非通导感一体化	0.4	177.38	237.43
	0.8	177.42	229.44
	1.2	178.07	204.60
通导感一体化	0.4	162.45	54.97
	0.8	162.47	52.90
	1.2	163.25	48.24

由于通导感一体化部署减少了无人机部署数量及成本，可能会在一定程度上损失用户通导感性能。考虑一个时隙，给定优化的无人机集合 \mathcal{M}^* ，所有通信用户的归一化数据速率表示为

$\sum_{m \in \mathcal{M}^*} \sum_{u \in \mathcal{U}^c} \alpha_{m,u}^c \left(\frac{R_{m,u}^c}{R_{\min}^c} \right)$ ，其中 R_{\min}^c 表示最小通信速率需求；

所有导航用户的归一化定位误差表示为

$\sum_{C_k \subset \mathcal{K}} \sum_{u \in \mathcal{U}^p} I_{u,k}^p \left(\frac{J_{u,k}}{J_{\max}} \right)$ ，其中 J_{\max} 表示定位误差上限；

所有感知用户的归一化数据速率表示为

$\sum_{m \in \mathcal{M}^*} \sum_{u \in \mathcal{U}^c} \alpha_{m,u}^s \left(\frac{R_{m,u}^s}{R_{\min}^s} \right)$ ，其中 R_{\min}^s 表示最小感知速率需求。

定义性能损失函数为

$$L = \frac{1}{\sum_{m \in \mathcal{M}^*} \sum_{u \in \mathcal{U}^c} \alpha_{m,u}^c \left(\frac{R_{m,u}^c}{R_{\min}^c} \right)} + \frac{\sum_{C_k \subset \mathcal{K}} \sum_{u \in \mathcal{U}^p} I_{u,k}^p \left(\frac{J_{u,k}}{J_{\max}} \right)}{1} + \frac{1}{\sum_{m \in \mathcal{M}^*} \sum_{u \in \mathcal{U}^c} \alpha_{m,u}^s \left(\frac{R_{m,u}^s}{R_{\min}^s} \right)} \quad (38)$$

式(38)表明，当通信用户速率越大、导航用户定位误差越小或感知用户速率越大时，性能损失函数数值越小，即部署方案性能损失越少。

图 10 显示了通导感一体化方案和非通导感一体化方案的总能耗与损失函数值的关系。设置导航和感知用户数分别为 2 和 6，通信用户数（即 $|\mathcal{U}^c|$ ）从 2 增加到 10。当 $|\mathcal{U}^c|$ 为 6 时，相比于非通导感一体化方案，通导感一体化方案损失函数值增加约 4.64%，同时总能耗减少约 10.67%，即在性能损失较小的情况下大幅度降低了部署能耗。

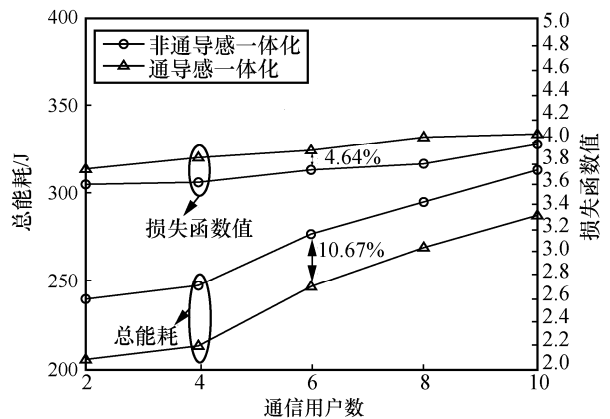


图 10 不同部署方案的总能耗和损失函数值的关系

接下来，将本文提出的通导感一体化无人机低能耗部署算法（ICNS-LEC）与基于贪婪算法的通导感一体化无人机低能耗部署算法和非通导感一体化无人机低能耗部署算法进行比较，后 2 种方案

分别标记为 ICNS-Greedy 和 nonICNS-LEC。表 6 为不同部署方案性能对比。

方案名称	是否通导感一体化	部署方法
ICNS-LEC	是	所提 LEC 算法
ICNS-Greedy	是	贪婪算法
nonICNS-LEC	否	所提 LEC 算法

同时, 考虑不同系统频率对通信信道质量的影响, 将式(1)和式(2)中无人机与用户信道、无人机间信道的大尺度衰落表征为关于频率 f_c 的函数。

已知无人机 m 与用户 u 的通信距离为 $d_{m,u}^{AG}$, 将无人机与用户间大尺度信道衰落建模为视线线路 (LoS, line of sight) 和非视距 (NLoS, non line of sight) 信道的均值^[29-30]。因此, $\beta_{m,u}^{AG}$ 的 dB 形式为

$$\beta_{m,u}^{AG}(\text{dB}) = \frac{\eta_{\text{LoS}} - \eta_{\text{NLoS}}}{1 + a \exp[-b(\theta_{m,u}^{AG} - a)]} + 20 \lg(d_{m,u}^{AG}) + 20 \lg\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right) + \eta_{\text{NLoS}} \quad (39)$$

其中, η_{LoS} 和 η_{NLoS} 分别表示 LoS 和 NLoS 通信状态下的额外路损, $\theta_{m,u}^{AG}$ 表示无人机 m 与用户 u 的仰角, c 表示光速, a 和 b 表示取决于周围环境中建筑物高度和密度的环境参数^[30-31]。

已知无人机 m 与无人机 n 的通信距离为 $d_{m,n}^{AA}$, 将无人机间大尺度信道衰落建模为视距信道。因此, $\beta_{m,n}^{AA}$ 的 dB 形式为

$$\beta_{m,n}^{AA}(\text{dB}) = 20 \lg(d_{m,n}^{AA}) + 20 \lg\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right) + \eta_{\text{LoS}} \quad (40)$$

表 7 列出了仿真设置中不同频率参数的额外路损^[29]和带宽^[32-33], 同时设置 a 和 b 的取值分别为 4.88 和 0.43^[31,34]。

频率	带宽	额外路损 ($\eta_{\text{LoS}}, \eta_{\text{NLoS}}$)
700 MHz	20 MHz	(0, 18)
2 GHz	30 MHz	(0.1, 21)

图 11 显示了总能耗随通信用户数 (即 $|U^C|$) 及频率 (即 f_c) 的变化情况, 设置导航和感知用户数分别为 2 和 8。随着通信用户数从 20 增加到 40, 无人机总能耗增加, 这是因为需部署更多无人机以支持用户通导感需求。同时, 当频率从 700 MHz

增加到 2 GHz 时, 尽管总带宽增加, 但其信道质量降低, 因此需增加发射功率来满足信噪比需求, 从而产生更多服务能耗, 并增大部署总能耗。当频率为 700 MHz 且通信用户数为 20 时, 相比于 ICNS-Greedy 方案和 nonICNS-LEC 方案, 本文提出的 ICNS-LEC 方案的总能耗分别降低约 8.47% 和 16.0%。

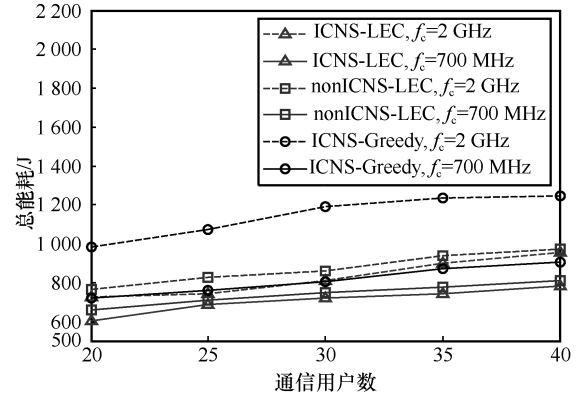


图 11 总能耗随通信用户数及频率的变化情况

图 12 显示了总能耗随无人机最大服务次数 (即 N_{max}) 及频率 (即 f_c) 的变化情况, 设置通信、导航和感知用户数分别为 20、2 和 8。随着无人机最大服务次数从 2 增加到 6, 由于所需部署的无人机数量减少, 部署总能耗减少。与图 11 结果类似, 图 12 表明提高通信频率将增加部署总能耗。当频率为 700 MHz 且无人机最大服务次数为 2 时, 相比于 ICNS-Greedy 方案和 nonICNS-LEC 方案, 本文提出的 ICNS-LEC 方案的总能耗分别降低约 37.15% 和 19.22%。

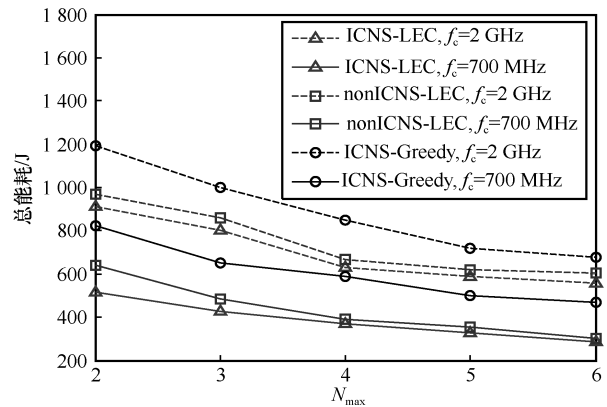


图 12 总能耗随无人机最大服务次数及频率的变化情况

5 结束语

针对应急场景面临的通信传输不畅、定位导

航不稳、灾情感知不准的问题，本文提出了通导感一体化的应急无人机网络低能耗部署方案，量化了通导感一体化场景业务需求，建立了无人机能耗最小化问题。通过对无人机与通导感用户关联、多角色无人机通信资源以及无人机部署的迭代优化，实现了通导感多目标需求与应急网络资源的灵活弹性适配。仿真结果显示，相比于非通导感一体化部署，通导感一体化部署在降低无人机部署成本和能耗的同时具有更高的稳定性和稳健性。

附录1 定位子组的满秩条件推导

已知导航无人机子组 $C_k = \{k_0, k_1, k_2\}$ ，其中， k_0 表示主站无人机， k_1 和 k_2 表示副站无人机。无人机子组 C_k 中的无人机与用户 u 的定位方程为

$$D_{m,u} = \|s_m - q_u\|_2, \forall m \in C_k \quad (41)$$

同时，可以得到

$$\begin{aligned} D_{i,u}^2 - D_{k_0,u}^2 &= (D_{i,u} + D_{k_0,u})(D_{i,u} - D_{k_0,u}) = \\ &= (x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + z_i^2 - \\ &= ((x_{k_0} - x_u)^2 + (y_{k_0} - y_u)^2 + z_{k_0}^2), \forall i \in C_k \setminus k_0 \end{aligned} \quad (42)$$

副站无人机将测量信息传输给主站无人机，计算得到副站无人机和主站无人机与用户 u 的距离差，即

$$D_{i,k_0} = D_{i,u} - D_{k_0,u} = ct_{i,k_0} = \Delta D_{i,k_0} + cn_{i,k_0}, \forall i \in C_k \setminus k_0 \quad (43)$$

其中， c 表示光速， D_{i,k_0} 和 t_{i,k_0} 分别表示实际测得的副站无人机与主站无人机 k_0 到目标节点的距离差值和时差， $\Delta D_{i,k_0}$ 表示在不含测量误差情况下得到的距离差值， n_{i,k_0} 表示实际时差测量误差。同时，可以得到 $D_{i,u} + D_{k_0,u} = D_{i,k_0} + 2D_{k_0,u}$ 。

将 $D_{i,u} - D_{k_0,u}$ 和 $D_{i,u} + D_{k_0,u}$ 的表达式代入式(42)，可得

$$(x_{k_0} - x_i)x_u + (y_{k_0} - y_i)y_u = f_i + D_{k_0,u}D_{i,k_0}, \forall i \in C_k \setminus k_0 \quad (44)$$

其中， $f_i = \frac{1}{2}(D_{i,k_0}^2 + D_{k_0,u}^2 - D_{i,u}^2)$ ， $D_{i,u}^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ 。

在获得主站无人机 k_0 与用户 u 距离（即 $D_{k_0,u}$ ）以及副站无人机 k_1 和 k_2 与主站无人机 k_0 距离（即 D_{k_1,k_0} 和 D_{k_2,k_0} ）情况下， x_u 和 y_u 为未知变量。式(44)可表示为矩阵形式

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{k_0} - x_{k_1} & y_{k_0} - y_{k_1} \\ x_{k_0} - x_{k_2} & y_{k_0} - y_{k_2} \end{bmatrix}}_{A_k} \underbrace{\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix}}_{q_u} = \underbrace{\begin{bmatrix} f_{k_1} + D_{k_0,u}D_{k_1,k_0} \\ f_{k_2} + D_{k_0,u}D_{k_2,k_0} \end{bmatrix}}_{B_k} \quad (45)$$

当用户位置可解时，需满足 $\begin{vmatrix} x_{k_0} - x_{k_1} & y_{k_0} - y_{k_1} \\ x_{k_0} - x_{k_2} & y_{k_0} - y_{k_2} \end{vmatrix} \neq 0$ ，即

A_k 为满秩矩阵。

参考文献：

- [1] MASE K. How to deliver your message from/to a disaster area[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(1): 52-57.
- [2] MUKHERJEE B, HABIB M F, DIKBIYIK F. Network adaptability from disaster disruptions and cascading failures[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 230-238.
- [3] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1647-1650.
- [4] ALZENAD M, EL-KEYI A, LAGUM F, et al. 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(4): 434-437.
- [5] ARAFAT M Y, MOH S. Localization and clustering based on swarm intelligence in UAV networks for emergency communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8958-8976.
- [6] ATIF M, AHMAD R, AHMAD W, et al. UAV-assisted wireless localization for search and rescue[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 3261-3272.
- [7] HU J Z, ZHANG H L, SONG L Y. Reinforcement learning for decentralized trajectory design in cellular UAV networks with sense-and-send protocol[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6177-6189.
- [8] MENG K T, LI D S, HE X F, et al. Space pruning based time minimization in delay constrained multi-task UAV-based sensing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(3): 2836-2849.
- [9] ZHANG S H, ZHANG H L, HAN Z, et al. Age of information in a cellular Internet of UAVs: sensing and communication trade-off design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6578-6592.
- [10] CHEN X, FENG Z Y, WEI Z Q, et al. Performance of joint sensing-communication cooperative sensing UAV network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15545-15556.
- [11] ZHAO Y, LI Z, CHENG N, et al. Joint UAV position and power optimization for accurate regional localization in space-air integrated localization network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4841-4854.
- [12] SHEN Y, WYMEERSCH H, WIN M Z. Fundamental limits of wide-band localization—part II: cooperative networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(10): 4981-5000.
- [13] WAN P W, HUANG Q D, LU G Y, et al. Passive localization of signal source based on UAVs in complex environment[J]. China Communications, 2020, 17(2): 107-116.
- [14] LONG T, OZGER M, CETINKAYA O, et al. Energy neutral Internet of drones[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 22-28.
- [15] BAI B, WANG L, HAN Z, et al. Caching based socially-aware D2D communications in wireless content delivery networks: a hypergraph framework[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(4): 74-81.
- [16] 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.
- [17] TORRIERI D J. Statistical theory of passive location systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(2): 183-198.

- [18] ZHANG S H, ZHANG H L, DI B Y, et al. Joint trajectory and power optimization for UAV sensing over cellular networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(11): 2382-2385.
- [19] SUN S, ZHANG G P, MEI H B, et al. Optimizing multi-UAV deployment in 3-D space to minimize task completion time in UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(2): 579-583.
- [20] ZENG Y, XU J, ZHANG R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2329-2345.
- [21] SOHAIL M F, LEOW C Y, WON S. Energy-efficient non-orthogonal multiple access for UAV communication system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 10834-10845.
- [22] WANG L, GUAN M L, AI Y T, et al. Beamforming-aided NOMA expedites collaborative multiuser computational offloading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 10027-10032.
- [23] 夏伟. 多站无源时差定位系统布站方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- XIA W. Stations distribution study of passive time difference localization system using multiple sensors[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [24] 3GPP. Technical specification group core network and terminals; control plane location services (LCS) procedures in the evolved packet system (EPS), Release 16[S]. 3GPP TS 24.171, 2020.
- [25] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [26] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment problem[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1/2): 83-97.
- [27] VALLE Y D, VENAYAGAMOORTHY G K, MOHAGHEGHI S, et al. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(2): 171-195.
- [28] LIANG B, HAAS Z J. Predictive distance-based mobility management for multidimensional PCS networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 718-732.
- [29] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2898-2904.
- [30] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [31] BOR-YALINIZ R I, EL-KEYI A, YANIKOMEROGLU H. Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [32] 3GPP. Base station (BS) radio transmission and reception, Release 17[S]. 3GPP TS 38.104, 2021.
- [33] 3GPP. Physical channels and modulation, Release 17[S]. 3GPP TS 38.211, 2022.
- [34] 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.
- WANG C. Deployment and location updating of UAV base stations[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.

[作者简介]



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通信、能源互联网、边缘智能等。



魏青(1993-), 女, 湖北恩施人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为应急通信、车载通信网络等。



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



沈渊(1982-), 男, 上海人, 博士, 清华大学教授、博士生导师, 主要研究方向为定位感知、智能协同系统和生物结构解析等。



张平(1959-), 男, 陕西汉中, 博士, 中国工程院院士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为先进移动通信系统等。



费爱国(1955-), 男, 江苏涟水人, 博士, 中国工程院院士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为指挥信息系统和数据链技术等。