

空地协同通信定位一体化无人机应急部署优化

毕宿志

(深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 为探索复用一架无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 同时用作空中基站和锚点辅助地面网络, 构建空地协同通信定位一体化的新型应急网络方案。研究聚焦于网络中无人机位置部署优化问题, 重点解决一体化部署中通信与定位性能的冲突难题。首先使用 D-最优准则替代传统的克拉美劳下界 (CRLB, Cramer-Rao lower bound) 作为定位精度指标, 建模了多用户定位精度和通信速率约束下最大化网络吞吐量的无人机三维部署优化问题。推导了满足地面用户定位精度约束条件的无人机可部署区域的闭合表达式, 证明了该区域是以目标用户为顶点的标准二阶锥, 从而将定位精度约束条件转化为易于分析处理的凸约束条件, 并提出了高效的无人机三维部署优化方法。进而利用城市三维地图辅助无人机部署, 解决了空地信道建模不精准导致的通信与定位性能保障差的问题。所提无人机部署方法在理论上便于求解最优部署位置, 并且在空间上具有直观的几何特性, 适合在应急场景下快速部署空地协同网络, 精准保障满足地面用户的通信与定位性能需求。

关键词: 无人机; 通信定位一体化; 应急网络; 部署优化

中图分类号: TN915.08

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00428

Emergency UAV deployment optimization in an integrated air-ground network with joint communication and localization service

BI Suzhi

College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: To exploit reusing a single unmanned aerial vehicle (UAV) to simultaneously act as an aerial base station and anchor point to assist the terrestrial emergency network, a novel integrated air-ground emergency support network was built with joint communication and localization service. The UAV position deployment optimization problem in the integrated network was studied, with a focus on resolving the fundamental and conflicting impacts of UAV deployment to the communication and localization performance. Firstly, a D-optimality based localization accuracy metric was adopted to replace the conventional Cramer-Rao lower bound (CRLB), and a UAV deployment optimization problem that maximizes the network throughput was formulated under individual localization accuracy and communication rate constraints. The closed-form expression of feasible deployment region of a UAV was derived that could satisfy the localization accuracy requirements of ground user, which was shown to be a second-order cone with the target user being the vertex, and proposed efficient deployment algorithm accordingly. Then, a 3D city map assisted deployment scheme was proposed to address the inaccurate air-ground channel modeling problems. The proposed deployment method is analytically tractable for deriving the optimal deployment solution, and has intuitive geometric structure to facilitate fast and performance-guaranteed deployment of integrated air-ground networks to satisfy the communication and localization performance requirements of ground users.

收稿日期: 2024-09-12; **修回日期:** 2024-09-24

通信作者: 毕宿志, bsz@szu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62271325); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (No. 2022A1515010973); 深圳市科技创新委稳定支持重点基金项目 (No. 20220810142637001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62271325), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2022A1515010973), Shenzhen Science and Technology Program (No. 20220810142637001)

Key words: unmanned aerial vehicle, integrated communication and localization, emergency network, deployment optimization

0 引言

当前 5G 通信技术已经进入成熟商用阶段，高速度、大连接和低时延的高性能 5G 通信网络已经实现了在国内地级市全覆盖，通过赋能移动医疗、车联网、智能家居、工业控制、环境监测等新型应用领域，为城市用户带来了前所未有的智能化便捷服务体验，有力推动了社会经济变革发展。然而，在城市出现地震、水灾、化学品爆炸等需要紧急救援的场景下，地面蜂窝网络设备也往往同时出现损坏与故障，无法保障紧急恶劣条件下的通信功能。此外，我国幅员辽阔，在山地、野外、临海等诸多远离城市的偏远地区，4G/5G 网络的布网成本高、覆盖率低，难以满足在偏远地区执行地形勘测、侦查救援等任务时的应急保障通信需求。近年来无人机技术快速发展，飞行控制精度和稳定性不断提升且制造成本逐年降低。无人机在应急场景中的应用如图 1 所示，通过使用无人机搭载通信设备形成的无人机基站具备灵活、机动、可控、易集成和低成本的特点，可以在应急保障场景中灵活部署，为地面用户提供高速可靠的视距通信链路，通过空中机动覆盖大范围的地面区域，因此无人机逐渐成为应急保障场景中辅助地面通信网络的重要解决方案^[1-2]。

利用无人机辅助地面通信网络的研究目前已经有了大量的研究成果，主要聚焦于通过优化无人机的位置部署，提高网络的通信速率或降低设备的能

耗^[3-7]。例如，文献[3]探讨了如何在满足地面传感器通信速率需求的前提下，部署最少数量的无人机。对此研究者提出了一种螺旋放置算法，以确定无人机在固定高度下的二维（2D, two dimensional）坐标。文献[4]在海上传感器的数据收集量 and 处理时延约束条件下优化无人机的 2D 轨迹，实现最小化无人机的能耗。文献[5]研究了一个无人机辅助地面基站的场景，在考虑空地协同信道干扰的情况下，通过粒子群优化算法确定无人机部署 3D 坐标，实现最大化整个空地网络的总通信速率。文献[6]采用多个无人机作为空中基站收集地面用户的数据，通过优化无人机的 3D 轨迹最小化大规模通信网络中无人机的能耗。

除了保障可靠的通信服务，搭载有高精度定位设备的无人机也可以用于提高通信网络的定位精度。全球导航卫星系统可以在开放的天空环境中提供较为精准的定位服务^[8]，但在山区或灾后复杂的地面障碍物阻挡和散射环境下，全球导航卫星系统的定位精度会急剧下降^[9]。在 4G/5G 标准体系下，地面蜂窝网络可以不依靠卫星系统，以地面基站充当定位锚点，通过观测信号到达时间差（OTDoA, observed time difference of arrival）、信号到达角度或者信号到达强度等定位方法，实现对地面用户的精准定位^[10-12]。其中 OTDoA 定位方法被广泛应用于高精度定位，需要运用至少 4 个相互协作的定位锚点估计目标节点的 3D 位置^[12]。在有足够多定位锚点的前提下，锚点的位置部署对于取得高精度定位

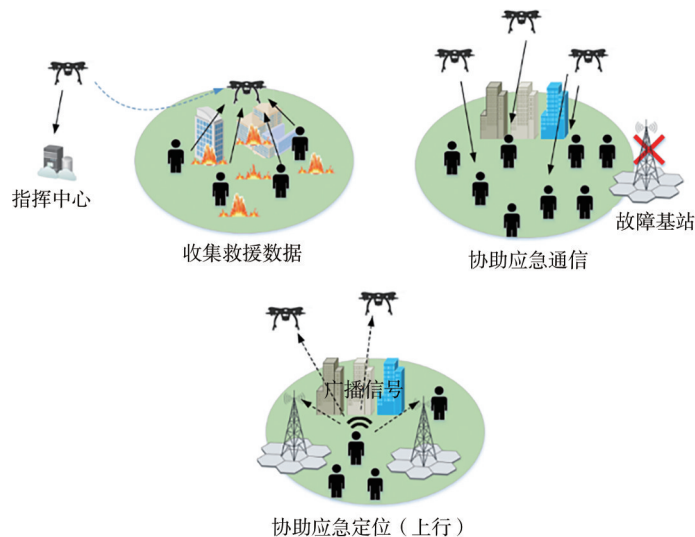


图 1 无人机在应急场景中的应用

十分关键,需要在空间上具有多样性^[13]。在应急保障场景中,无人机可以灵活地部署为空中锚点,增加锚点部署位置的空间差异性,协助地面网络提升定位精度尤其是垂直方向上的。

针对无人机辅助下的网络定位问题,文献[14]和文献[15]在给定空地锚点位置的前提下,研究无人机辅助车载网络中的锚点功率和带宽分配策略,证明可以将最小化定位误差的克拉美罗下界(CRLB, Cramer-Rao lower bound)问题转化为一个半正定规划凸优化问题,从而高效地求得锚点功率和带宽分配策略最优解。然而,CRLB关于定位锚点的3D位置是非凸函数,且数学表达式形式复杂难以解析处理,这使得无人机定位锚点的位置部署优化问题异常困难。目前大部分的研究工作是采用启发式部署优化算法。例如,文献[16]提出了基于遗传算法的方案,用于联合优化无人机的位置部署和功率分配,提高对地面物联网设备的定位精度。文献[17]则利用差分进化算法优化无人机的3D位置,最小化地面用户定位误差的CRLB。文献[18]利用遗传算法来优化无人机的飞行轨迹和设备传输调度最小化设备能耗。整体来说,当前基于CRLB的无人机定位锚点优化方案缺少理论上的性能保证,且基于搜索的算法复杂度高,难以满足实际应用中高精度、低时延和高可靠性的定位服务需求。

在无人机的位置部署应用中,硬件与组网成本是两项关键考量因素。与以往无人机单独提供通信或者定位服务相比,无人机同时提供通信和定位服务能够显著减少网络的硬件成本、部署时延和管理费用。然而,此方案面临的核心挑战在于通信与定位服务在无人机位置部署上的潜在性能冲突。具体而言,为了最大化通信速率,无人机位置部署需要尽可能地接近地面用户以增强空地信道的链路增益。然而,在这种情况下,无人机作为空中锚点与地面基站锚点的垂直高度类似,会导致协作锚点位置的多样性下降,降低定位精度^[19]。如何在无人机位置部署优化的问题中兼顾空地一体化网络的通信速率和定位精度需求,成为一个亟待解决的问题。文献[20]考虑部署一个多天线无人机来提供通信定位一体化服务,在满足定位目标方向上感知信号功率需求的约束下,通过联合优化无人机的位置部署和波束设计,最大化地面用户的通信速率。文献[21]提出了一个阶段性感知模型和持续性通信模型,在

感知信号的波形功率约束下,通过优化无人机的轨迹、信号发射与编码,最大化该模型的通信速率。然而,文献[20]和文献[21]并未采用明确的定位精度指标,如均方误差(MSE, mean-square error)或者CRLB等,衡量系统对目标用户的感知性能。文献[22]研究部署了一个动态无人机为用户提供通信定位一体化服务,其通过优化无人机在固定高度下的2D位置和速度,最小化地面用户的加权CRLB和最大化用户的通信速率。该研究利用连续凸近似求解这个非凸问题,并没有推导出无人机轨迹设计的解析形式。文献[23]采用一个易于解析的D-最优准则替代传统的CRLB作为定位精度指标,分析推导了给定高度下满足定位精度需求的2D几何特征,进而设计了基于图优化的高效算法,使用最少量的无人机即可覆盖一定区域内的通信和定位服务。但该研究仅考虑了较为简化的2D部署场景,没有充分利用无人机在垂直高度上的位置自由度。

对此,本文考虑在应急场景中将一架无人机同时作为空中基站和定位锚点辅助地面基站,为地面用户提供通信定位一体化的服务。工作聚焦于无人机3D位置部署优化问题,旨在提出便于解析的位置部署优化方案,为高效保障地面用户的通信与定位服务性能提供理论和方法支持。本文的主要贡献如下。

1) 针对4G/5G常用的定位方法OTDoA,基于D-最优准则推导了满足地面用户定位精度的无人机可部署3D区域的闭合表达式,证明了该区域是以目标用户为顶点的标准二阶锥。

2) 直观地刻画了满足多用户通信和定位性能的无人机可部署3D区域,考虑满足多用户定位精度和通信速率的约束,建模并求解最大化网络总通信速率的无人机3D部署优化问题。

3) 进而利用城市三维地图辅助无人机3D部署,解决了空地信道建模不精准导致的通信与定位性能保障差的问题,提出了空地链路无建筑物遮挡条件下的最优一体化部署方案。

仿真实验结果表明,与基于3D遍历搜索的最优基准算法相比,本文算法可大幅降低运算时间,高效地获得了通信和定位联合优化问题的近似最优解。与现有典型的基准部署算法相比,本文算法在通信速率上提升了46.7%,同时降低定位误差的CRLB为25.6%,在应急部署场景下展现出了显著的

性能优势。值得一提的是,本文所研究的无人机通信定位一体化组网课题相比当前学术界的研究热点通信感知一体化 (ISAC, integrated sensing and communication), 都是复用一个设备进行通信和感知功能, 并且都是探讨设计中的通信与感知性能的权衡。不同点在于本文侧重点是移动无人机位置部署, ISAC主要是通信感知波形复用设计, 两者在不同程度的设计中具有相互结合的潜在可能。

1 系统模型

1.1 网络模型

无人机辅助通信定位一体化模型如图2所示, 本文考虑的地面网络中有3个地面基站和 K 个用户设备。在应急场景下, 地面建筑或者其他障碍物遮挡地对地链路会导致通信和定位性能下降。对此, 本文使用一个兼具通信和定位功能的无人机作为空中平台, 辅助地面基站为用户设备提供通信和定位服务。本文采用三维笛卡尔坐标系, 考虑一个长宽高为 $L_1 \times L_2 \times L_3$ (单位: m) 的长方体无人机应急部署区域, 以水平地面为 XY 平面, 与地面垂直方向为 Z 轴, 以长方体的某一个地面顶点为原点。其中第 n 个基站、第 k 个用户和兼具通信和定位功能的无人机位置分别表示为 $\mathbf{b}_n = [x_n, y_n, h_n]$, $n \in \mathcal{N} \triangleq \{1, 2, 3\}$, $\mathbf{u}_k = [x_k, y_k, h_k]$, $k \in \mathcal{K} \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$, $\mathbf{v} = [x_v, y_v, h_v]$ 。其中, 地面基站位置固定并假设已知, 无人机由于远离地面高度飞行, 能够与卫星等设备建立稳定的视距链路, 因此其位置也假设精确已知。而地面用户容易受到障碍物的遮挡导致卫星的定位精度无法保障, 因此本文中的用户位置 \mathbf{u}_k 是基于初始位置估计得到的一个大概位置, 用户的精

确位置有待估计。

1.2 通信信号模型

本文考虑无人机收集地面用户的数据信息。在通信机制上, 假设地面用户通过频分多址的正交信道向无人机发送数据。根据无人机飞行区域与地面用户之间的链路遮挡情况, 将空对地链路划分为视距链路和非视距 (NLoS, non-line of sight) 链路两类, 对应的信道增益建模为

$$g_{kv} = \begin{cases} \beta_1 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|^{-\alpha_1}, & \text{视距链路} \\ \beta_2 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|^{-\alpha_2}, & \text{非视距链路} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|$ 是无人机与地面用户 k 之间的直线距离, α_1 和 α_2 分别是不同遮挡情况下的路径损失系数, β_1 和 β_2 分别是不同遮挡情况下参考距离为1 m时的信道增益。进一步地, 用户 k 和无人机之间的传输速率可以表示为

$$R_{kv} = W_{kv} \log \left(1 + \frac{P_k g_{kv}}{W_{kv} N_0} \right) \quad (2)$$

其中, W_{kv} 是通信带宽, P_k 是用户 k 的传输功率, N_0 是噪声功率谱密度。

1.3 定位信号模型

本文考虑基于OTDoA定位方法对用户进行3D坐标定位。每个用户通过接收来自4个定位锚点 (3个地面基站和一个无人机) 的定位参考信号计算定位信号到达时间差, 进而估计其自身的3D位置。假设定位锚点之间在时间上是精确同步的, 本文选取地面基站1作为参考锚点, 用户可以计算其余定位锚点与参考锚点的定位信号到达时间差, 分别表示为

$$\tau_{n1} = \frac{(\|\mathbf{b}_n - \mathbf{u}_k\| - \|\mathbf{b}_1 - \mathbf{u}_k\|)}{c}, n = 2, 3 \quad (3)$$

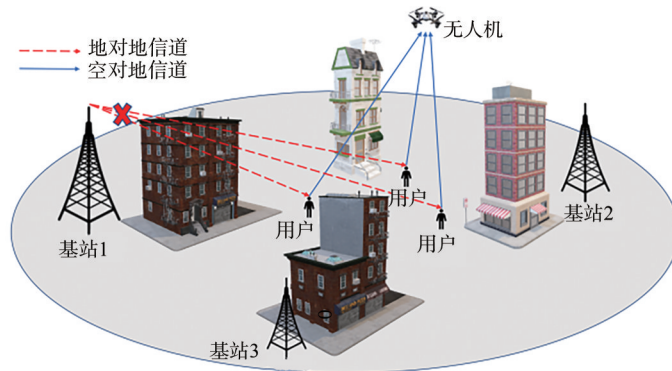


图2 无人机辅助通信定位一体化模型

$$\tau_{v1} = \frac{(\|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\| - \|\mathbf{b}_1 - \mathbf{u}_k\|)}{c} \quad (4)$$

其中, c 是自由空间中光的速度, τ_{n1} 是第 n 个地面基站与参考锚点之间的定位信号到达时间差, 而 τ_{v1} 是无人机与参考锚点之间的定位信号到达时间差。

为了深入分析信号到达时间差定位技术的性能, 本文采用窄带物联网中的窄带定位参考信号 (NPRS, narrowband positioning reference signal)。NPRS 是一个基于正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 的下行参考信号, 支持 OTDoA 定位方法。通过使用包含 N_{sub} 个 OFDM 子帧, 且每个子帧含有 $\mathcal{S} = \{1, 2, \dots, S\}$ 个符号的 NPRS, 可以将信号到达时间差定位技术的测量方差表示为^[24]

$$\sigma_{\text{ToA}}^2 = \frac{T_s^2}{N_{\text{sub}} 8\pi^2 \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{N}_s} p_i^2 i^2} \frac{1}{\text{SNR}} \triangleq \frac{\psi}{\text{SNR}} \quad (5)$$

其中, T_s 是接收信号的符号持续时间, \mathcal{N}_s 是参考信号的子载波集合, $p_i \in [0, 1]$ 是每个子载波 i 的相对功率权重, SNR 是接收信号的信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio), 常数 $\psi = \frac{T_s^2}{N_{\text{sub}} 8\pi^2 \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{N}_s} p_i^2 i^2}$ 。无人机

和用户 k 之间的定位信号到达时间的测量方差就可以表示为

$$\sigma_{vk}^2 = \begin{cases} \psi \frac{WN_0 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|^{\alpha_1}}{P_u \beta_1}, & \text{视距链路} \\ \psi \frac{WN_0 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|^{\alpha_2}}{P_u \beta_2} + \sigma_{\text{NLoS}}^2, & \text{非视距链路} \end{cases} \quad (6)$$

其中, W 是定位信号带宽, P_u 是无人机的定位功率, σ_{NLoS}^2 是非视距链路传播导致的一个加性白高斯噪声。

在应急场景下, 由于地表遮挡地对地链路为非视距链路, 则基站到用户的链路增益可以表示为

$$g_{nk} = \beta_2 \|\mathbf{b}_n - \mathbf{u}_k\|^{-\alpha_2}, n \in \mathcal{N} \quad (7)$$

同时, 地面基站和用户 k 之间的定位信号到达时间的测量方差为

$$\sigma_{nk}^2 = \psi \frac{WN_0}{g_{kn} P_n} = \psi \frac{WN_0 \|\mathbf{b}_n - \mathbf{u}_k\|^{\alpha_2}}{P_n \beta_2} + \sigma_{\text{NLoS}}^2, n \in \mathcal{N} \quad (8)$$

其中, P_n 是第 n 个地面基站的定位功率。基于以上测量方差, 对某个用户 k 的 OTDoA 测量值的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{\text{OTDoA}}$ 可表示为^[14]

$$\mathbf{R}_{\text{OTDoA}} = \begin{bmatrix} \text{var}(\tau_{21}) & \text{cov}(\tau_{21}, \tau_{31}) & \text{cov}(\tau_{21}, \tau_{v1}) \\ \text{cov}(\tau_{31}, \tau_{21}) & \text{var}(\tau_{31}) & \text{cov}(\tau_{31}, \tau_{v1}) \\ \text{cov}(\tau_{v1}, \tau_{21}) & \text{cov}(\tau_{v1}, \tau_{31}) & \text{var}(\tau_{v1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{1k}^2 + \sigma_{2k}^2 & \sigma_{1k}^2 & \sigma_{1k}^2 \\ \sigma_{1k}^2 & \sigma_{1k}^2 + \sigma_{3k}^2 & \sigma_{1k}^2 \\ \sigma_{1k}^2 & \sigma_{1k}^2 & \sigma_{1k}^2 + \sigma_{vk}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $\text{var}(x)$ 表示变量 x 的方差, $\text{cov}(x, y)$ 表示变量 x, y 的协方差。

1.4 定位精度指标

费舍尔信息矩阵 (FIM, Fisher information matrix) 是统计学中常用的概念, 它量化了测量矢量所携带的关于未知参数的信息量, 可用来计算参数估计的标准误差和置信区间。用户 k 的 OTDoA 定位测量的 FIM 为

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{R} = c^2 \mathbf{R}_{\text{OTDoA}}$ 是单位为 m^2 的 OTDoA 定位的协方差矩阵。而 \mathbf{H} 是到达时间差等式的雅可比矩阵, 其表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x_k} & \frac{\partial \tau_{21}}{\partial y_k} & \frac{\partial \tau_{21}}{\partial h_k} \\ \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x_k} & \frac{\partial \tau_{31}}{\partial y_k} & \frac{\partial \tau_{31}}{\partial h_k} \\ \frac{\partial \tau_{v1}}{\partial x_k} & \frac{\partial \tau_{v1}}{\partial y_k} & \frac{\partial \tau_{v1}}{\partial h_k} \end{bmatrix} \quad (11)$$

雅可比矩阵 \mathbf{H} 中的第一行和第二行的元素可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{nk}}{\partial x_k} &= \frac{x_n - x_k}{\|\mathbf{b}_n - \mathbf{u}_k\|} - \frac{x_1 - x_k}{\|\mathbf{b}_1 - \mathbf{u}_k\|} \\ \frac{\partial \tau_{nk}}{\partial y_k} &= \frac{y_n - y_k}{\|\mathbf{b}_n - \mathbf{u}_k\|} - \frac{y_1 - y_k}{\|\mathbf{b}_1 - \mathbf{u}_k\|} \\ \frac{\partial \tau_{nk}}{\partial h_k} &= \frac{h_n - h_k}{\|\mathbf{b}_n - \mathbf{u}_k\|} - \frac{h_1 - h_k}{\|\mathbf{b}_1 - \mathbf{u}_k\|} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $n \in \{2, 3\}$, 而雅可比矩阵第三行的元素表达式可以将式(12)中的 \mathbf{b}_n 替换为 \mathbf{v} 。

基于 FIM 有多种定位的性能指标, 其中一个比较常用的指标为克拉美罗下界 (CRLB), 它表示的是估计量的均方估计误差的理论下界。根据 CRLB 理论, 对于非随机位置参数 w 和该位置参数无偏估计量 \hat{w} , 其估计误差的协方差矩阵的下界为^[14]

$$E\{(\hat{w} - w)(\hat{w} - w)^T\} \geq \text{tr}(\mathbf{F}_w^{-1}) = \text{CRLB} \quad (13)$$

其中, \mathbf{F}_w 表示随机位置参数 w 的费舍尔信息矩阵, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹。基于 CRLB 设计的目标需要

最小化这个方差下限。然而，将 \mathbf{F} 代入后可知 $\text{tr}(\mathbf{F}_w^{-1})$ 是关于协方差矩阵 \mathbf{R} 和雅克比矩阵 \mathbf{H} 的复杂表达式，且关于无人机的位置 \mathbf{v} 非凸，所以很难基于 CRLB 的表达式对无人机的位置 \mathbf{v} 进行高效的优化。也是因为这个原因，过往的工作主要是基于遗传算法、局部量化搜索等方法对 CRLB 这一指标进行定位锚点部署位置优化。

在本文中，将针对以上问题采用具有可解析特性的定位精度指标，并且分析其内在的几何空间特性。当前为了方便部署优化问题建模的表达，将满足用户 k 定位精度要求的无人机部署位置以一般性的形式表示为

$$g(u_k, \mathbf{v}) \geq \epsilon_k, k = 1, \dots, K \quad (14)$$

$g_k(\mathbf{v})$ 的具体形式将在下一节进行详细的设计与分析。

1.5 问题建模

本文考虑在满足地面用户的通信速率和定位精度需求的约束下，通过优化无人机的 3D 位置部署，最大化所有用户与无人机之间的总通信速率。将该问题建模为

$$\begin{aligned} \text{P1: } \max_{\mathbf{v}} \quad & \sum_{k \in \mathcal{K}} R_{kv} \\ \text{s.t. } \quad & \text{C1: } g(u_k, \mathbf{v}) \geq \epsilon_k, \forall k \in \mathcal{K} \\ & \text{C2: } R_{kv} \geq R_k^{\text{th}}, \forall k \in \mathcal{K} \\ & \text{C3: } \mathbf{v} \in \mathcal{D} \end{aligned} \quad (15)$$

问题 P1 中的目标函数代表所有用户与无人机之间的总通信速率，约束 C1 和约束 C2 分别对应每个用户各自的定位精度需求和通信速率需求。约束 C3 代表无人机只能部署于某个给定的闭合区域中。从直观上分析可知，为了最大化通信速率，无人机应该部署于更接近地面用户的低海拔位置，以此提升空对地信道的链路质量。然而，这种部署策略可能导致无人机与地面定位锚点具有相近的高度，降低垂直方向上的定位精度。此外，过低的部署高度还可能增加空对地信道被地面建筑物遮挡的风险，降低通信和定位性能。

2 无人机可行部署区域分析刻画

本节将原问题 P1 中的通信与定位性能约束问题转化为可解析处理的形式，尤其是将定位精度约束转化为对等的凸函数形式。对此，本节首先将使用 D-最优准则替代传统的 CRLB 作为定位精度指

标，证明满足用户定位精度的无人机部署区域为一个以地面用户为顶点的标准二阶锥。而满足地面用户通信速率要求的无人机可行部署区域为一个以地面用户为球心的半球。基于对无人机可行部署区域的分析刻画，本文提出了高效的部署优化方法求解问题 P1。

2.1 D-最优定位精度指标

本文采用 D-最优准则替代传统的 CRLB，以解决 CRLB 难以描述锚点位置对定位精度影响的难题。具体来说，D-最优准则的目标是最大化 FIM 的行列式，其定义为

$$\text{opt-D} = \det(\mathbf{F}) = \frac{\det^2(\mathbf{H})}{\det(\mathbf{R})} \quad (16)$$

D-最优准则中的 $\det(\mathbf{F})$ 与无偏估计量 \hat{w}_k 的不确定区域成反比^[25]，也就是说最小化定位误差 CRLB 的值 $\text{tr}(\mathbf{F}^{-1})$ 可以通过最大化 D-最优准则来实现。图 3 展示了在第 4 节的仿真参数下，当无人机位置只改变 x 轴坐标时一个用户对应的 CRLB 值和 D-最优准则的 opt-D 值。可以看到 CRLB 值随着 x 轴先变小再增大，而 opt-D 值随着 x 轴先变大再变小，它们的变化刚好相反并且能一一对应，且当 CRLB 取得最小值时 opt-D 取得最大值，因此可以通过 D-最优准则来等效地分析定位误差 CRLB 性能，也可以将用户 k 的定位精度约束表示为

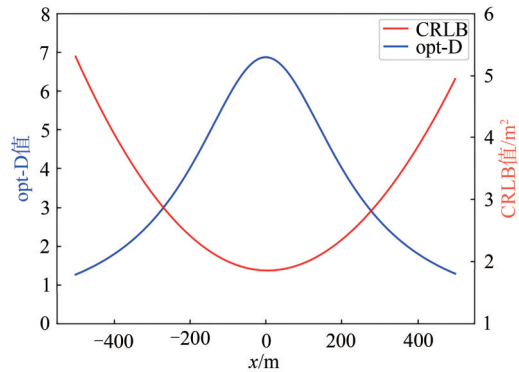


图 3 D-最优准则与定位误差 CRLB 随无人机 x 轴移动的变化图

$$\text{opt-D}(\mathbf{u}_k, \mathbf{v}) \geq \epsilon_k, k = 1, \dots, K \quad (17)$$

为了让推导过程更加简洁，本节省略了用户下标 k ，并将协方差矩阵式(9)的行列式表示为

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{R}) &= c^6 \sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 + \\ & c^6 (\sigma_1^2 \sigma_3^2 + \sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2) \sigma_v^2 \triangleq D_1 + D_2 \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中的 $D_1 \triangleq c^6 \sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2$ ， $D_2 \triangleq c^6 (\sigma_1^2 \sigma_3^2 + \sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_2^2 \sigma_3^2) \sigma_v^2$ 。本文中，用户与无人机之间的空对地信

道具有较高的视距特性,而城市环境中的用户与地面基站的地对地信道为非视距链路。因此,地对地信道的定位信号到达时间测量方差往往远大于空地信道的定位信号到达时间测量方差,即 D_1 远大于 D_2 ,所以可以将 D_1 作为 $\det(\mathbf{R})$ 的一个近似替换^[26]。即D-最优准则可以近似为

$$\text{opt-D} \approx \text{opt-D}_1 = \frac{\det(\mathbf{H})^2}{D_1} \quad (19)$$

为了进一步简化opt-D₁的表达式,首先将无人机与用户之间的单位向量定义为

$$\mathbf{q}_v = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{u}}{\|\mathbf{v} - \mathbf{u}\|} = [q_{v1}, q_{v2}, q_{v3}] \quad (20)$$

而地面基站与用户之间的单位向量则定义为

$$\mathbf{q}_n = \frac{\mathbf{b}_n - \mathbf{u}}{\|\mathbf{b}_n - \mathbf{u}\|} = [q_{n1}, q_{n2}, q_{n3}], n = \{1, 2, 3\} \quad (21)$$

然后,就可以将式(11)中的雅可比矩阵表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_v - \mathbf{q}_1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

从而推导出其对应的雅可比行列式为

$$\det(\mathbf{H}) = e_1 \left(\frac{x_v - x_k}{\|\mathbf{v} - \mathbf{u}\|} - q_{11} \right) + e_2 \left(\frac{y_v - y_k}{\|\mathbf{v} - \mathbf{u}\|} - q_{12} \right) + e_3 \left(\frac{h_v - h_k}{\|\mathbf{v} - \mathbf{u}\|} - q_{13} \right) \quad (23)$$

其中,参数 $e_n, n = 1, 2, 3$,分别表示为

$$\begin{aligned} e_1 &= (q_{22} - q_{12})(q_{33} - q_{13}) - (q_{23} - q_{13})(q_{32} - q_{12}) \\ e_2 &= (q_{23} - q_{13})(q_{31} - q_{11}) - (q_{21} - q_{11})(q_{33} - q_{13}) \\ e_3 &= (q_{21} - q_{11})(q_{32} - q_{12}) - (q_{22} - q_{12})(q_{31} - q_{11}) \end{aligned} \quad (24)$$

因此,问题P1中的定位精度约束C1可以替换为

$$\frac{\det(\mathbf{H})^2}{D_1} \geq \epsilon \quad (25)$$

2.2 满足定位精度约束的可行部署区域刻画

由式(23)可以看出,给定了地面基站和用户位置, $\det(\mathbf{H})$ 的值由无人机位置唯一决定。雅可比行列式 $\det(\mathbf{H})$ 的值在不同的参考基站选择下,可能呈现出不同的正负性分布。在此,本文首先排除 $\det(\mathbf{H}) = 0$ 的情况,因为该情况只有雅可比矩阵的行向量或者列向量为线性相关时才出现,对应的是当用户和所有定位锚点都位于同一个平面,或者任意两个节点(无人机、地面基站或者用户)位于同

一位置的场景。在实际应用场景中,由于无人机飞行高度较高, $\det(\mathbf{H}) = 0$ 的情况不会发生可以排除。接下来,将根据 $\det(\mathbf{H})$ 值的正负情况分两种情况进行讨论。

1) 当 $\det(\mathbf{H}) > 0$ 时,不等式(25)可以等价表示为

$$\begin{aligned} e_1(x_v - x_k) + e_2(y_v - y_k) + e_3(h_v - h_k) \geq \\ \epsilon_1 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}\| \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $\epsilon_1 = \sqrt{D_1} \epsilon + e_1 q_{11} + e_2 q_{12} + e_3 q_{13}$ 。当 $\epsilon_1 \geq 0$ 时,式(26)表示一个以目标用户位置为顶点的标准二阶锥,且可以等价表示为

$$e_1 q_{v1} + e_2 q_{v2} + e_3 q_{v3} \geq \epsilon_1 \quad (27)$$

满足式(27)的无人机相对位置 $\mathbf{q}_v = [q_{v1}, q_{v2}, q_{v3}]$,可以看作球体 $\mathcal{S} = \{[x, y, h] | x^2 + y^2 + h^2 = 1\}$ 和半空间 $\mathcal{H} = \{[x, y, h] | e_1 x + e_2 y + e_3 h \geq \epsilon_1\}$ 的交集。

为了使得存在一个无人机位置可以满足对应的定位精度约束需求,该球体和半空间必须存在交集。所以从该球体的球心到分割该半空间的超平面的垂直距离 d 必须满足 $d = \frac{|\epsilon_1|}{\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}} \leq 1$ 。结合上述的

条件 $\epsilon_1 \geq 0$ 可以推出,当 $\det(\mathbf{H}) > 0$ 时,为了得到一个可行的定位精度约束,定位精度需求 ϵ 的值应满足式(28)

$$-c_2 \leq \sqrt{D_1} \epsilon \leq c_1 - c_2 \quad (28)$$

其中, $c_1 = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}$, $c_2 = e_1 q_{11} + e_2 q_{12} + e_3 q_{13}$ 。

2) 当 $\det(\mathbf{H}) < 0$ 时,不等式(25)可以等价表示为

$$\begin{aligned} e_1(x_v - x_k) + e_2(y_v - y_k) + e_3(h_v - h_k) \leq \\ \epsilon_2 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}\| \end{aligned} \quad (29)$$

其中, $\epsilon_2 = -\sqrt{D_1} \epsilon + e_1 q_{11} + e_2 q_{12} + e_3 q_{13}$ 。与上述推导相似,当 $\epsilon_2 \leq 0$ 时,式(29)表示另一个以目标用户位置为顶点的标准二阶锥,也可以等价表示为

$$e_1 q_{v1} + e_2 q_{v2} + e_3 q_{v3} \leq \epsilon_2 \quad (30)$$

类似地,当 $\det(\mathbf{H}) < 0$ 时,为了得到一个可行的定位精度约束,定位精度需求 ϵ 的值应满足式(31)

$$c_2 \leq \sqrt{D_1} \epsilon \leq c_1 + c_2 \quad (31)$$

总体而言,当定位精度需求 ϵ 的值满足式(28)和式(31)时,满足相应定位精度需求的无人机可行部署区域为两个标准二阶锥。为了更直观地展示该

锥体的结构, 本文将用户的位置调整到 (250, 0, 50), 然后在图4中绘制了不同无人机位置下 opt-D_1 值的热力图。从图4中可以清晰地观察到, 在给定定位精度需求的情况下, 无人机可行部署区域为两个以目标用户坐标为顶点的标准二阶锥, 且这两个锥体相对而立, 一个位于目标用户上方, 一个位于目标用户下方。实际上, 这两个锥体分别对应着上述 $\det(\mathbf{H}) > 0$ 和 $\det(\mathbf{H}) < 0$ 这两种情况。而由于无人机在实际应用中受最低飞行高度的限制, 在实际操作过程中必须选择位于目标用户上方的标准二阶锥作为无人机的可行部署区域 \mathcal{D} , 因此需要判断目标用户上方的 $\det(\mathbf{H})$ 值是大于0还是小于0。

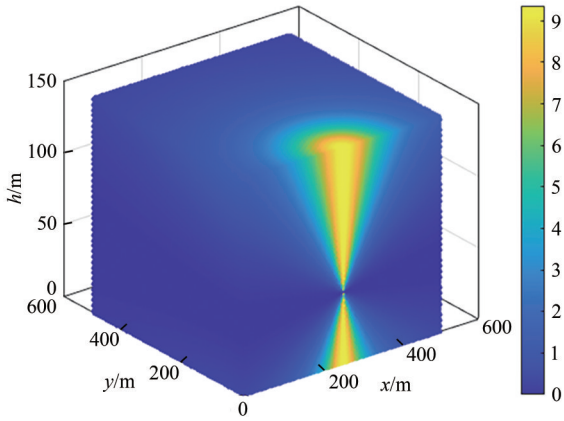


图4 不同无人机位置下 opt-D_1 值的热力图

$\det(\mathbf{H})$ 是一个关于无人机位置变量的连续函数。在连续区域内, 连续函数符号的改变 (即由正变为负或由负变为正) 需要通过一个函数值为0的点。在无人机的可行部署区域 \mathcal{D} 内已经排除了 $\det(\mathbf{H}) = 0$ 这种情况, $\det(\mathbf{H})$ 要么始终为正, 要么始终为负。因此, 可以通过随机选择在目标用户上方二阶锥里的一个点, 计算该点的 $\det(\mathbf{H})$ 值, 然后确定该二阶锥所对应的是式(26)还是式(29)。例如, 当目标用户位于 (250, 0, 50) 时, 计算无人机位于目标用户上方 (250, 0, 250) 处的 $\det(\mathbf{H})$ 值, 如果 $\det(\mathbf{H}) > 0$, 则将约束 C1 替换为式(26), 如果 $\det(\mathbf{H}) < 0$, 则将约束 C1 替换为式(29)。经此处理, 原问题 P1 中的无人机可行部署区域就转化为凸的标准二阶锥区域, 形式上简洁地表示为

$$\mathbf{v} \in \mathcal{L}_k(\epsilon_k), \forall k \in \mathcal{K} \quad (32)$$

其中, $\mathcal{L}_k(\epsilon_k)$ 为满足用户 k 定位精度需求 ϵ_k 的无人机可行部署区域, 即一个以目标用户为顶点的标准二阶锥。图 5(a)和图 5(b)展示了在不同定位精度需

求 ϵ_k 下, 无人机 3D 可行部署区域的变化情况。可以看到, 随着定位精度需求 ϵ_k 由 4 增加到 6, 即随着定位精度需求的提高, 无人机的 3D 可行部署区域, 即锥体的体积变得越来越小。

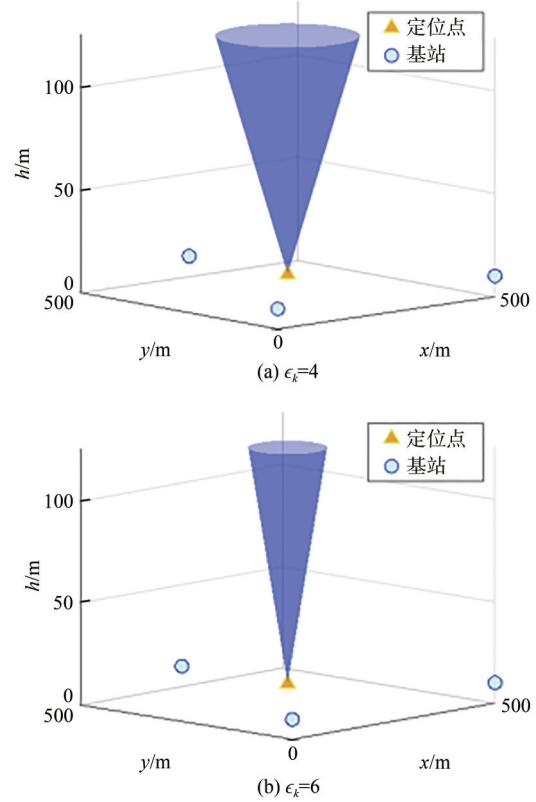


图5 不同定位精度需求下的无人机 3D 可行部署区域变化情况

2.3 满足通信速率约束的可行部署区域刻画

在原问题 P1 中, 地面用户 k 的通信速率需求约束 C2 可以等价转化为

$$\|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\| \leq \left[\frac{P_k \beta_1}{W_{kv} N_0 \left(2^{\frac{R_k^{\text{th}}}{W_{kv}}} - 1 \right)} \right]^{\frac{1}{\alpha_1}} \quad (33)$$

在给定通信速率需求 R_k^{th} 的情况下, 该条件定义了一个以地面用户 k 为中心的球体, 只有当无人机部署于该球体内部时, 才能满足地面用户的通信速率需求。为清晰表达, 本文将原问题中的通信速率需求约束替换为

$$\mathbf{v} \in \mathcal{C}_k(R_k^{\text{th}}), \forall k \in \mathcal{K} \quad (34)$$

其中, $\mathcal{C}_k(R_k^{\text{th}})$ 代表满足用户 k 通信速率需求 R_k^{th} 的无人机 3D 可行部署区域, 即一个以用户为中心的球体。图 6(a)和图 6(b)展示了不同通信速率需求 R_k^{th}

下, 无人机3D可行部署区域的变化情况。

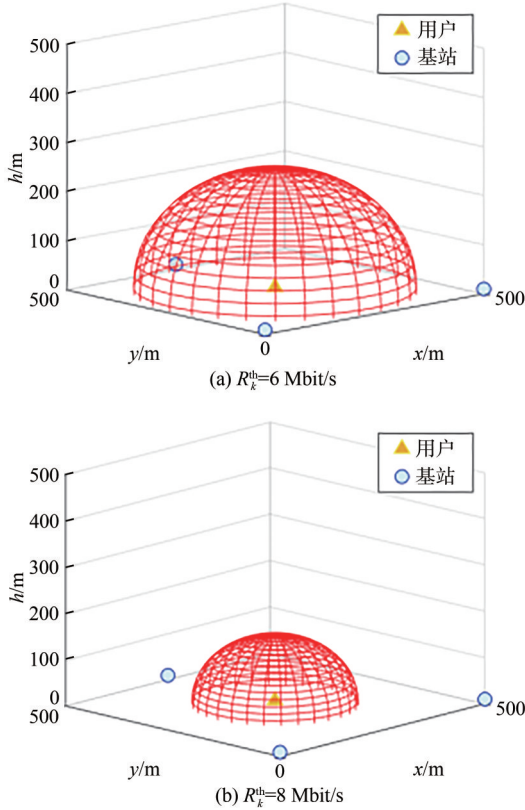


图6 不同通信速率需求下无人机的可行部署区域

2.4 无人机部署优化算法

通过以上对满足定位和通信速率需求的刻画, 本文可以将问题P1等价转换为

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \max_{\mathbf{v}, t} \sum_{k \in \mathcal{K}} R_{k\mathbf{v}} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \mathbf{v} \in \mathcal{L}_k(\epsilon_k), \forall k \in \mathcal{K} \\ & \text{C2: } \mathbf{v} \in \mathcal{C}_k(R_k^{\text{th}}), \forall k \in \mathcal{K} \\ & \text{C3: } \mathbf{v} \in \mathcal{D} \end{aligned} \quad (35)$$

该问题中的可行部署区域均为凸集, 仅有目标函数为非凸函数。该问题是典型的人机通信速率最大化问题, 可以对目标函数通过连续凸优化逼近的方法进行求解。假设空地信道为视距信道, 即 $g_{k\mathbf{v}} = \beta_1 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|^{-\alpha_1}$, 可以计算目标函数中 $R_{k\mathbf{v}}$ 的下界 $\overline{R}_{k\mathbf{v}}$ 为

$$\begin{aligned} R_{k\mathbf{v}} &= W_{k\mathbf{v}} \text{lb} \left(1 + \frac{P_k \beta_1}{W_{k\mathbf{v}} N_0 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|^{\alpha_1}} \right) \geq \\ E_k^{(t)} - F_k^{(t)} (\|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\| - \|\mathbf{v}^{(t)} - \mathbf{u}_k\|) &\triangleq \overline{R}_{k\mathbf{v}} \end{aligned} \quad (36)$$

其中

$$E_k^{(t)} = W_{k\mathbf{v}} \text{lb} \left(1 + \frac{\xi_k}{\|\mathbf{v}^{(t)} - \mathbf{u}_k\|^{\alpha_1}} \right) \quad (37)$$

$$F_k^{(t)} = \frac{W_{k\mathbf{v}} \xi_k \alpha_1}{\|\mathbf{v}^{(t)} - \mathbf{u}_k\| (\|\mathbf{v}^{(t)} - \mathbf{u}_k\|^{\alpha_1} + \xi_k) \ln 2} \quad (38)$$

且 $\xi_k = \frac{P_k \beta_1}{W_{k\mathbf{v}} N_0}$, $\mathbf{v}^{(t)}$ 为第 t 次迭代时的无人机位置。

由于 $\overline{R}_{k\mathbf{v}}$ 是关于无人机位置 \mathbf{v} 的凹函数, 可以将 $\overline{R}_{k\mathbf{v}}$ 作为代理函数替代问题P2中的 $R_{k\mathbf{v}}$ 进行优化, 从而在每次迭代过程中高效地迭代求解凸优化问题直至目标函数收敛或者达到迭代次数上线 T 。当考虑空地信道为非视距信道时, 则只需将问题P2中的空地信道增益设置为 $g_{k\mathbf{v}} = \beta_2 \|\mathbf{v} - \mathbf{u}_k\|^{-\alpha_2}$, 按照以上同样的方法优化无人机部署位置, 算法细节在此不再重复论述。

3 城市3D地图辅助的无人机部署优化

第2节中提出的无人机部署优化方法假设空地信道始终处于视距或者非视距状态。在实际部署场景中, 无人机与地面用户的信道状态与节点间的相对位置有关, 由地面建筑物等造成的遮挡情况决定。这导致在单纯的视距或者非视距链路假设下得到的部署方案无法保障地面用户的通信与定位性能。本节通过引入城市3D地图辅助无人机部署, 可以令空地信道始终处于视距状态, 从而精准地建模空地信道, 保障通信定位一体化服务性能。

3.1 城市地图辅助的视距区域模型

假设有 $\mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$ 座立方体形状的建筑随机分布于正方形区域上。根据无人机和用户之间的通信链路是否受到建筑物的遮挡, 可以将无人机部署的空中区域划分为视距区域和非视距区域。每个用户与 M 座建筑物对应着 M 个非视距区域。 M 座建筑物和 K 个用户就对应着 MK 个非视距区域, 将其表示为集合 $\mathcal{J} = \{1, 2, \dots, MK\}$, 集合 \mathcal{J} 中的参数 $i = (k-1)M + m$ 代表第 k 个用户与第 m 个建筑物之间的非视距区域的编号。

如图7所示, 根据用户和建筑物之间的位置关系, 每一个非视距区域都可以被描述为由3个或4个超平面组成的多面体。通过解析几何理论, 可以将第 i 个非视距区域表示为^[27]

$$\mathcal{D}_i = \{\mathbf{v} | \mathbf{a}_j^\top \mathbf{v} - b_j \leq 0, \forall j \in \mathcal{J}_i\} \quad (39)$$

其中, \mathcal{J}_i 代表第 i 个非视距区域的超平面集合。 $\mathbf{a}_j \in \mathbb{R}^3$ 是第 i 个非视距区域中第 j 个超平面的法向量, 常量 b_j 则是超平面 j 对于原点的偏移量, 这些

信息都可以通过城市3D地图获得。根据式(39), 与 \mathcal{D}_i 相对应的视距区域就可以表示为

$$\mathcal{D} \setminus \mathcal{D}_i = \{ \mathbf{v} | \mathbf{a}_{ij}^\top \mathbf{v} - b_{ij} > 0, \exists j \in \mathcal{J}_i \} \quad (40)$$

即无人机只要位于第 i 个非视距区域的某一个超平面外部, 就可以与地面用户建立视距链路。那么无人机与所有地面 K 个用户均可建立视距链路的条件

$$\mathbf{v} \in \mathcal{D} \setminus \mathcal{D}_i, \forall i \in \mathcal{J} \quad (41)$$

即无人机不处于 MK 个非视距区域之中的任何一个。

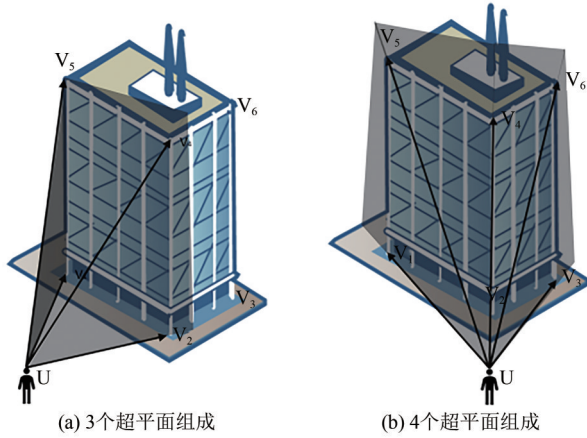


图7 非视距区域示意图

综上所述, 根据3D城市地图提供的建筑物顶点坐标信息, 可以将无人机的部署区域划分为视距区域和非视距区域。其中当无人机处于式(41)所示的视距区域时, 可以与所有地面用户建立视距链接, 否则至少有一个用户的链路被建筑物遮挡。图8中考虑了两个用户坐标分别为(192, 151, 5)和(367, 256, 1)的简单场景, 方框为高度分布在5~50 m的建筑物。图8展示了无人机在200 m固定海拔高度下可行视距部署区域的分布情况。蓝色区域代表可以与所有用户建立视距链路的视距区域, 粉色部分则代表非视距区域。而随着无人机海拔高度的下降, 建筑物的遮挡情况会越来越严重, 蓝色可行部署区域将会变小。

为了便于后续优化求解, 引进一个二进制辅助变量 $l_{ij} \in \{0, 1\}$, 其中 l_{ij} 对应第 i 个非视距区域的第 j 个超平面。式(40)可以等价替换为以下混合整数线性形式

$$\mathbf{a}_{ij}^\top \mathbf{v} - b_{ij} + Cl_{ij} > 0, \forall j \in \mathcal{J}_i, \forall i \in \mathcal{J} \quad (42)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij} \leq |\mathcal{J}_i| - 1, \forall i \in \mathcal{J} \quad (43)$$

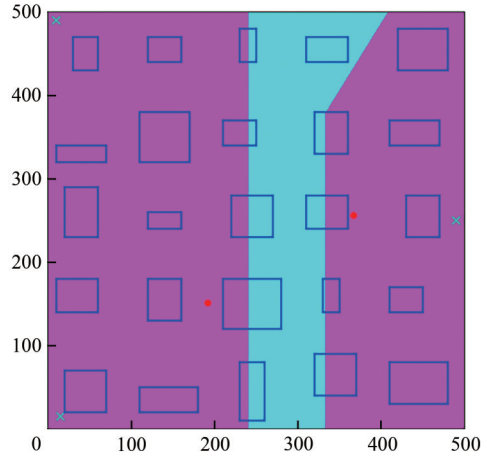


图8 200 m固定海拔高度下无人机的可行视距部署区域

$$\mathbf{v} \in \mathcal{D} \quad (44)$$

$$l_{ij} \in \{0, 1\}, \forall j \in \mathcal{J}_i, \forall i \in \mathcal{J} \quad (45)$$

其中, C 是一个足够大的常数, $|\mathcal{J}_i|$ 是第 i 个非视距区域的超平面个数。当无人机位置 \mathbf{v} 位于超平面 j 的内部, 即 $\mathbf{a}_{ij}^\top \mathbf{v} - b_{ij} \leq 0$ 时, 只有令 $l_{ij} = 1$ 才可满足不等式(42)。结合不等式(43)表示对于任一非视距区域 i 至少存在一个 $l_{ij} = 0$, 从而确保无人机位置 \mathbf{v} 可以与所有用户建立视距链路。为了便于后续的分析求解, 可以将二进制约束式(45)等价地表示为

$$0 \leq l_{ij} \leq 1, \forall j \in \mathcal{J}_i, \forall i \in \mathcal{J} \quad (46)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij}(1 - l_{ij}) \leq 0, \forall i \in \mathcal{J} \quad (47)$$

3.2 城市地图辅助的无人机部署优化算法

在城市地图的辅助下, 本文在部署优化问题P2的基础上进一步限制将无人机部署在可以与所有地面用户建立视距链接的区域, 求解以下无人机部署优化问题。

$$\begin{aligned} \text{P3: } & \max_{\mathbf{v}, l} \sum_{k \in \mathcal{K}} R_{kv} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \mathbf{v} \in \mathcal{L}_k(\epsilon_k), \forall k \in \mathcal{K} \\ & \text{C2: } \mathbf{v} \in \mathcal{C}_k(R_k^{\text{th}}), \forall k \in \mathcal{K} \\ & \text{C3: } \mathbf{a}_{ij}^\top \mathbf{v} - b_{ij} + Cl_{ij} > 0, \\ & \quad \sum_{j \in \mathcal{J}_i} \forall j \in \mathcal{J}_i, \forall i \in \mathcal{J} \\ & \text{C4: } \sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij} \leq |\mathcal{J}_i| - 1, \forall i \in \mathcal{J} \\ & \text{C5: } \mathbf{v} \in \mathcal{D} \\ & \text{C6: } 0 \leq l_{ij} \leq 1, \forall j \in \mathcal{J}_i, \forall i \in \mathcal{J} \\ & \text{C7: } \sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij}(1 - l_{ij}) \leq 0, \forall i \in \mathcal{J} \end{aligned} \quad (48)$$

由于目标函数和约束C7是非凸的, 问题P3仍然是一个非凸优化问题。通过对约束C7引入拉格

朗日乘子得到一个部分拉格朗日函数^[28], 表示为

$$L(\mathbf{v}, \mathbf{l}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_{k \in \mathcal{K}} R_{kv} - \sum_{i \in \mathcal{J}} \lambda_i \sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij} (1 - l_{ij}) \quad (49)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda} \triangleq \{\lambda_i, \forall i \in \mathcal{J}\}$ 表示所有的拉格朗日乘子, 而对应的对偶函数则表示为

$$d(\boldsymbol{\lambda}) = \max_{\mathbf{v}, \mathbf{l}} \{L(\mathbf{v}, \mathbf{l}, \boldsymbol{\lambda}) | (C1) - (C6)\} \quad (50)$$

其对偶问题则表示为

$$\max_{\boldsymbol{\lambda}} \{d(\boldsymbol{\lambda}) | \lambda_i \geq 0, \forall i \in \mathcal{J}\} \quad (51)$$

本文提出了一个双循环迭代算法来求解该问题。

考虑第 n 次外循环, 在给定拉格朗日乘子 $\lambda_i^{(n)}$ 的前提下可以采用连续凸近似技巧推导出式(49)中惩罚项的上界为

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij} (1 - l_{ij}) \leq \sum_{j \in \mathcal{J}_i} \left(l_{ij} - 2l_{ij}^{(t)} l_{ij} + (l_{ij}^{(t)})^2 \right) \quad (52)$$

其中, $l_{ij}^{(t)}$ 是在第 t 个内循环中得到的值。因此, 问题 P3 就可以转化成问题 P4

P4:

$$\max_{\mathbf{v}, \mathbf{l}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \overline{R}_{kv} - \sum_{i \in \mathcal{J}} \lambda_i^{(n)} \sum_{j \in \mathcal{J}_i} \left(l_{ij} - 2l_{ij}^{(t)} l_{ij} + (l_{ij}^{(t)})^2 \right) \quad (53)$$

s.t. C1~C6

其中, \overline{R}_{kv} 是 R_{kv} 的下界, 其具体形式参见式(36)。在给定拉格朗日乘子 λ_i 的情况下, 可以通过 T 个内循环迭代求解无人机 3D 部署优化问题。

在内循环得到最优的无人机位置 $\mathbf{v}^{(n)}$ 和 $l_{ij}^{(n)}$ 后, 使用梯度下降算法更新拉格朗日乘子

$$\lambda_i^{(n+1)} = \max \left(0, \lambda_i^{(n)} + \gamma^{(n)} \sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij}^{(n)} (1 - l_{ij}^{(n)}) \right) \quad (54)$$

其中, $l_{ij}^{(n)}$ 是第 n 个外循环求解无人机部署优化子问题时得到的 l_{ij} 的值, 而 $\gamma^{(n)}$ 为

$$\gamma^{(n)} = \frac{\mu^{(n)} (q_U^{(n)} - q_L^{(n)})}{\sum_{i \in \mathcal{J}} \left(\sum_{j \in \mathcal{J}_i} l_{ij}^{(n)} (1 - l_{ij}^{(n)}) \right)^2} \quad (55)$$

其中, $\mu^{(n)} > 0$ 是一个调节参数, $q_U^{(n)}$ 和 $q_L^{(n)}$ 分别为拉格朗日问题和原问题的目标函数值, 如果在无人机部署优化问题中得到的无人机位置位于非视距区域中, 就把 $q_L^{(n)}$ 的值设置为 0, 以此增大惩罚项并最终使约束 C7 被满足。该算法的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 城市地图辅助的无人机 3D 部署优化算法

输入: 用户估计位置 \mathbf{u}_k , ϵ_k , \mathbf{R}_k^{th} , 建筑物坐标信息

输出: 无人机的位置 \mathbf{v}

初始化: 拉格朗日乘子 $\lambda_i^{(0)}$, 最大外循环次数 N , 最大内循环次数 T , 外循环次数 $n = 0$; 根据用户估计位置和建筑物坐标信息, 计算视距区域的表达式

对 $n = 0$ 到 N 执行外循环;

初始化内循环次数 $t = 0$, 无人机初始位置 $\mathbf{v}^{(0)}$, $l_{ij}^{(0)}$;

对 $t = 0$ 到 T 执行内循环;

给定 $\lambda_i^{(n)}$, 求解问题 P4 得出 $\mathbf{v}^{(t)}$ 和 $l_{ij}^{(t)}$;

更新 $t = t + 1$;

更新 $\mathbf{v}^{(n)} = \mathbf{v}^{(t)}$, $l_{ij}^{(n)} = l_{ij}^{(t)}$;

根据式(54)更新拉格朗日乘子;

更新 $n = n + 1$;

输出当前无人机的位置 $\mathbf{v}^{(n)}$;

4 实验仿真与结果分析

4.1 性能对比实验

本节将通过实验仿真评估本文所提无人机 3D 部署优化算法的性能表现。表 1 总结了仿真实验的一些主要参数。如图 9 所示, 实验考虑一个 500×500 m 且主要由建筑物和道路构成的密集城市环境, 建筑物的占地面积约占总面积的 20%。建筑物

表 1 仿真实验参数

参数	参数值	参数	参数值
通信信号带宽 W_{kv}	1 MHz	定位信号带宽 W	180 kHz
视距链路路径损失指数 α_1	2	非视距链路路径损失指数 α_2	2.7
视距链路参考信道增益 β_1	-38.89 dB	非视距链路参考信道增益 β_2	-48.89 dB
用户 k 的传输功率 P_k	0.01 W	无人机的定位功率 P_u	0.3 W
信号载波频率 f_c	2.1 GHz	地面基站的定位功率 P_n	1 W
OFDM 信号符号时间 T_s	$\frac{1}{1.5 \times 10^4}$ s	子帧包含 NPRS 数	160
噪声功率谱密度 N_0	-157 dBm/Hz	非视距链路的高斯噪声 σ_{NLoS}^2	4×10^{-18} s ²
无人机最低飞行高度 H_{min}	100 m	无人机最高飞行高度 H_{max}	500 m

的高度是随机生成的且服从瑞利分布，范围在 5 m 到 50 m 之间且平均高度为 23 m。3 个地面基站的位置坐标分别为 (15, 15, 10)、(10, 490, 10) 和 (490, 150, 10)；5 个目标用户的位置坐标分别为 (190, 150, 5)、(300, 145, 15)、(380, 50, 4)、(351, 300, 6) 和 (136, 404, 3)。定位精度需求根据不同用户实际中 $\det(\mathbf{H})$ 值的正负性，设置为 $\sqrt{D_1\epsilon} = 0.3(c_1 - c_2)$ 或者 $\sqrt{D_1\epsilon} = 0.3(c_1 + c_2)$ 。通信速率需求 $R_k^{\text{th}} = 4 \text{ Mbit/s}$ 。

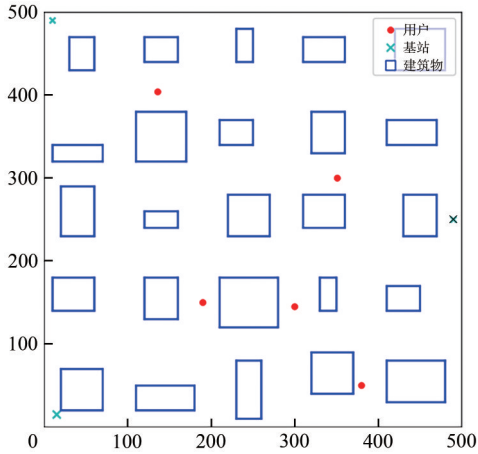


图9 仿真实验场景设置

除了本文算法之外，考虑以下两个方案作为性能比较。

1) 3D 遍历搜索算法。该方案将无人机的飞行区域以 5 m 为步长，划分为一系列的 3D 网格点，并在这些网格点上进行搜索。选择满足定位精度约束、通信速率约束和视距区域约束，并且总通信速率最大的网格点^[27]。该穷举搜索算法作为最优的基准算法，其计算复杂度极高。例如，3D 遍历搜索算法需要接近 1 500 s 来生成一个最优结果；相比之下，本文算法在平均仅需 21.5 s 的情况下，即可获得与 3D 遍历搜索算法性能相近的结果，展现出了显著的计算效率优势。

2) 纯视距信道 (PLoS, pure LoS) 算法。该方案假设将空地信道建模为纯视距状态，通过求解 P2 获得无人机部署位置。进而基于得到的位置解计算其在现实环境中的实际通信速率与定位精度。这一方案代表了现有纯视距信道模型或者概率信道模型的相关工作研究。通过与该方案进行比较，可以展示 3D 城市地图辅助下通信与定位的性能提升。

图 10 展示了本文算法的收敛过程，以及所有

用户的总通信速率和定位误差的 CRLB。当算法收敛之后，问题 P4 的目标函数值就等于所有用户的总通信速率。本文算法一般经过 2~3 次外循环便能迅速收敛，且其通信和定位性能均接近 3D 遍历搜索算法的最优性能（初期性能好于收敛解是由于尚未找到满足约束的可行解）。相比穷举最优解，本文算法的通信速率差距小于 3%，而定位误差的 CRLB 则相差小于 0.1 m²。相比之下，纯视距信道算法的性能表现最差。由于该算法在优化过程中未考虑实际物理环境，优化得到的无人机位置在实际场景中可能受到建筑物遮挡，进而链路质量下降，严重影响了通信和定位性能。总体而言，本文算法的通信速率比纯视距信道算法提升了 46.7%，而定位误差的 CRLB 则降低了 25.6%。

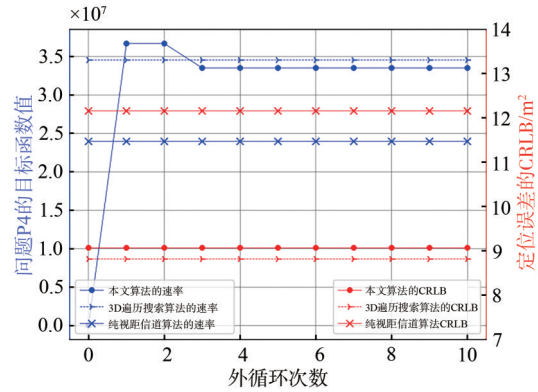


图 10 本文算法通信与定位性能随外循环次数的比较

图 11 探究了不同建筑物平均高度对本文算法性能的影响。具体而言，将图 8 所示的建筑群的楼层都增加 0 m 至 30 m 的高度，模拟不同平均高度的建筑群场景。由图 11 可以看到，纯视距信道算法的总通信速率和定位误差的 CRLB 随着建筑物平均高度的增加而显著下降，因为该算法下无人机位置不会随着建筑物高度变化。而随着建筑物平均高度增加，越来越多的地面用户会被遮挡，导致空地信道由视距链路变成了非视距链路。这说明纯视距信道模型或者概率信道模型并不能适应实际场景，无法准确保障通信和定位性能。相比之下，随着建筑物平均高度的增加，3D 遍历搜索算法和本文算法所得到的总通信速率虽有所下降，但定位误差的 CRLB 却也略微下降了。这是因为无人机会调整至更高的海拔位置，以避开建筑物保持与地面用户的视距链路。无人机海拔的升高增加了垂直方向上的锚点空间多样性，部分抵消了空地距离增大造成的

定位精度下降。此外,本文算法与3D遍历搜索算法的通信和定位性能都非常接近,表明其在实际复杂环境中具有良好的适应性。

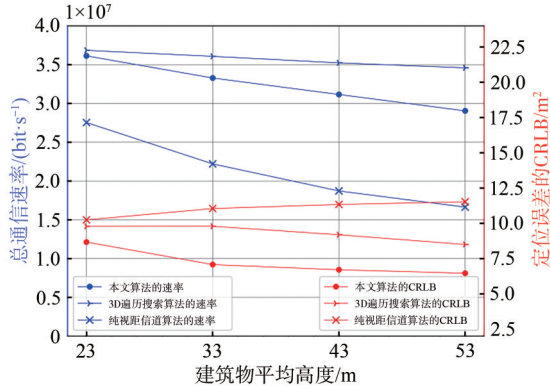


图11 不同建筑物平均高度下的性能比较

4.2 通信与定位性能权衡

本节将探究通信与定位性能之间的权衡问题,并借助本文算法进行深入分析。为了更全面地展示性能权衡的变化情况,本节首先介绍以下两种无人机部署方案,这两种方案分别旨在实现最优的通信性能或定位性能。

1) 通信优先 (CF, communication first) 算法。该方案忽略定位性能的约束,在无人机部署区域内进行穷举搜索,将总通信速率达到最大的网格点作为无人机的部署位置。然后计算无人机在该位置下的总通信速率以及定位误差的CRLB。

2) 定位优先 (LF, localization first) 算法。该方案忽略通信性能的约束,在无人机部署区域内进行穷举搜索,将定位误差的CRLB达到最小的点选为无人机的部署位置。然后计算无人机在该位置下的总通信速率以及定位误差的CRLB。

图12和图13分别展示了在定位精度需求 ϵ 变化下,通信和定位性能之间的权衡关系和无人机3D最优部署位置的变化情况。图13中的A~F点分别对应当 $\epsilon = \{0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8\}$ 时本文算法得到的无人机位置。可以看到,通信优先算法在追求最大通信速率的同时导致了很大的定位误差,其CRLB达到了约19 m²。而定位优先算法虽实现了最小的定位误差,但通信速率却大幅下降,仅为通信优先算法通信速率的55%左右。这一现象的根本原因在于通信服务与定位服务在无人机部署策略上的内在冲突。通信优先算法倾向于将无人机部署在更接近地面用户的位置,而定位优先算法通过提升

无人机的高度来增加定位锚点的空间多样性。本文算法则展现出了在通信与定位性能之间实现高效权衡的能力。随着定位精度需求 ϵ 的增加,本文算法所得到无人机部署高度逐渐提升,从而降低了CRLB值。为实现通信与定位性能之间的有效权衡,设置一个合适的定位精度需求 ϵ 至关重要。通过调整 ϵ 的值,可以确保在满足一定定位精度的同时,尽量保持较高的通信速率,从而实现通信定位一体化服务性能的优化。

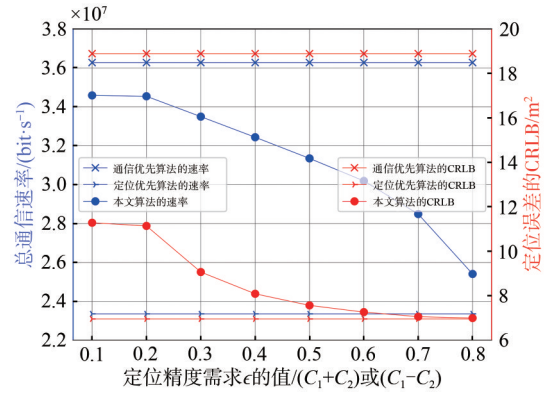


图12 不同定位精度需求下通信和定位性能的权衡

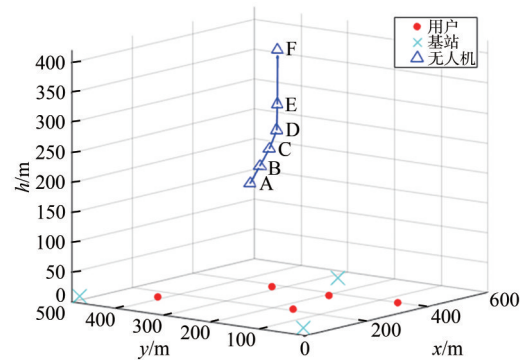


图13 不同定位精度需求下的无人机3D最优部署位置

5 结束语

本文建模了满足地面多用户的通信速率与定位精度需求下最大化网络通信吞吐量的无人机部署优化问题。理论刻画了满足地面定位精度约束条件的无人机可行部署区域,证明了该区域是以目标用户为顶点的标准二阶锥,从而将定位精度约束条件转化为易于分析处理的凸约束,提出了高效的无人机部署优化算法。进而利用城市三维地图辅助无人机部署,在考虑地面建筑物遮挡的情况下,将无人机部署在可以与所有地面用户建立视距链接的区域,解决了传统基于经验的空地信道建模不精准的问

题。通过设计高效的无人机部署优化算法,保障了地面用户的通信与定位性能。仿真实验结果表明,本文算法不仅以低计算复杂度接近最优部署方案性能,还实现了通信与定位性能之间的高效权衡。

在此对本文算法的局限性和未来研究方向进行简要分析。为了便于分析建模,本文采用城市三维地图辅助无人部署的方法较为依赖地面建筑物的标准形态,而对于非标准形态的建筑物信道建模可能欠佳。因此,对于地面存在复杂散射条件当前的视距信道建模也无法全面捕捉。对于复杂城市环境空地信道理论建模困难的问题,可以采取数据驱动回归拟合的模型,并结合零梯度等对模型具体要求较低的部署优化算法。此外,在实际应急场景中,部署多台无人机可以显著地增加服务覆盖面积,提升对地面通信与定位服务的性能。一种较为简单的扩展方法是为每一个无人机都分配不重合的地面服务区域,将多无人机部署问题分解为多个单无人机部署问题。同时,令多无人机相互协同共同构筑空中锚点和基站网络是进一步提升定位性能的关键方法,但其中涉及地面用户与无人机之间的选择接入、通信定位带宽全局分配、无人机之间信号干扰等复杂问题,未来有待进一步挖掘其中的关键问题和解决方法。

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] KHUWAJA A A, CHEN Y F, ZHAO N, et al. A survey of channel modeling for UAV communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2804-2821.
- [3] LYU J B, ZENG Y, ZHANG R, et al. Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3): 604-607.
- [4] QIAN L P, ZHANG H S, WANG Q, et al. Joint multi-domain resource allocation and trajectory optimization in UAV-assisted maritime IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(1): 539-552.
- [5] ALI M A, JAMALIPOUR A. UAV placement and power allocation in uplink and downlink operations of cellular network[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(7): 4383-4393.
- [6] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of things communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(11): 7574-7589.
- [7] YANG Z Y, BI S Z, ZHANG Y J A. Online trajectory and resource optimization for stochastic UAV-enabled MEC systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(7): 5629-5643.
- [8] ZHANG X H, TAO X L, ZHU F, et al. Quality assessment of GNSS observations from an android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 70.
- [9] WANG Z J, LIU R K, LIU Q R, et al. Toward reliable UAV-enabled positioning in mountainous environments: system design and preliminary results[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2022, 71(4): 1435-1463.
- [10] PERAL-ROSADO J A D, RAULEFS R, LÓPEZ-SALCEDO J A, et al. Survey of cellular mobile radio localization methods: from 1G to 5G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1124-1148.
- [11] XHAF A, PERAL-ROSADO J A D, LÓPEZ-SALCEDO J A, et al. Evaluation of 5G positioning performance based on UTDaA, AoA and base-station selective exclusion[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 22(1): 101.
- [12] KIM H J, LEE K, CHOI H J. A novel weighting method for multiple OTDOA based positioning in 3GPP LTE system[C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*. New York: ACM Press, 2016: 292-299.
- [13] CHEN C Y, WU W R. Three-dimensional positioning for LTE systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(4): 3220-3234.
- [14] LIU Y P, WANG J, SHEN Y. Spectrum allocation for UAV-aided relative localization of ground vehicles[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [15] WU Z J, QUAN W F, ZHANG T T. Resource allocation in UAV-aided vehicle localization frameworks[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 98-103.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] WANG Z J, LIU R K, LIU Q R, et al. Energy-efficient data collection and device positioning in UAV-assisted IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(2): 1122-1139.
- [19] MENG K T, WU Q Q, XU J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(2): 97-104.
- [20] LYU Z H, ZHU G X, XU J. Joint maneuver and beamforming de-

- sign for UAV-enabled integrated sensing and communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(4): 2424-2440.
- [21] MENG K T, WU Q Q, MA S D, et al. UAV trajectory and beamforming optimization for integrated periodic sensing and communication[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(6): 1211-1215.
- [22] ZHAO J W, GAO F F, JIA W M, et al. Integrated sensing and communications for UAV communications with jittering effect[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(4): 758-762.
- [23] YANG Z Y, BI S Z, ZHANG Y J A. Deployment optimization of dual-functional UAVs for integrated localization and communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(12): 9672-9687.
- [24] PERAL-ROSADO J A D, LÓPEZ-SALCEDO J A, SECO-GRANADOS G, et al. Achievable localization accuracy of the positioning reference signal of 3GPP LTE[C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Localization and GNSS. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [25] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall PTR, 1993.
- [26] BI S Z, YU J X, YANG Z Y, et al. Joint 3-D deployment and resource allocation for UAV-assisted integrated communication and localization[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(10): 1672-1676.
- [27] YI P F, ZHU L, ZHU L P, et al. Joint 3-D positioning and power allocation for UAV relay aided by geographic information[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 8148-8162.
- [28] BI S Z, ZHUO Z P, LIN X H, et al. Physical-environment-map-aided 3-D deployment optimization for UAV-assisted integrated localization and communication in urban areas[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(9): 15490-15503.

[作者简介]



毕宿志(1987-), 男, 博士, 深圳大学电子与信息工程学院教授, 主要研究方向为智能无线通信、移动计算、无线网络资源管理优化。