

动态威胁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动态战场环境下的测向定位问题,提出了一种基于动态窗口法的单机测向定位航迹优化算法。以最大化 Fisher 信息矩阵行列式为测向定位评价准则,在由动态探测雷达和静/动障碍构成的动态战场环境中,基于动态窗口法思想,将测向定位航迹优化评价准则由传统的单步最优原则扩展到对多步预测航迹的评价,同时考虑雷达探测和静/动障碍环境对预测航迹的影响,通过滚动时域方法控制无人机最优航向。仿真结果表明,所提方法能够使无人机在有效逃避雷达探测威胁以及规避环境中静/动障碍的条件下保证对目标的高精度测向定位,为解决动态战场环境下的单架无人机测向定位问题提供了新思路。

关键词:动态窗口法;测向定位;航迹优化;扩展卡尔曼滤波;Fisher 信息矩阵

中图分类号:TP13 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)05-137-07

Trajectory optimization of single UAV for bearing-only target localization in dynamic threats

CHEN Fangzheng, HAO Shaojie

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

Abstract: In order to solve the problem of bearing-only target location for single unmanned aerial vehicle in the dynamic battlefield environment, a new trajectory optimization algorithm based on dynamic window approach was proposed. The maximizing determinant of the Fisher information matrix was set as the trajectory criterion. In the dynamic battlefield, which consisted of dynamic detection radar and fixed/moving obstacles the criterion, based on the idea of dynamic window approach, was extended from the traditional single-step optimal principle to the evaluation of multi-step predicted trajectory. At the same time, the effects of the detection radar and fixed/moving obstacles on the predicted trajectory were also considered. The optimal heading of unmanned aerial vehicle was chosen by the moving horizon method. And the numerical simulations show that the algorithm enables the unmanned aerial vehicle to ensure the high-precision bearing-only target localization under the condition of effectively avoiding the radar threat and fixed/moving obstacles, which provides new ideas for solving the problem of single unmanned aerial vehicle bearing-only target localization in a dynamic battlefield environment.

Keywords: dynamic window approach; bearings-only target localization; trajectory optimization; extended Kalman filter; Fisher information matrix

随着无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)技术的发展,将 UAV 平台作为机动观测站,搭载测向设备对敌方目标进行探测定位越发受到重视。单站测向定位是指利用运动的单个观测站在不同位置测得的目标方位角信息^[1],结合某种估计算法实现对目标的快速定位和跟踪。测向手段既可以是传统意义上的无线电测向,也可以是利用光电设备的测向^[2]。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。目前比较有代表性的方法包括,基于 Fisher 信息矩阵(Fisher Information Matrix,

FIM)及其变形形式的最优航迹规划算法^[3-6],以方位角度变化率最大为目标的航迹优化算法^[7],以定位误差几何因子(Geometrical Dilution Of Precision, GDOP)最小化为目标的最优定位航迹优化算法^[8],以滤波协方差最小为准则的航迹优化算法^[9],以及将上述多种目标函数结合的航迹优化算法^[10]等。

然而这些研究大多基于理想空间条件下,即未考虑 UAV 等单观测站定位航迹受威胁和障碍等约束条件的影响,限制了单站测向定位的实际应用,因此近年来结合复杂的飞行环境,进行测向定位航迹优化成为研究的热点。He 等^[11]研究了

* 收稿日期:2020-03-10

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

在威胁障碍环境下机动单站对静止和机动目标定位的最优机动策略。吴昊等^[12]考虑多种战场威胁约束,通过打分函数引导路径选择,得到在约束条件下的 UAV 最优定位航迹。由于定位问题的特殊性,事先并不能知道目标的确切位置,因此需要 UAV 等单观测站边定位边规划。然而以往关于单站测向定位航迹优化的研究都是基于静态环境下的单步最优原则。在动态战场环境下,单步最优原则使得 UAV 的预判信息极为有限,可能导致 UAV 由于机动能力不足而与障碍发生碰撞。

因此本文以单架 UAV 作为测向定位平台,针对动态战场环境下的测向定位问题,基于动态窗口法(Dynamic Window Approach, DWA)思想,提出多步预测求解最优航迹的算法,在线生成满足 UAV 运动学约束的航迹,解决单架 UAV 在动态战场环境下的测向定位航迹优化问题。

1 问题描述

1.1 测向定位的问题描述

考虑到进行测向定位时目标与 UAV 之间的高度差异远小于水平方向的距离,因此将 UAV 测向定位简化为二维平面中的定位问题,如图 1 所示。其中: oxy 为地面惯性坐标系; X_T 为待定位目标,其坐标为 $[x_T, y_T]^T$; $X_{U,k}$ 代表 UAV, k 为时间步, V_k 为其速度矢量, η_k 为其观测的目标的方位角。UAV 离散形式运动学模型可写为:

$$X_{U,k+1} = AX_{U,k} + BU_k \quad (1)$$

式中: $X_{U,k} = [x_{U,k}, y_{U,k}, \psi_{U,k}]^T$, $x_{U,k}$ 和 $y_{U,k}$ 为 UAV 当前 k 时刻坐标, $\psi_{U,k}$ 为 UAV 当前航向; 控制量为 $U_k = [v_k, \omega_k]^T$, v_k 为 UAV 速度大小, 满足 $V_{\min} \leq v_k \leq V_{\max}$, V_{\min} 和 V_{\max} 分别是无人机最小和最大飞行速度, 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, 无人机最大速度变化率为 \dot{V}_{\max} , 最大角速度变化率为 $\dot{\omega}_{\max}$, 因此有:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} \Delta t \cos(\psi_{U,k}) & 0 \\ \Delta t \sin(\psi_{U,k}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Δt 为状态变化时间间隔。

对于测向定位问题, 假设目标静止, 不考虑过程噪声, 选取 X_T 为待估计的状态变量, 则目标离散状态方程可写为:

$$X_{T,k+1k} = \Phi_{k+1k} X_{T,k1k} \quad (3)$$

其中

$$\Phi_{k+1k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

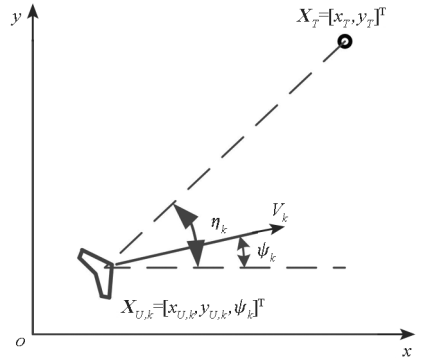


图 1 测向定位示意图

Fig. 1 Illustration for bearing-only target localization

由图 1 可知, UAV 对目标的方位观测方程可表示为:

$$\eta_k = h(X_T, X_{U,k}) = \arctan\left(\frac{y_T - y_{U,k}}{x_T - x_{U,k}}\right) + \varepsilon_k \quad (5)$$

式中, ε_k 是均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声序列。

1.2 测向定位在动态战场环境下面临的问题

典型战场环境包括: 敌方雷达探测威胁、火力威胁、地形威胁、建筑等障碍物威胁以及危险天气威胁等各种威胁因素。以往关于定位航迹优化的研究中都是针对静态环境^[11-12], 即威胁因素状态固定, 这与实际差异较大。本文中将威胁因素归纳为雷达探测威胁和障碍物威胁, 研究在动态战场环境下雷达突然开关机和障碍物机动时 UAV 的最优测向定位航迹。

1.2.1 敌方雷达探测威胁

被敌方雷达捕获会使 UAV 处于危险之中。雷达能否探测到 UAV 与其反射信号的信噪比有直接影响。根据文献[12]对于确定的目标和雷达, 其信噪比 SN 可表示为:

$$SN_{i,k} = \begin{cases} \frac{b_i}{d_{i,k}^4} & d_{i,k} \leq d_{\max,i} \\ 0 & d_{i,k} > d_{\max,i} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 下标 i 表示雷达编号, d_i 为雷达与 UAV 之间的距离, $d_{\max,i}$ 为雷达最大探测距离, b_i 为常数。UAV 飞行过程中应当尽量避免被雷达探测到。动态战场环境下, 探测雷达可能突然开机, 而若此时 UAV 正好处于雷达探测范围中, UAV 飞行航迹应能使 SN 尽快降低。

1.2.2 障碍躲避

UAV 处于火力威胁、地形威胁、建筑等障碍物威胁以及危险天气威胁之中时将会导致其坠毁,因此可以将上述威胁均等效为障碍物,UAV 不能与其碰撞。障碍物既可以是固定的,也可以是不运动的。在二维环境下,本文将不同障碍物均等效为不同直径的圆形固定障碍或者可动障碍,UAV 在飞行过程中时刻需要对这些障碍进行躲避,避免与障碍物相撞,即满足:

$$ob_{j,k} = R_{j,k} - r_j > 0 \quad (7)$$

式中, j 为障碍物编号, $R_{j,k}$ 为 UAV 与障碍物中心的距离, r_j 为障碍物半径, $ob_{j,k}$ 为 UAV 与障碍物边缘的距离。

2 基于 DWA 的多步预测方法

在以往关于单站测向定位航迹优化的研究中多是基于单步最优机动策略。如图 2 所示,即根据观测站的机动能力和单位时间运动距离,在可行航向区间内离散若干航点,根据定位最优准则,从这些航点中选择最有利于快速定位的航向。然而这种方法在障碍环境中预判信息极为有限,不能充分利用观测站的机动性提前躲避障碍,可能会导致 UAV 因机动能力不足而与障碍碰撞。

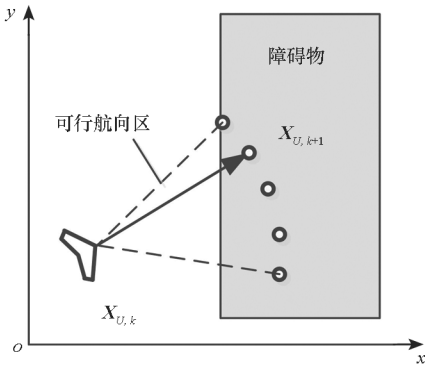


图 2 单步最优机动策略示意图

Fig 2 Illustration for one-step optimal maneuver strategy

DWA 算法的主要思想是在速度空间中选择不同的线速度和角速度组合作为控制量,基于 UAV 运动学模型,计算在模拟预测时间内可能的飞行航迹集合,通过对这些航迹进行评价,选择最优航迹的控制量作为下一步的控制目标。DWA 因实时性强和直接考虑机器人运动学约束等特性而被广泛应用于动态复杂环境下的机器人的障碍威胁规避^[13]。DWA 可以有效增加测向 UAV 的预判信息,解决复杂障碍环境下的 UAV 避碰和定位问题。

本文以 FIM 行列式最大作为 UAV 测向定位航迹优化的准则,以提高对目标的定位精度。基

于 DWA 多步预测的思想,需要解决对预测航迹的评价问题。文献[14]推导了无过程噪声条件下 FIM 的递推计算方法:

$$FIM_{k+1} = [\Phi_{k+1|k}^{-1}]^T FIM_k \Phi_{k+1|k}^{-1} + H_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} H_{k+1} \quad (8)$$

式中, 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:

$$H_k = \frac{\partial H}{\partial X_T} = \left[-\frac{y_{T,k} - y_{U,k}}{g_k^2}, \frac{x_{T,k} - x_{U,k}}{g_k^2} \right] \quad (9)$$

式中, $g_k = \sqrt{(x_{T,k} - x_{U,k})^2 + (y_{T,k} - y_{U,k})^2}$ 。若已知当前 FIM_k 和 UAV 的某条预测运动航迹 $Tr = \{X_{U,s} | s = k+1, k+2, \dots, k+n\}$ (其中, n 为预测步数),以及目标的估计位置 $\hat{X}_{T,k}$,由其替代式(9)中的目标真值 X_T ,可由式(8)得到该条航迹的多步预测值 FIM_{k+n} ,因此该条航迹关于测向定位的评价函数为:

$$J_{FIM} = \det(FIM_{k+n}) \quad (10)$$

敌方雷达威胁评价函数由式(11)计算,为 UAV 在整条预测航迹上被 q 个雷达探测的 SN 值之和。该评价函数使 UAV 更倾向于选择不容易被发现的航迹,若 UAV 不在雷达探测范围内,则航迹不受影响。

$$J_{SN} = - \sum_{i=1}^q \sum_{k=1}^n SN_{i,k} \quad (11)$$

障碍躲避采用与碰撞时间相关的评价函数^[15]。如图 3 所示,假设 UAV 可以通过自身传感器估计障碍物的运动速度和方向^[16],则可以对运动航迹进行预测,基于 UAV 和障碍物每一时刻的位置,通过式(7)可以判断两者发生碰撞的时间。对于 UAV 附近的多个障碍物,需依次进行判断,并选择最小碰撞时间作为该条预测航迹的避碰评价函数 J_T 。在所有的预测航迹中,选择预计碰撞时间最晚的航迹有利于 UAV 躲避障碍,因

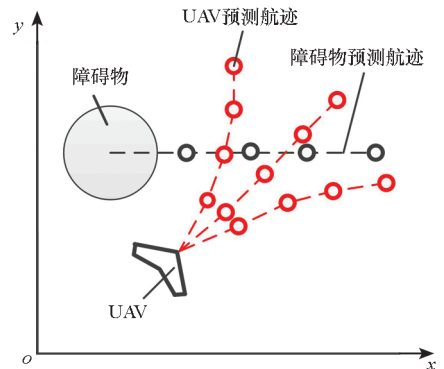


图 3 预测碰撞时间计算示意图

Fig. 3 Calculation of predicted collision time

此以 J_T 最大为避碰准则。

综合考虑定位、雷达威胁和避碰因素,一条航迹的总评价函数为:

$$J_p = c_1 J_{\text{FIM},p} + c_2 J_{\text{SN},p} + c_3 J_{T,p} \quad (12)$$

式中, $c_1 = 0.2, c_2 = 0.3, c_3 = 0.5$ 为权重因子, p 为预测航迹数。考虑到无人机避障和躲避雷达威胁是其生存进而完成定位任务的前提,因此无人机避障和雷达躲避的评价指标权重系数较大。多条航迹构成目标函数集合,则

$$\mathbf{J} = [J_1, J_2, \dots, J_p]^T \quad (13)$$

3 基于 DWA 的单 UAV 测向定位航迹优化算法

基于 DWA 的单 UAV 测向定位航迹优化算法如算法 1 所示,其中 \mathbf{P} 为扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter, EKF) 过程中的估计误差方差矩阵。

算法 1 基于 DWA 的单 UAV 测向定位航迹优化算法

Alg. 1 Trajectory optimization of single UAV for bearing-only target localization based on DWA

初始化: $\hat{\mathbf{X}}_{T,0}, \Phi, \mathbf{P}_0, \mathbf{X}_{U,0}$

1. While $\|\hat{\mathbf{X}}_{T,k} - \mathbf{X}_T\|_2 \geq 0.01$
2. 根据当前 UAV 速度和角速度生成控制量的采样空间:

$$\begin{cases} v_{\max} = \min(V_{\max}, V_k + \dot{V}_{\max} \Delta t) \\ v_{\min} = \max(V_{\min}, V_k - \dot{V}_{\max} \Delta t) \\ \omega_{\max} = \min(\omega_{\max}, \omega_k + \dot{\omega}_{\max} \Delta t) \\ \omega_{\min} = \max(-\omega_{\max}, \omega_k - \dot{\omega}_{\max} \Delta t) \end{cases}$$

3. For $v_k = v_{\min} : v_{\text{Step}} : v_{\max}$
4. For $\omega_k = \omega_{\min} : \omega_{\text{Step}} : \omega_{\max}$
5. 根据当前 UAV 状态 $\mathbf{X}_{U,k}$ 、控制量 \mathbf{U}_k 和 UAV 状态方程,预测 UAV 状态变化航迹 \mathbf{T}_r
6. 计算多步定位目标函数 J_{FIM}
7. 计算敌方雷达探测目标函数 J_{SN}
8. 计算障碍碰撞时间 J_T
9. 计算该条预测航迹总目标函数:

$$J_p = c_1 J_{\text{FIM},p} + c_2 J_{\text{SN},p} + c_3 J_{T,p}$$

10. End
11. End
12. 求得最优控制量 $\mathbf{U}_k = \arg \max(\mathbf{J})$;
13. 使用输出的控制量控制 UAV 运动一个时间步 $\mathbf{X}_{U,k+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{U,k} + \mathbf{B}\mathbf{U}_k$
14. 根据无人的位置变化和观测值使用 EKF 进行滤波,更新目标状态 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1}$ 和 \mathbf{P}_{k+1}
15. 根据 UAV 位置和目标状态变化更新 \mathbf{FIM}_{k+1}
16. End

算法 1 中,第 2 ~ 12 步通过基于 DWA 的 UAV 航迹优化算法形成下一步控制指令。由于该控制指令是由对最优航迹的评价得到的,因此包含了多步预判的信息。第 13 步 UAV 根据控制指令机动。第 14 步 UAV 基于新的测向值,使用 EKF 进行目标状态估计;第 15 步 UAV 更新 FIM。如此反复迭代直至 UAV 定位误差收敛。

4 仿真实验

通过仿真验证本文算法的有效性。假设 UAV 初始状态为 $\mathbf{X}_{U,0} = [0 \text{ km}, 0 \text{ km}, -20^\circ]^T$,对坐标点为 $\mathbf{X}_T = [9 \text{ km}, 9 \text{ km}]^T$ 的固定目标进行机动测向定位。无人机飞行性能为 $V_{\max} = 24 \text{ m/s}$, $V_{\min} = 16 \text{ m/s}$, $\dot{V}_{\max} = 6 \text{ m/s}$, $\omega_{\max} = 1.5 \text{ (}^\circ\text{)/s}$, $\dot{\omega}_{\max} = 0.4 \text{ (}^\circ\text{)/s}^2$,测向时间间隔为 $\Delta t = 2 \text{ s}$,测向误差 $\sigma = 2^\circ$ 。

4.1 无障碍条件下定位航迹对比

首先考察定位目标函数的有效性,飞行环境中不考虑障碍物和雷达威胁,此时 J_{SN} 为 0, J_T 为固定常数,UAV 航迹优化目标函数仅与 J_{FIM} 有关。分析预测步数不同对航迹形状和定位误差收敛过程的影响,并与一般匀速直线航迹进行比较。每种条件进行 50 次 Monte-Carlo 仿真,每次测量平均定位误差均方差 (Root Mean Square Error, RMSE) 为:

$$RMSE_k = \sum_{l=1}^L \sqrt{(\hat{x}_{T,k,l} - x_T)^2 + (\hat{y}_{T,k,l} - y_T)^2} \quad (14)$$

其中, $[\hat{x}_{T,k,l}, \hat{y}_{T,k,l}]^T$ 为 UAV 在第 l 次仿真,第 k 次测量时的目标估计位置。不同航迹描述和定位结果见表 1,定位误差收敛过程见图 4,图 4 中横坐标 k 为定位迭代步数,每步间隔为 Δt ,相应航迹见图 5。

表 1 不同航迹最终定位结果

Tab. 1 Final localization result of different trajectories

航迹名称	UAV 航迹参数设置	最终定位精度 RMSE/km
航迹 1-1	$\Psi_{U,k} = 0^\circ, V = 24 \text{ m/s}$	0.033
航迹 1-2	$\Psi_{U,k} = 30^\circ, V = 24 \text{ m/s}$	0.015
航迹 1-3	$n = 1$	0.010
航迹 1-4	$n = 10$	0.011
航迹 1-5	$n = 20$	0.010
航迹 1-6	$n = 30$	0.011

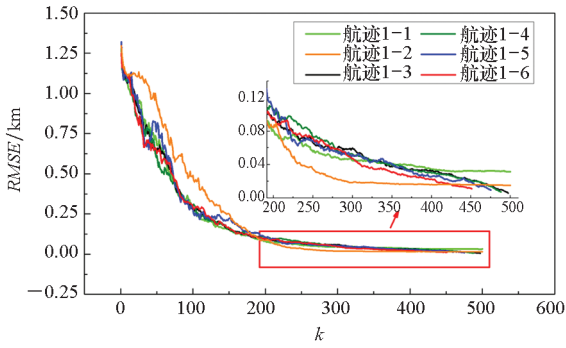


图4 平均定位误差收敛曲线

Fig.4 Convergence curve for RMSE

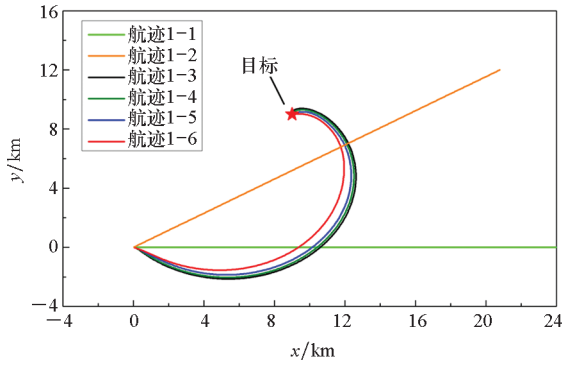


图5 不同航迹对比

Fig.5 Comparison of different trajectories

结合表1和图4可知,当 $k \leq 200$ 时,航迹1-1比航迹1-2 RMSE收敛速度快,但是最终定位精度却最低。而优化航迹1-3~1-6不但前期RMSE收敛速度快,并且能够达到更高的定位精度,这说明评价函数 J_{FIM} 对于提升UAV测向定位精度是有效的。图4中,当 $k \geq 300$ 时, n 值越大, RMSE收敛加快,这说明增加预测步数 n 有利于进一步改善UAV的定位收敛过程。

由图5可知,基于本文的定位评价函数,UAV定位航迹呈螺旋形逐渐向目标靠近,这与文献[4]中规律基本相同。UAV在增大相对目标的 $\dot{\eta}_k$ 和减小与目标的距离两者之间折中。 n 值越大,UAV与目标的距离缩短较快,航迹越靠近内侧,这可能是提升UAV测向定位收敛速度的原因。

4.2 动态复杂障碍条件下航迹对比

在仿真环境中引入障碍和雷达干扰,其中两个固定障碍半径均为 $r_1 = r_2 = 1$ km,位置分别为 $\mathbf{X}_{ob,1} = [2 \text{ km}, 2 \text{ km}]^T$, $\mathbf{X}_{ob,2} = [12 \text{ km}, 4 \text{ km}]^T$,运动障碍半径为 $r_3 = 1$ km,初始位置为 $\mathbf{X}_{ob,3} = [8 \text{ km}, 2 \text{ km}]^T$,沿 x 轴做速度为 $V_{ob} = 12$ m/s的匀速直线运动,雷达位置为 $\mathbf{X}_{radar} = [6 \text{ km},$

$2 \text{ km}]^T$,最大探测半径为 $d_{max,1} = 4$ km。其他仿真条件不变,每种条件同样进行50次Monte-Carlo仿真,结果如表2所示,其中航迹2-2~2-4均达到收敛表1中相同的收敛精度,说明动态环境的引入没有影响最终的定位性能。而航迹2-1由于与障碍发生碰撞未完成定位任务,因此无最终定位精度。

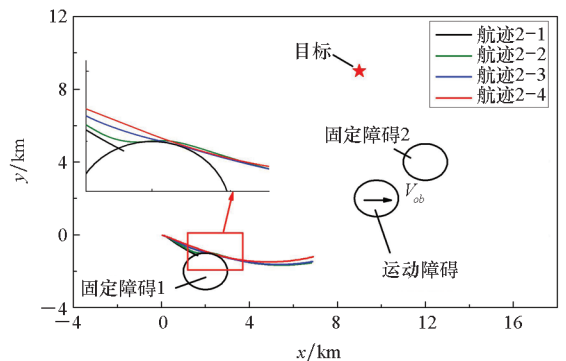
表2 不同航迹定位结果

Tab.2 Localization result of different trajectories

航迹名称	运动状态	是否发生碰撞	最终定位精度/km
航迹2-1	$n = 1$	是	
航迹2-2	$n = 10$	否	0.010
航迹2-3	$n = 20$	否	0.011
航迹2-4	$n = 30$	否	0.010

不同时刻航迹如图6所示。当 $k = 150$ 时,各条航迹如图6(a)所示。此时雷达未开机,不会对UAV航迹产生影响。对于航迹2-1, $n = 1$ 为单步最优原则。当UAV预测到将与障碍物碰撞时,由于其机动能力有限,无法产生有效规避,从而导致其最终与障碍物发生碰撞。对于航迹2-2~2-4,均未与固定障碍1发生碰撞,并且 n 越大,预知信息越多,航迹越平滑。当 $k = 290$ 时,各条航迹如图6(b)所示。雷达突然开机时,UAV均在雷达探测范围内,此时UAV迅速转向逃离雷达探测边界,从而减小被雷达探测到的概率。在 $k = 290 \sim 330$ 范围内,航迹2-2~2-4依次与运动障碍相遇,由于UAV能够对障碍物运动进行预判,因此3条航迹均能成功避开运动障碍物,整个运动过程未发生碰撞,如图6(b)~(d)所示。

当定位结束时,如图6(e)所示,各条航迹均收敛到目标附近,定位过程结束。比较航迹2-2~2-4发现, n 值越大,UAV控制信息中包含的预测信息越多,航迹越平滑。



(a) $k = 150$ 时刻航迹

(a) Trajectories at $k = 150$

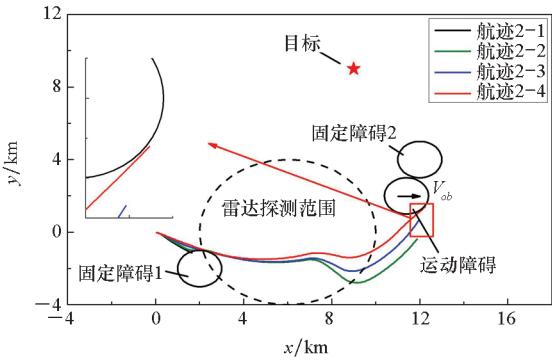
仿真结果表明,本文提出的算法能够在雷达探测威胁和动态障碍环境的影响下依然保证较高的测向定位精度,实现了 UAV 在动态战场环境下对目标的测向定位航迹优化。

5 结论

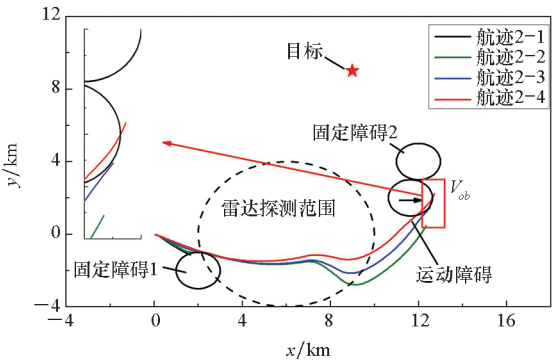
本文基于 DWA 多步预测的思想,提出了一种应用于动态战场环境下的单站测向定位航迹优化算法。该方法将测向定位目标函数由单步最优原则扩展到对多步预测航迹的评价,同时考虑对雷达探测威胁和运动障碍的躲避,在线生成满足 UAV 运动学约束的航迹。仿真结果表明,增加预测步数,一方面有助于提升测向定位的收敛速度,另一方面由于增加了 UAV 对障碍的预判信息,使其更早地对障碍物(包括运动障碍)进行规避。航迹优化算法使 UAV 在复杂动态环境的影响下依然能够完成高精度测向定位任务。

参考文献 (References)

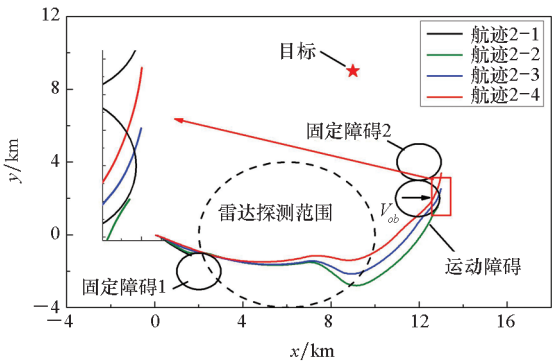
- [1] 蓝红生, 古军峰, 王国恩. 单站无源定位技术研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(5): 56-58.
LAN Hongsheng, GU Junfeng, WANG Guo'en. Single station passive location technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(5): 56-58. (in Chinese)
- [2] 徐诚, 黄大庆, 孔繁铨. 一种小型无人机无源目标定位方法及精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1115-1122.
XU Cheng, HUANG Daqing, KONG Fanqiang. Small UAV passive target localization approach and accuracy analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1115-1122. (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] 许志刚, 盛安冬, 陈黎, 等. 被动目标定位系统观测平台的最优机动轨迹[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1337-1344.
XU Zhigang, SHENG Andong, CHEN Li, et al. Optimal maneuver trajectories of the observer platform in passive localization system [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(12): 1337-1344. (in Chinese)
- [5] ROH H, CHO M H, TAHK M J. Trajectory optimization using cramer-Rao lower bound for bearings-only target tracking[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2018.
- [6] CORBETS J B, LANGELAAN J W. Real-time trajectory generation for target localization using micro air vehicles[J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2010, 7(8): 223-240.
- [7] 戴中华, 邓新蒲. 基于方位角变化率最大的轨迹优化几何方法[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(4): 47-49.
DAI Zhonghua, DENG Xinpu. A geometrical method for optimization of trajectory based on maximizing azimuth



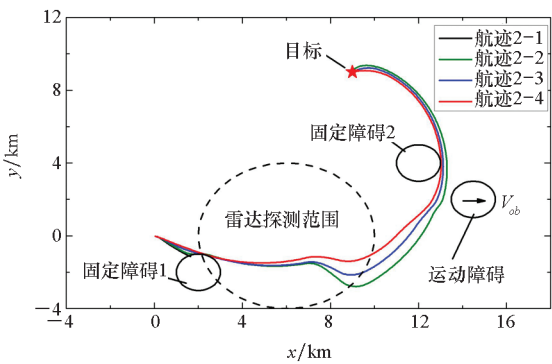
(b) $k = 290$ 时刻航迹
(b) Trajectories at $k = 290$



(c) $k = 305$ 时刻航迹
(c) Trajectories at $k = 305$



(d) $k = 330$ 时刻航迹
(d) Trajectories at $k = 330$



(e) 最终状态航迹
(e) Trajectories at final state

图 6 动态战场环境下 UAV 定位航迹对比
Fig. 6 Comparison of UAV trajectories in dynamic battlefield environment

- changing rate [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2007, 23(4): 47-49. (in Chinese)
- [8] 邓新蒲,周一宇,卢启中. 测角无源定位与跟踪的观测器自适应运动分析[J]. *电子学报*, 2001, 29(3): 311-314.
- DENG Xinpu, ZHOU Yiyu, LU Qizhong. Adaptive observer maneuver analysis for bearings-only tracking [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(3): 311-314. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 张益. 被动式跟踪中轨迹优化问题的研究[J]. *火控雷达技术*, 2004, 33(4): 5-10.
- ZHANG Yi. A study on optimizing trajectory in passive tracking[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2004, 33(4): 5-10. (in Chinese)
- [11] 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, 2018: 1-9.
- [12] 吴昊,陈树新,刘卓巍. 战场威胁约束下的纯方位探测单观测站轨迹优化[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(5): 133-137.
- WU Hao, CHEN Shuxin, LIU Zhuowei. 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)
- [13] 王宁佳. 无人艇应对主动威胁的智能规避方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- WANG Ningjia. Research on intelligent evasion method of USV responding to active threat [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [14] RISTIC B, ARULAMPALAM S, GORDON N. Beyond the Kalman filter-particle filters for tracking applications [M]. Boston and London: Artech House, 2004.
- [15] SEDER M, PETROVIĆ I. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007: 1986-1991.
- [16] MCFADYEN A, MEJIAS L. A survey of autonomous vision-based see and avoid for unmanned aircraft systems [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2016, 80: 1-17.