

城市环境下单无人机测向定位航迹优化算法*

陈方正, 郝绍杰

(中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要:为解决单架无人机在城市环境中对辐射源目标的定位问题,提出了一种基于环境预测法的单无人机测向定位航迹优化算法。使用交互多模型-扩展卡尔曼滤波进行视距和非视距信号混合环境下的目标估计。结合估计的目标位置和城市地理信息模型,基于视线追踪法求解信号遮挡区域和多径信号干扰区域。在滚动时域控制算法框架下生成无人机预测轨迹,以最大化 Fisher 信息矩阵行列式为测向定位评价准则,考虑建筑物障碍以及其对信号的遮挡和反射效应对无人机测向定位航迹的影响,控制无人机选择最优航向飞行。仿真结果表明,该方法能够使无人机在存在障碍、信号遮挡和多径干扰的环境下实现对目标的高精度测向定位,为解决城市环境下的单架无人机测向定位问题提供了新思路。

关键词:测向定位;航迹优化;多径效应;交互多模型;Fisher 信息矩阵

中图分类号:TP13 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2022)06-126-08



听语音
与作者互动
聊科研

Trajectory optimization of single unmanned aerial vehicle for bearings-only target localization in urban environments

CHEN Fangzheng, HAO Shaojie

(The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: To solve the problem of radiation-source target localization for a single UAV (unmanned aerial vehicle) in an urban environment, a new trajectory optimization algorithm for bearings-only target localization based on the environment prediction method was proposed. Interacting multiple model methods coupled with the extended Kalman filter was used to estimate the target localization in the line-of-sight and non-line-of-sight mixed environment. Based on the estimated target location and urban geographic information system, the electromagnetic signal occlusion region and the multipath interference region were calculated by using the line of sight tracking method. Under the framework of receding horizon method, the UAV prediction trajectory was generated, so as to maximize the Fisher information matrix determinant as the orientation positioning evaluation criterion. Considering the influence of building obstacles and their occlusion and reflection effects in the localization process, the UAV was controlled to choose the optimal heading flight. The numerical simulation results show that the trajectory optimization algorithm enables the UAV to perform high-precision bearings-only target localization in the complex environment containing obstacles, signal occlusion, and multipath interference. The algorithm provides a new way to solve the problem of bearings-only target localization for single UAV in an urban environment.

Keywords: bearings-only target localization; trajectory optimization; multipath effect; interacting multiple model; Fisher information matrix

近年来随着机载电子设备的小型化,将无人机(unmanned aerial vehicles, UAV)作为机动观测平台,搭载测向设备对敌方目标进行探测定位成为重要的发展方向。机动单站测向定位是指单个观测站通过机动,在不同位置测得目标方位角信息并结合某种估计算法实现对目标的快速定位和跟踪^[1]。利用 UAV 等单观测站进行测向定位航迹优化问题的本质是研究如何通过优化观测平台的运动轨迹来提升对目标预测的可观测性问题^[2-5]。然而以往这些研究大多基于理想飞行空

间,缺乏复杂环境因素对优化航迹影响的考量。因此近年来,结合飞行环境因素进行测向定位航迹优化成为研究的热点。其中,文献[6-7]在飞行环境中引入了威胁模型,文献[8]则研究了飞行环境中的静、动障碍和雷达探测对定位航迹的影响。不过这些环境模型通常较为简单,距离实用仍有一定差距,并且没有考虑环境对电磁信号传播的影响,从而限制了其实际应用,特别是在复杂城市环境中的应用。

在城市环境中,大量建筑物的存在将会对目

* 收稿日期:2020-11-06

基金项目:安徽省重点研究与开发计划资助项目(112185762074)

作者简介:陈方正(1990—),男,山东青岛人,工程师,博士,E-mail:chen_fangzheng@126.com

标形成遮挡和空域限制,使得对城市环境中的目标定位和跟踪成为一个极具挑战性的课题。美国空军研究实验室的 COUNTER (cooperative operations in urban terrain) 项目开展了协同多 UAV 实现对城市环境中目标侦查和跟踪的研究^[9]。Shaferman 等考虑城市环境中的空域限制和地形遮挡,以目标观测总时间为评价函数,使用遗传算法求解多架 UAV 对目标跟踪的协同规划问题,但是该方法为一种离线规划方法,并且假设目标运动规律已知^[10]。王林等提出一种基于主动感知的多 UAV 协作式目标跟踪问题求解框架,采用分布式无色信息滤波实现融合目标状态估计和预测,根据城市地物信息计算目标可视区域,结合随机搜索与滚动时域控制实现城市环境中多 UAV 在线协同目标跟踪^[11]。Yu 等假设目标运动为 Markov 过程,实现了使用 UAV 和无人车协同跟踪城市中的运动目标^[12]。Yao 等考虑城市环境中的遮挡、空间约束、UAV 动力学约束及其探测范围等约束,基于模型预测控制框架,求解多 UAV 协同跟踪目标的问题^[13]。Oh 等根据目标估计位置计算三维视距(line-of-sight, LOS)通信区域,作为 UAV 盘旋区域,保证了已知合作目标在城市中运动时与 UAV 之间保持无遮挡^[14]。Bhagat 等提出一种基于深度强化学习的目标跟踪算法,实现单 UAV 在城市环境中跟踪运动目标,并考虑了目标运动的随机性^[15]。胡超芳等考虑建筑物对无人机视线的遮挡等因素,采用基于分布式预测控制的模糊多目标航迹规划方法解决城市环境中多无人机协同追踪地面目标问题^[16-17]。刘大千等针对未知城市环境下的目标搜索问题,构建了基于信息共享代价和区域覆盖收益的协同优化模型,利用群智能方法求解,使得平均目标发现成功率和区域覆盖率均有明显提升^[18]。但是在上述研究中,UAV 通常采用光电设备对目标进行探测和跟踪,目标在 UAV 探测视场内即认为满足观测要求。而对于城市环境中辐射源目标的定位问题来说,由于建筑物对电磁信号存在反射、绕射和散射效应,城市环境中电磁信号传播存在显著的 LOS 和非视距(non-line-of-sight, NLOS)信号混合的情况,存在多径干扰,严重降低定位算法的性能和精度^[19]。目前无论采用何种定位体制,针对 LOS/NLOS 混合环境下对辐射源目标的定位问题,常见的手段仍是从数据处理的角度入手,主要包括 NLOS 鉴别与消除方法^[20-21]、基于 NLOS 传播模型的方法^[1,22-23]、基于射线跟踪的定位方法^[24]以及间接滤波方法^[25-26]等。然而目前不管

采用何种方法,由于 NLOS 引起的参数估计误差受实际环境影响较大,所以并不存在普适的算法完全消除 NLOS 误差。文献[27]考虑全球定位系统(global positioning system, GPS)卫星信号在城市中的多径效应对其定位误差的影响,规划 UAV 航迹时考虑选择定位精度较高的区域,为城市环境中单 UAV 测向定位航迹优化提供了思路。

因此,本文针对城市环境中辐射源目标的测向定位问题,提出了基于环境预测的单站测向定位航迹优化算法,以单架 UAV 作为机动平台,基于滚动时域控制框架,在线生成满足 UAV 运动学约束的预测航迹,根据当前估计目标位置和已知环境信息,预测信号遮挡区和 NLOS 信号干扰区,构建预测航迹评价函数,使 UAV 尽量在无遮挡和干扰的空域内进行测向定位飞行,以改善测向信号的质量和连续性,同时考虑躲避建筑障碍,进而从全新的角度解决单架 UAV 在复杂城市环境下的精确测向定位问题。

1 城市环境测向定位问题描述

1.1 机动单 UAV 测向定位问题描述

三维空间中单 UAV 测向定位示意图如图 1 所示。其中 $Oxyz$ 为地面惯性坐标系; $\mathbf{X}_T = [x_T, y_T, z_T]^T$ 为待定位目标; $\mathbf{X}_{U,k} = [x_{U,k}, y_{U,k}, z_{U,k}, \psi_{U,k}]^T$ 为 UAV 状态向量, \mathbf{V}_k 为其速度矢量,下标 k 为时间步, η_k 为其观测的 \mathbf{X}_T 的方位角。

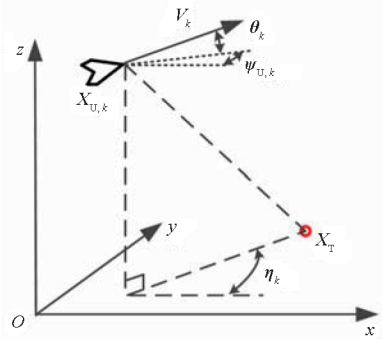


图 1 测向定位示意图

Fig. 1 Illustration for bearings-only target localization

UAV 离散形式运动学模型为:

$$\begin{cases} x_{U,k+1} = x_{U,k} + V\Delta t \cos(\psi_{U,k}) \cos(\theta_k) \\ y_{U,k+1} = y_{U,k} + V\Delta t \sin(\psi_{U,k}) \cos(\theta_k) \\ z_{U,k+1} = z_{U,k} + V\Delta t \sin(\theta_k) \\ \psi_{U,k+1} = \psi_{U,k} + \Delta t \omega_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: $[x_{U,k}, y_{U,k}, z_{U,k}]^T$ 为 UAV 当前 k 时刻坐标,在本文中认为其已知且足够精确; $\psi_{U,k}$ 为 UAV 当前航向, V 为 UAV 速度标量, Δt 为离散时间间隔;

控制量为 $\mathbf{U}_k = [\theta_k, \omega_k]^T$, 其中 θ_k 满足 $\theta_{\min} \leq \theta_k \leq \theta_{\max}$, θ_{\min} 和 θ_{\max} 分别是无人机最小和最大速度倾角, ω_k 为 UAV 航向偏转角速度, 满足 $-\omega_{\max} \leq \omega_k \leq \omega_{\max}$, ω_{\max} 为无人机最大航向偏转角速度。此外无人机最大速度倾角变化率为 $\dot{\theta}_{\max}$, 最大航向角速度变化率为 $\dot{\omega}_{\max}$ 。

在本文中, 假设 \mathbf{X}_T 位于地面且静止, 即 $z_T = 0$ m, UAV 仅能测量 \mathbf{X}_T 的方位角 η_k , 不考虑过程噪声, 选取 $\mathbf{X}_T = [x_T, y_T]^T$ 为待估计的状态变量, 则由图 1 可知, 理想观测环境下 UAV 对 \mathbf{X}_T 的方位观测方程可表示为:

$$\eta_k = h(\mathbf{X}_T, \mathbf{X}_{U,k}) = \arctan\left(\frac{y_T - y_{U,k}}{x_T - x_{U,k}}\right) + \varepsilon_k \quad (2)$$

式中, ε_k 是均值为 μ 、方差为 σ^2 的高斯白噪声序列。

1.2 城市环境中测向定位面临的问题

1.2.1 建筑物对飞行空域的限制

UAV 在城市环境中安全飞行, 首先需要保证的是其不能与建筑物等障碍物发生碰撞。本文中 使用几何体表示建筑物, UAV 在飞行过程中时刻 需要对这些建筑物进行躲避, 避免与其相撞, 即 满足:

$$[x_{U,k}, y_{U,k}, z_{U,k}]^T \notin \mathbf{A}_{\text{Build}} = \bigcup_{j=1}^Q \mathbf{B}_j \quad (3)$$

式中, $\mathbf{A}_{\text{Build}}$ 为建筑物占据总空间, \mathbf{B}_j 为第 j 个障碍物占据的三维空间, Q 为障碍物总数量。此外, 对于小型 UAV 来说, 受其性能影响, 其最大飞行高度有限, 从安全角度考虑飞行高度也不宜过低, 因此需将其飞行高度限制在一定范围内, 即满足:

$$h_{\min} \leq z_{U,k} \leq h_{\max} \quad (4)$$

式中, h_{\min} 、 h_{\max} 分别为 UAV 最小、最大飞行高度。

1.2.2 建筑物对电磁信号传播的影响

本文仅考虑建筑物对电磁信号的遮挡和反射效应, 基于射线追踪法^[28] 计算信号传播路径。为表示直观, 以二维形式表示, 如图 2 所示, 容易推广到三维空间。当 UAV 处于 $\mathbf{X}'_{U,k}$ 位置时, 受建筑物遮挡, 此时 UAV 无法接收到由 \mathbf{X}_T 发出的电磁信号, 因而无法测量 \mathbf{X}_T 方位。所有 \mathbf{X}_T 受到遮挡的位置集合称为信号遮挡区, 表示为 $\mathbf{A}_{\text{Shadow}}$ 。根据文献^[29], 多径现象干扰的原理为: 当 UAV 处于 $\mathbf{X}_{U,k}$ 位置时, \mathbf{X}_T 发射的电磁信号经由建筑物反射形成 NLOS 信号, 与 LOS 信号叠加, 使 UAV 测量的 η_k 偏离实际值, 进而产生多径干扰, 影响 UAV 测向定位的精度。

叠加信号的场强矢量由式(5) 计算^[29]。

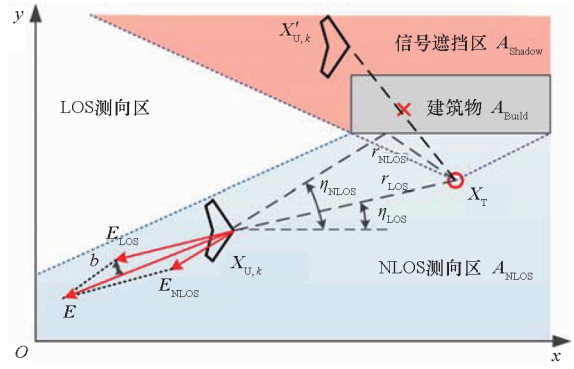


图 2 建筑物对电磁信号传播的影响

Fig. 2 Influence of buildings on electromagnetic signal propagation

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{LOS}} + \sum_{i=1}^M \mathbf{E}_{\text{NLOS},i} \quad (5)$$

式中, \mathbf{E}_{LOS} 为 LOS 信号场强矢量, $\mathbf{E}_{\text{NLOS},i}$ 为第 i 路 NLOS 信号场强矢量, M 为 NLOS 信号路径个数。场强大小计算如式(6) 所示。

$$\begin{cases} |\mathbf{E}_{\text{LOS}}| = \frac{245 \sqrt{PD_{\text{LOS}}}}{r_{\text{LOS}}} \\ |\mathbf{E}_{\text{NLOS},i}| = \frac{245 \sqrt{PD_{\text{NLOS},i}} R_2}{r_{\text{NLOS},i}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, P 为天线发射功率, D_{LOS} 和 $D_{\text{NLOS},i}$ 分别为天线在各路径方向的方向性系数, r_{LOS} 为 LOS 路径距离, $r_{\text{NLOS},i}$ 为 NLOS 路径距离, R_2 为反射面对电磁信号的反射率。所有存在 NLOS 信号的位置集合称为信号反射区, 表示为 \mathbf{A}_{NLOS} 。

采用参考文献^[28] 所述的射线追踪法计算 $\mathbf{A}_{\text{Shadow}}$ 和 \mathbf{A}_{NLOS} 。为了简化算法, 电磁信号的传播仅考虑一次反射。 $\mathbf{A}_{\text{Shadow}}$ 计算如式(7) 所示。

$$\mathbf{A}_{\text{Shadow}} = \bigcup_{s=1}^S \mathbf{A}_{\text{Shadow},s} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{A}_{\text{Shadow},s}$ 为 \mathbf{X}_T 关于建筑可见墙面 s 的信号遮挡区, 是由顶点围成的多面体, 根据射线传播原理, 其顶点坐标为:

$$\mathbf{X}_{\text{shadow},s} = \{\mathbf{X} | \mathbf{X} = \mathbf{X}_{s,i}, \mathbf{X} = l(\mathbf{X}_{s,i} - \mathbf{X}_T), i = 1, 2, 3, 4\} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{X}_{s,i}$ 为墙面 s 的第 i 个顶点坐标; l 为比例因子, 为使 $\mathbf{A}_{\text{Shadow}}$ 影响距离足够远, 令 $l = 50$ 。同理, \mathbf{A}_{NLOS} 由式(9) 计算:

$$\mathbf{A}_{\text{NLOS}} = \bigcup_{s=1}^S \mathbf{A}_{\text{NLOS},s} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{A}_{\text{NLOS},s}$ 为墙面 s 的信号反射区, 也是由顶点围成的多面体, 其顶点坐标为:

$$\mathbf{X}_{\text{NLOS},s} = \{\mathbf{X} | \mathbf{X} = \mathbf{X}_{s,i}, \mathbf{X} = l(\mathbf{X}_{s,i} - \mathbf{X}'_{T,s}), i = 1, 2, 3, 4\} \quad (10)$$

式中, $X_{T,s}$ 为 X_T 关于墙面 s 的镜像点, 根据空间几何容易得到。

2 基于环境预测的单 UAV 测向定位航迹优化算法

本文从 LOS/NLOS 混合环境下定位算法和基于环境预测的航迹优化算法两个方面解决 UAV 在城市环境中对辐射源目标定位的问题。

2.1 LOS/NLOS 混合环境下定位算法

交互多模型(interacting multiple model, IMM)与滤波技术相结合, 可改善 LOS/NLOS 混合环境下的定位算法性能^[30]。IMM 算法无须对 LOS/NLOS 进行鉴别, 而是通过滤波模型的模型概率对 LOS/NLOS 进行概率估计, 进而加权融合, 在一定程度上避免了基于鉴别的算法中鉴别不准引起的误差^[31]。通常可以近似认为 NLOS 信号与 LOS 信号在噪声特性上不同^[30], 因此本文采用 IMM 算法框架和扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)结合的 IMM-EKF 算法, 通过对 LOS 和 NLOS 条件下观测噪声模型的改造, 实现定位过程中多模型的融合和自适应调整, 改善 LOS/NLOS 混合环境下的测向定位算法的稳定性。IMM-EKF 算法流程参见文献[25]。由于目标静止, 本文中各 EKF 滤波器均采用相同的预测模型, 但是对于不同的观测信号状态, 采用不同的观测噪声模型, 如式(11)~(12)所示。

$$\mu = \begin{cases} \mu_{\text{LOS}} & \text{LOS}_1 \\ \mu_{\text{NLOS}} & \text{NLOS}_2 \\ -\mu_{\text{NLOS}} & \text{NLOS}_3 \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_{\text{LOS}}^2 & \text{LOS}_1 \\ \sigma_{\text{NLOS}}^2 & \text{NLOS}_{2,3} \end{cases} \quad (12)$$

式中, LOS 和 NLOS 的下标数字代表滤波模型编号, LOS 条件下测量的均值和方差分别为 $\mu_{\text{LOS}} = 0.0^\circ$, $\sigma_{\text{LOS}}^2 = (0.2^\circ)^2$, 由测向设备性能决定。在 NLOS 环境下测向均值发生偏移, 分布方差增大, 本文中取 $\mu_{\text{NLOS}} = 20^\circ$ 和 $\sigma_{\text{NLOS}}^2 = (1.0^\circ)^2$, 由于是对方位角度 η_k 的测量, 因此均值包含正负。

2.2 基于环境预测的航迹规划算法原理

UAV 在城市环境中飞行并对电磁辐射源目标 X_T 进行测向定位时, 首先要保证其不与建筑发生碰撞, 其次需要 X_T 与 UAV 之间保持 LOS, 同时需要尽量减小 NLOS 信号对测向精度的影响, 才能确保最终定位的精度。然而在 X_T 未知的前提下, 单架 UAV 仅依赖实际测量数据难以获得整

个城市环境中的电磁场分布, 无法选择有利的位置进行测向, 并且由于 NLOS 信号引起的观测误差受实际环境影响较大, 单纯从数据处理着手无法完全消除 NLOS 信号带来的估计误差。实际上由于建筑物尺寸是有限的, 因此其对信号的遮挡和反射的影响区域也是有限的, 在城市环境中总是存在较为理想的 LOS 信号区域, UAV 在该区域内测向精度较高。

为此本文提出基于环境预测的单 UAV 测向定位航迹优化算法, 如图 3 所示, 其基本思想是: 使用定位评价函数改善定位航迹的可观测性, 基于已知城市环境模型 A_{Build} 和当前预测的目标位置 \hat{X}_T , 根据式(7)~(10)计算方法, 用 \hat{X}_T 替换 X_T , 通过视线追踪法估计 \hat{A}_{Shadow} 和 \hat{A}_{NLOS} (上标“^”表示估计值)。通过在线航迹优化算法, 使 UAV 避开 $A_{\text{Build}} \cup \hat{A}_{\text{Shadow}}$ 区域, 减小其在 \hat{A}_{NLOS} 中飞行的时间, 进而提高城市环境中测向定位的精度。随着定位过程中 $\hat{X}_T \rightarrow X_T$, 可使 $\hat{A}_{\text{Shadow}} \rightarrow A_{\text{Shadow}}$, $\hat{A}_{\text{NLOS}} \rightarrow A_{\text{NLOS}}$ 。为了降低计算量, 本算法仅对 UAV 预测航点是否进入 \hat{A}_{NLOS} 进行评价, 而不是对整个 \hat{A}_{NLOS} 内 NLOS 信号分布情况进行计算。算法依赖地理信息系统(geographic information system, GIS)提供的城市环境模型 A_{Build} , 该模型是电磁信号传播预测和 UAV 避障的基础。

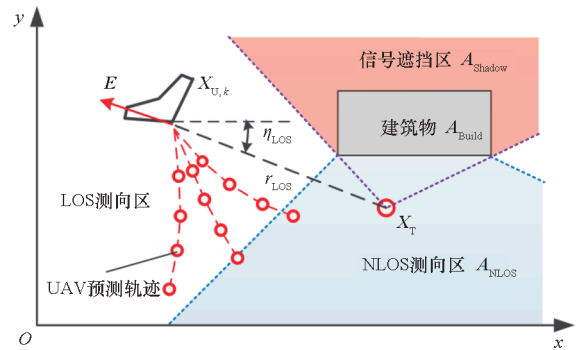


图3 基于环境预测的单 UAV 测向定位航迹优化示意图
Fig. 3 Trajectory optimization illustration of single UAV for bearings-only target localization based on environmental prediction

本文以 Fisher 信息矩阵(Fisher information matrix, FIM)行列式最大作为 UAV 测向定位航迹优化的准则以提高对 X_T 的定位精度。文献[32]推导了无过程噪声条件下 FIM 的递推计算方法:

$$FIM_{k+1} = [\Phi_{k+1}^{-1}]^T FIM_k \Phi_{k+1}^{-1} + H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} H_{k+1} \quad (13)$$

式中, $\Phi_{k+1|k}$ 为 X_T 状态转移矩阵, X_T 静止, 故

$$\Phi_{k+1|k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

FIM_k 为 Fisher 信息矩阵, R_k 为观测噪声序列 ε_k 的协方差矩阵, H_k 为观测方程 $h(\cdot)$ 的雅可比矩阵, 表达式为

$$H_k = \frac{\partial H}{\partial X_T} = \left[-\frac{y_{T,k} - y_{U,k}}{g_k^2}, \frac{x_{T,k} - x_{U,k}}{g_k^2} \right] \quad (15)$$

其中, $g_k = \sqrt{(x_{T,k} - x_{U,k})^2 + (y_{T,k} - y_{U,k})^2}$ 。若已知当前 FIM_k 和 UAV 的某条预测运动航迹 $Tr_p = \{X_{U,s,p} | s = k+1, k+2, \dots, k+n\}$ (其中 n 为预测步数, p 为轨迹编号), 以及 IMM-EKF 中滤波器 f 估计的目标位置 $\hat{X}_{T,k}^f$, 由其替代式中的真值 X_T , 可由式(13)得到该条航迹在滤波器 f 中的多步预测值 $FIM_{k+n,p}^f$ 。在 IMM-EKF 算法中, u_k^f 为模型概率因子, 体现了不同滤波模型的可信度, 因此基于 u_k^f 综合不同 $FIM_{k+n,p}^f$ 获得该条航迹关于测向定位的评价函数为:

$$J_{FIM,p} = \sum_{j=1}^3 u_k^f \det(FIM_{k+n,p}^f) \quad (16)$$

式中, $\det(\cdot)$ 为求行列式函数, u_k^f 计算式为:

$$u_k^f = \frac{A_k^f \bar{c}_k^f}{\sum_{j=1}^3 A_k^f \bar{c}_k^f} \quad (17)$$

其中, A_k^f 为观测似然函数, \bar{c}_k^f 为归一化常数, 具体计算方法参见文献[25]。

UAV 应尽量避免进入 A_{Build} 和 A_{Shadow} 区域。因此采用式(18)所述评价函数, 以未进入上述区域的最大预步数为评价函数。

$$J_{T,p} = \arg \max(s), \quad \{s | X_{U,s,p} \notin (A_{Build} \cup \hat{A}_{Shadow})\} \quad (18)$$

UAV 可以进入 NLOS 测向区, 但是 NLOS 导致的多径干扰会影响 UAV 测向定位的精度, 因此应尽量减少在 A_{NLOS} 中的停留时间, 评价函数如式(19)所示。

$$\begin{cases} J_{NLOS,p} = \sum_{s=1}^n F_{NLOS,p} \\ F_{NLOS,p} = \begin{cases} 0 & X_{U,s,p} \notin \hat{A}_{NLOS} \\ 1 & X_{U,s,p} \in \hat{A}_{NLOS} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

综合考虑定位、避障、信号遮挡和信号多径干扰等因素, 一条航迹的总评价函数为:

$$J_p = c_1 J_{FIM,p} + c_2 J_{T,p} + c_3 J_{NLOS,p} \quad (20)$$

式中, $c_1 = 0.2$ 、 $c_2 = 0.5$ 、 $c_3 = -0.3$ 为权重因子。由式(16)~(20)可知, 若对 $\forall p$ 均有 $Tr_p \notin (A_{Build} \cup \hat{A}_{Shadow})$, 则 $J_{T,p}$ 对航迹无影响; 若对 $\forall p$

均有 $Tr_p \in \hat{A}_{NLOS}$, 则 $J_{NLOS,p}$ 对航迹无影响; 同时满足以上两个条件, 航迹仅与 $J_{FIM,p}$ 有关, 此时 c_1 较小同样可以满足测向定位航迹优化。当 $J_{T,p}$ 或者 $J_{NLOS,p}$ 对航迹产生影响时, UAV 必须及时改变航迹以改善测向观测环境。考虑到无人机避障和避免信号遮挡是完成城市环境定位任务的前提, 因此相关评价函数 $J_{T,p}$ 的权重 c_2 设置较大, c_3 次之。多条航迹构成式(21)评价函数集合。

$$J = [J_1, J_2, \dots, J_p]^T \quad (21)$$

具体算法流程如算法 1 所示。

算法 1 基于环境预测的单 UAV 测向定位航迹优化算法
Alg. 1 Trajectory optimization algorithm of single UAV for bearings-only target localization based on environmental prediction

初始化: $\hat{X}_{T,0}, \Phi, X_{U,0}$

1. While $k \leq 250$

2. 更新 GIS 中的目标位置 $\hat{X}_{T,k+1}$, 估计 $\hat{A}_{NLOS}, \hat{A}_{Shadow}$;

3. 根据当前 UAV 速度和角速度生成控制量的采样空间:

$$\begin{cases} \theta_{\min} = \max(V_{\min}, \theta_k - \dot{\theta}_{\max} \Delta t) \\ \theta_{\max} = \min(\theta_{\max}, \theta_k + \dot{\theta}_{\max} \Delta t) \\ \omega_{\min} = \max(-\omega_{\max}, \omega_k - \dot{\omega}_{\max} \Delta t) \\ \omega_{\max} = \min(\omega_{\max}, \omega_k + \dot{\omega}_{\max} \Delta t) \end{cases}$$

4. For $\theta_k = \theta_{\min} : \theta_{Step} : \theta_{\max}$

5. For $\omega_k = \omega_{\min} : \omega_{Step} : \omega_{\max}$

6. 根据当前 UAV 状态 $X_{U,k}$ 、控制量 U_k 和 UAV 运动学方程, 预测航迹 Tr_p ;

7. 分别计算定位评价函数 $J_{FIM,p}$, 避障评价函数 $J_{T,p}$, NLOS 评价函数 $J_{NLOS,p}$;

8. 计算该条预测航迹总评价函数:

$$J_p = c_1 J_{FIM,p} + c_2 J_{T,p} + c_3 J_{NLOS,p}$$

9. End

10. End

11. 求得最优控制量 $U_k = \arg \max(J)$;

12. 使用输出的控制量控制 UAV 运动一个时间步;

13. 根据无人的位置变化和观测值使用 IMM-EKF 进行滤波, 更新目标状态 $\hat{X}_{T,k+1}$ 和 $u_{k,f}$;

14. 根据 UAV 位置和目标状态变化更新 FIM_{k+1} ;

15. $k = k + 1$;

End

根据文献[33]分析本文所述算法在 UAV 进行一次决策循环的时间复杂度, 采用大 O 表示法, 其时间复杂度主要与下列因素有关: 环境中建筑物数量 B 、航迹预测长度 n 以及控制量各自的

离散数量 S 。算法第 2 行,需对每个建筑物的外立面根据式(7)~(10)进行计算求解 \hat{A}_{Shadow} 和 \hat{A}_{NLOS} ,因此其时间复杂度为 $O(B)$ 。算法第 3 行仅需计算 1 次,其时间复杂度为 $O(1)$ 。算法 6~8 行计算单条预测航迹的评价函数,其中第 6 行根据式(1)计算 n 次得到预测航迹,其时间复杂度为 $O(n)$ 。第 7 行计算各评价函数,其中 $J_{\text{FIM},p}$ 根据式(13)~(17)对每个预测航点进行计算,其时间复杂度为 $O(n)$; $J_{T,p}$ 和 $J_{\text{NLOS},p}$ 根据式(18)和式(19),对每一个预测航点是否属于 $A_{\text{Build}} \cup \hat{A}_{\text{Shadow}}$ 或 \hat{A}_{NLOS} 依次进行判断,因此其时间复杂度为 $O(nB)$ 。算法第 8 行执行 1 次,时间复杂度为 $O(1)$ 。航迹评价函数的计算嵌套在离散控制量的双层循环中,因此算法第 4~10 行整体复杂度为 $O(S^2(n+nB+1))$ 。算法第 11 行采用遍历比较的方法,与航迹数量有关,其时间复杂度为 $O(S^2)$,算法第 12~15 行在本文中规模无关,因此算法整体时间复杂度为:

$$O(B) + O(1) + O(S^2(n+nB+1)) + O(S^2) = O(S^2nB) \quad (22)$$

由式(22)可知,本文算法复杂度对于 S 、 n 和 B 来说属于多项式复杂度,虽问题规模增加,但时间非爆炸式增长。

3 算法仿真验证

通过仿真验证本文算法的有效性。假设固定辐射源位于 $X_T = [5\ 000\ \text{m}, 5\ 000\ \text{m}, 0\ \text{m}]^T$,采用全向天线,方向系数 $D=1$,发射功率为 $P=1\ \text{W}$ 。 X_T 附近有两栋较为高大的建筑物,高度分别为 100 m 和 200 m,均对 X_T 电磁信号产生遮挡和反射,存在 NLOS 干扰,UAV 实际测向值根据 1.2.2 节方法计算,假设建筑物表面反射系数 $R_2=0.5$ 。UAV 初始状态为 $X_{U,0} = [0\ \text{m}, 0\ \text{m}, 200\ \text{m}, 0^\circ]^T$,对 X_T 进行机动测向定位。UAV 飞行性能为 $V=25\ \text{m/s}$, $\theta_{\max}=5^\circ$, $\theta_{\min}=-5^\circ$, $\dot{\theta}_{\max}=1\ (\text{^\circ})/\text{s}$, $\omega_{\max}=8\ (\text{^\circ})/\text{s}$, $\dot{\omega}_{\max}=1\ (\text{^\circ})/\text{s}^2$, $h_{\min}=100\ \text{m}$, $h_{\max}=400\ \text{m}$,测向时间间隔为 $\Delta t=2\ \text{s}$ 。为了说明本文算法的有效性,设置三种航迹评价函数,如表 1 所示。其中航迹 3 仅考虑 $J_{\text{FIM},p}$,为一般仅考虑改善纯测角定位精度航迹规划问题,与文献[3]中相同。航迹 2 增加 $J_{T,p}$ 因子,通过比较航迹 2 和航迹 3 可以说明避障和考虑避免遮挡对定位结果的影响。航迹 1 在航迹 2 的基础上增加 $J_{\text{NLOS},p}$,与航迹 2 和航迹 3 相比可以说明避障、避免遮挡和避免进入 NLOS 区域对定位结果的影

响。当 UAV 进入 A_{Shadow} 区域,无观测信号时,保持上一步飞行状态飞行,每种条件均进行 50 次 Monte-Carlo 仿真。使用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 评估算法定位精度:

$$RMSE_k = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sqrt{(\hat{x}_{T,k,l} - x_T)^2 + (\hat{y}_{T,k,l} - y_T)^2} \quad (23)$$

式中, $[\hat{x}_{T,k,l}, \hat{y}_{T,k,l}]^T$ 为 UAV 在第 l 次仿真,第 k 次测量时的 X_T 估计位置。

表 1 不同航迹最终定位精度比较

航迹名称	航迹评价函数	最终定位精度 (RMSE)/m
航迹 1	$J_p = c_1 J_{\text{FIM},p} + c_2 J_{T,p} + c_3 J_{\text{NLOS},p}$	1.2
航迹 2	$J_p = c_1 J_{\text{FIM},p} + c_2 J_{T,p}$	98.4
航迹 3	$J_p = c_1 J_{\text{FIM},p}$	6.5

三种航迹最终定位精度如表 1 所示,其中航迹 1 评价函数最为全面,定位精度最高。图 4 为 UAV 某次定位航迹,图中 A_{Shadow} 和 A_{NLOS} 根据 X_T 实际位置计算,图 5 为平均定位误差收敛过程。由图 4 和图 5 可知,由于航迹 3 只考虑了定位评价因素,UAV 在定位过程中首先进入 A_{Shadow} ,导致 X_T 被遮挡,此时滤波算法不再更新, $RMSE_k$ 保持固定值 ($80 \leq k \leq 120$)。航迹 3 的末端进入 A_{NLOS} ,由于 NLOS 信号的干扰,UAV 最终定位精度受到一定程度的影响。航迹 2 添加了 $J_{T,p}$ 评价因素,使得 UAV 在飞行过程中通过机动避开了 A_{Shadow} ,有效改善了 X_T 被遮挡的问题,并且在机动过程中没有与建筑物发生碰撞,同时说明了避障约束的有效性。但是 UAV 沿航迹 2 飞行,更早地进入 A_{NLOS} ,在 A_{NLOS} 中不同位置 NLOS 信号的干扰强度也不尽相同,航迹 2 相比于航迹 3 定位精度受到 NLOS 信号更强烈的影响,IMM-EKF 滤波器虽然

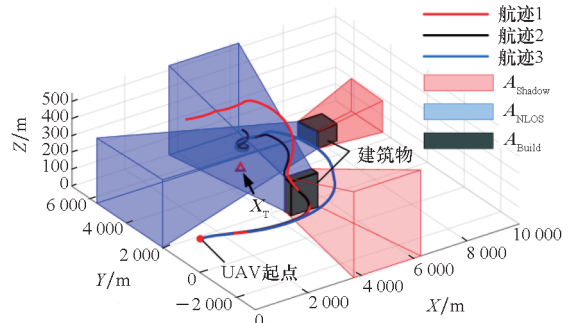


图 4 航迹对比

Fig. 4 Flight path comparison

不致发散但是导致航迹 2 末段 $RMSE_k$ 不降反升, 误差最大。航迹 1 由于考虑了 $J_{T,p}$ 、 $J_{NLOS,p}$ 评价因素, 因此在飞行定位过程中, 首先类似于航迹 2 通过机动避开了 A_{Build} 和 A_{Shadow} , 保持 X_T 未被遮挡, 同时也避免了 UAV 在航迹末端进入 A_{NLOS} , 进而使其不受到 NLOS 信号的影响, 因此最终定位精度最高。

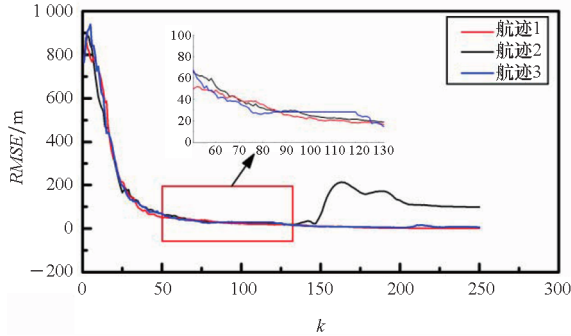


图 5 平均定位误差收敛过程

Fig. 5 Convergence process of RMSE

4 结论

本文针对城市复杂环境下的单 UAV 对辐射源目标的测向定位问题, 提出了一种基于环境预测的定位航迹优化算法。该方法以单架 UAV 作为机动观测平台, 使用 IMM-EKF 滤波改善 LOS/NLOS 混合环境下目标估计算法的稳定性, 基于滚动时域控制框架生成满足 UAV 运动学约束的预测轨迹, 以 Fisher 信息矩阵行列式最大为定位准则, 同时基于当前估计的目标位置和城市环境模型, 预测信号遮挡区域和 NLOS 干扰区域, 并对 UAV 预测航迹进行评价, 生成最优控制指令, 控制 UAV 尽量在无遮挡和干扰的空域内进行测向定位飞行, 进而改善测向信号的质量和连续性, 提高定位精度。仿真结果表明, 本文所述算法能够有效解决城市环境中测向定位面临的避障、目标遮挡和 NLOS 信号干扰问题, 使 UAV 在复杂的城市环境下依然能够完成高精度测向定位任务。

参考文献 (References)

[1] 蓝红生, 古军峰, 王国恩. 单站无源定位技术研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(5): 56-58, 61.
LAN H S, GU J F, WANG G E. Single station passive location technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(5): 56-58, 61. (in Chinese)

[2] 邓新蒲. 单站无源定位可观性评述[J]. 中国工程科学, 2007, 9(11): 54-62.
DENG X P. A survey of the observability for single observer passive location[J]. Engineering Sciences, 2007, 9(11): 54-62. (in Chinese)

[3] PONDA S, KOLACINSKI R, FRAZZOLI E. Trajectory optimization for target localization using small unmanned aerial vehicles[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009.

[4] ANDREEV K V, RUBINOVICH E Y. Moving observer trajectory control by angular measurements in tracking problem[J]. Automation and Remote Control, 2016, 77(1): 106-129.

[5] ROH H, CHO M H, TAHK M J. Trajectory optimization Cramer-Rao lower for bearings-only target tracking [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2018.

[6] HE R K, CHEN S X, WU H, et al. Optimal maneuver strategy of observer for bearing-only tracking in threat environment [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018: 1-9.

[7] 吴昊, 陈树新, 刘卓崴. 战场威胁约束下的纯方位探测单观测站航迹优化[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(5): 133-137.
WU H, CHEN S X, LIU Z W. Single-observer trajectory optimization in battlefield threats for bearings-only detection[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(5): 133-137. (in Chinese)

[8] 陈方正, 郝绍杰. 动态威胁环境下单无人机测向定位航迹优化算法[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(5): 137-143.
CHEN F Z, HAO S J. Trajectory optimization of single UAV for bearing-only target localization in dynamic threats [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(5): 137-143. (in Chinese)

[9] GROSS D, RASMUSSEN S, CHANDLER P, et al. Cooperative operations in urban terrain (COUNTER) [C]//Proceedings of SPIE Defense Transformation and Network-Centric Systems, 2006, 6249: 62490G.

[10] SHAFERMAN V, SHIMA T. Unmanned aerial vehicles cooperative tracking of moving ground target in urban environments [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(5): 1360-1371.

[11] 王林, 彭辉, 朱华勇, 等. 复杂环境下多无人机协作式地面移动目标跟踪[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 300-308.
WANG L, PENG H, ZHU H Y, et al. Cooperative tracking of ground moving target using unmanned aerial vehicles in cluttered environment [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(3): 300-308. (in Chinese)

[12] YU H L, MEIER K, ARGYLE M, et al. Cooperative path planning for target tracking in urban environments using unmanned air and ground vehicles [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2): 541-552.

[13] YAO P, WANG H L, JI H X. Multi-UAVs tracking target in urban environment by model predictive control and improved grey wolf optimizer [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 55: 131-143.

[14] OH H, SHIN H S, KIM S, et al. Communication-aware trajectory planning for unmanned aerial vehicles in urban environments [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2018, 41(10): 2269-2280.

[15] BHAGAT S, SUJIT P B. UAV target tracking in urban environments using deep reinforcement learning [C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft

- Systems (ICUAS), 2020.
- [16] 胡超芳, 杨娜, 王娜. 多无人机模糊多目标分布式地面目标协同追踪[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(8): 1101-1110.
HU C F, YANG N, WANG N. Fuzzy multi-objective distributed cooperative tracking of ground target for multiple unmanned aerial vehicles [J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(8): 1101-1110. (in Chinese)
- [17] HU C F, QU G, SHIN H S, et al. Distributed synchronous cooperative tracking algorithm for ground moving target in urban by UAVs[J]. International Journal of Systems Science, 2020, 52(1): 1-16.
- [18] 刘大千, 包卫东, 费博雯, 等. 未知城市环境下的多机协同目标搜索方法研究[J/OL]. 系统工程与电子技术, [2022-06-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220627.0938.012.html>.
LIU D Q, BAO W D, FEI B W, et al. Research on cooperative search method for multiple UAVs under unknown urban environment [J/OL]. Systems Engineering and Electronics, [2022-06-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220627.0938.012.html>. (in Chinese)
- [19] 肖竹, 陈杰, 王东, 等. 严重遮挡非视距环境下的三维定位方法[J]. 通信学报, 2015, 36(8): 68-75.
XIAO Z, CHEN J, WANG D, et al. Three-dimensional localization under severely obstructed NLOS environment[J]. Journal on Communications, 2015, 36(8): 68-75. (in Chinese)
- [20] 贾腾飞, 彭锐, 赵远, 等. 一种基于改进卡尔曼滤波的NLOS误差抑制算法[J]. 信息工程大学学报, 2014, 15(2): 175-180.
JIA T F, PENG R, ZHAO Y, et al. NLOS error mitigation based on modified Kalman filter[J]. Journal of Information Engineering University, 2014, 15(2): 175-180. (in Chinese)
- [21] 齐小刚, 袁列萍, 刘立芳. 误差修正的声源目标混合定位算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(1): 1-7.
QI X G, YUAN L P, LIU L F. Hybrid location algorithm for the acoustic source based on error correction[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(1): 1-7. (in Chinese)
- [22] 毛永毅, 李明远, 张宝军. 一种NLOS环境下的TOA/AOA定位算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 37-40.
MAO Y Y, LI M Y, ZHANG B J. A TOA/AOA location algorithm in NLOS environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(1): 37-40. (in Chinese)
- [23] 洪伟, 蒯诚毅, 陈婷. 城市环境下无人机TDOA定位中到达时间误差差统计模型[J]. 火控雷达技术, 2019, 48(1): 38-41.
HONG W, LIN C Y, CHEN T. Statistical model of TDOA error in TDOA location of UAVs under urban environment[J]. Fire Control Radar Technology, 2019, 48(1): 38-41. (in Chinese)
- [24] 孔范增, 李洋, 于海涛, 等. 一种鲁棒的基于射线跟踪的AOA目标定位算法[J]. 北京石油化工学院学报, 2016, 24(3): 44-51.
KONG F Z, LI Y, YU H T, et al. A robust AOA target localization method based on ray trace[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2016, 24(3): 44-51. (in Chinese)
- [25] 黄华. LOS/NLOS混合环境下的定位算法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
HUANG H. Research and implementation of localization algorithms in mixed LOS/NLOS environments[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] 陈瑞祥. 非视距环境下无源定位技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
CHEN R X. Research on passive position technology within NLOS environment[D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2016. (in Chinese)
- [27] ZHANG G H, HSU L T. A new path planning algorithm using a GNSS localization error map for UAVs in an urban area[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 94: 219-235.
- [28] 郭淑霞, 于学伟, 王亚锋, 等. 反射射线追踪技术在城市场景多径预测中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(5): 115-121.
GUO S X, YU X W, WANG Y F, et al. Research on the method of multipath prediction in city scene based on backward ray tracing[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(5): 115-121. (in Chinese)
- [29] 李博章, 谢飞, 刘坤. 多径效应对测向方位角的影响分析[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(2): 81-83, 110.
LI B Z, XIE F, LIU K. Research on the influence of the multi-path effect on direction finding azimuth [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(2): 81-83, 110. (in Chinese)
- [30] 于晓升, 王莹, 孟亚男, 等. 基于IMM-IKF的无线传感器网络非视距节点定位方法[J]. 控制与决策, 2018, 33(6): 1069-1074.
YU X S, WANG Y, MENG Y N, et al. Non-line of sight node localization method based on IMM-IKF for wireless sensor networks[J]. Control and Decision, 2018, 33(6): 1069-1074. (in Chinese)
- [31] 张云洲, 付文艳, 项姝, 等. 室内环境下基于IMM-EKF算法的移动目标定位[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(11): 2408-2415.
ZHANG Y Z, FU W Y, XIANG S, et al. IMM-EKF algorithm-based indoor moving target localization[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(11): 2408-2415. (in Chinese)
- [32] RISTIC B, ARULAMPALAM S, GORDON N. Beyond the Kalman filter: particle filters for tracking applications[M]. Boston and London: Artech House, 2004.
- [33] 王晓东. 算法设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
WANG X D. The design and analysis of algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)