



纯方位目标跟踪中相对距离的估计方法

陈之曦,王 健*

(南京理工大学 能源与动力工程学院,江苏 南京 210014)

摘要:纯方位目标跟踪是仅根据目标相对观测站的视线高低角和视线方位角计算出目标的距离及速度。为应对纯方位目标跟踪过程中相对距离的可观测度不足的问题,针对 3 种具体情况分别提出了相应的改进方法。①若目标静止且相对距离初值已知,可根据观测站速度实时计算出相对距离;②若目标匀速运动或相对距离初值误差较大,观测站可通过特殊机动的方式增强相对距离的可观测度;③若观测站和目标之间的相对高度已知,此时相对距离的可观测度充足,即使针对具有机动能力的目标也可以准确地估计出相对距离。分别针对静止目标、匀速运动目标以及具有机动特性的目标进行了仿真,结果表明:第一种方法相对距离误差的大小取决于初值误差的大小;第二种方法的误差受到观测站机动方式及机动加速度大小的影响,在该文设计的观测站机动方式以及仿真工况中,第二种方法的相对距离误差均值为 5.26 m;在针对第三种方法的仿真中增加了目标的机动过程和量测噪声,根据蒙特卡洛仿真结果统计出的相对距离和相对距离变化率均方根误差分别为 0.81 m 和 0.95 m/s。

关键词:纯方位目标跟踪;可观测度;机动目标;卡尔曼滤波;蒙特卡洛仿真

中图分类号:TJ765.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)01-0054-06

Estimation Method for Relative Distance in Bearings-only Target Tracking

CHEN Zhixi, WANG Jian*

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014, China)

Abstract: Bearing-only target tracking estimates distance and velocity of target by using only line-of-sight elevation and azimuth angles relative to observation station. To solve the problem of insufficient observability of relative distance, the corresponding improvement methods were proposed for three cases. ①For stationary targets with known initial-relative-distance, real-time distance can be calculated by using the velocity of observation station. ②When targets move at constant velocity or initial-distance errors are significant, observability can be enhanced through specific maneuvers by the observation station. ③If the relative altitude between the station and target is known, sufficient observability allows accurate distance estimation even for maneuvering targets. Simulations on stationary target, constant-velocity target and maneuvering targets reveal that the first method's error depends on initial value accuracy, while the second method's error is influenced by maneuver strategy and acceleration, causing a mean relative distance error of 5.26 m under designed conditions. For the third method, incorporating target maneuvers and measurement noise, Monte-Carlo simulations show root mean square errors (RMSE) of 0.81 m for relative distance and 0.95 m/s for distance rate, demonstrating robustness under complex cases.

Key words: bearings-only target tracking; observability; maneuvering target; Kalman filtering; Monte-Carlo simulation

纯方位目标跟踪(bearings-only target tracking)即观测站根据目标相对于观测站的视线高低角和视线方位角估计出目标的位置和速度^[1-2]。在实际应用中,观测站可以是搭载了光电探测系统的无人机^[3]、具有声呐探测系统的潜艇^[4]或者是搭载了图像导引头的导弹^[5]等。通常,纯方位目标跟踪过程往往会出现观测度不足^[6-10]的情况,即仅根据纯方位信息无法准确估计出相对距离和相对速度。可观测性问题是纯方位目标跟踪的关键问题,是目标跟踪与定位的前提和基础^[7]。

文献[11]针对二维的纯方位目标跟踪场景提出了可观测的条件,并指出观测站可以通过进行机动的方式增强系统的可观测度。文献[12]针对三维的纯方位目标跟踪推导了系统可观测的必要条件。文献[10]针对三维空间中作匀速直线运动和匀加速直线运动的目标和观测站,从线性矩阵方程解的角度讨论了纯方位目标跟踪的可观测度问题。文献[13]指出系统可观测必要条件之一是观测站的机动特征要比目标的更复杂。

为应对可观测度不足导致无法准确估计出相对距离和相对速度的问题,本文针对3种具体情况分别提出了相应的改进方法:①当目标静止时,目标观测站本身的速度可作为额外的量测值,在初始相对距离已知的基础上,实时计算出相对距离。②观测站通过自身机动的方式增加系统可观测度,从而能够准确地估计出相对距离。③当观测站和目标的相对高度已知时,改进系统量测方程,从而提升系统的可观测度,最终实现对相对距离和相对速度的准确估计。最后,通过仿真验证了上述3种方法的可行性,并分析了相对距离的计算精度。仿真中所使用的算法均为卡尔曼滤波(Kalman filtering, KF)算法。

1 纯方位目标跟踪模型

1.1 常规模型

图1描述了观测站和目标在发射系中的位置关系, $\mathbf{r}_M$ 为观测站在发射系中的位置矢量, $\mathbf{r}_T$ 为目标在发射系中的位置矢量, $\mathbf{r}$ 为目标与观测站之间的相对距离矢量, q_λ 为视线方位角, q_γ 为视线高低角。

观测站与目标之间的相对距离矢量 $\mathbf{r}$ 、相对速度矢量 $\mathbf{v}$ 和相对加速度矢量 $\mathbf{a}$ 可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{r}_T - \mathbf{r}_M = (r_x & r_y & r_z)^T \\ \mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{r}}_T - \dot{\mathbf{r}}_M = (v_x & v_y & v_z)^T \\ \mathbf{a} = \ddot{\mathbf{r}} = \ddot{\mathbf{r}}_T - \ddot{\mathbf{r}}_M = (a_x & a_y & a_z)^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_x, r_y, r_z 为相对距离矢量在发射系中的分量; v_x, v_y, v_z 为相对速度矢量在发射系中的分量; a_x, a_y, a_z 为相对加速度矢量在发射系中的分量。

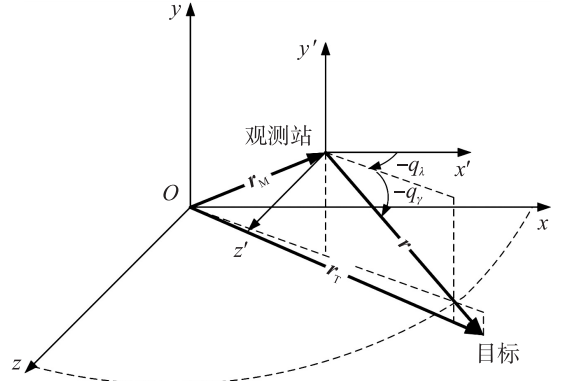


图1 目标相对观测站的位置及角度

Fig. 1 Position and angles of the target relative to the observation station

在三维纯方位目标跟踪的常规模型中,选取状态向量为

$$\mathbf{X} = (r_x \quad r_y \quad r_z \quad v_x \quad v_y \quad v_z)^T = (x_0 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5)^T \quad (2)$$

根据观测站和目标之间的相对运动关系式(1),按照欧拉离散方法可知状态方程的离散形式为

$$\begin{cases} x_0(k+1) = x_0(k) + x_3(k) \Delta T + 0.5 a_x(k) \Delta T^2 \\ x_1(k+1) = x_1(k) + x_4(k) \Delta T + 0.5 a_y(k) \Delta T^2 \\ x_2(k+1) = x_2(k) + x_5(k) \Delta T + 0.5 a_z(k) \Delta T^2 \\ x_3(k+1) = x_3(k) + a_x(k) \Delta T \\ x_4(k+1) = x_4(k) + a_y(k) \Delta T \\ x_5(k+1) = x_5(k) + a_z(k) \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为当前时刻, ΔT 为离散时间。

q_λ, q_γ 与状态向量之间的关系为

$$\begin{cases} q_\lambda = \arctan(-r_z/r_x) \\ q_\gamma = \arctan(r_y/\sqrt{r_x^2 + r_z^2}) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)的非线性不利于线性卡尔曼滤波的使用,可将上述方程转化为状态量的线性形式^[12]:

$$\begin{cases} 0 = r_x - r_y \cot q_\gamma \cos q_\lambda \\ 0 = r_z + r_y \cot q_\gamma \sin q_\lambda \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)选取量测向量:

$$\mathbf{Z} = (0 \quad 0)^T = (z_0 \quad z_1)^T \quad (6)$$

量测方程可表示为

$$\begin{cases} z_0 = x_0 - x_1 \cot q_\gamma \cos q_\lambda \\ z_1 = x_2 + x_1 \cot q_\gamma \sin q_\lambda \end{cases} \quad (7)$$

状态方程(3)和量测方程(7)均为线性方程,因此采用线性卡尔曼滤波作为纯方位目标跟踪的滤波算法。KF 的详细计算步骤参照文献[14]。

1.2 改进方法一

针对静止不动的目标,观测站的速度即为观测站相对目标的速度,若提前获取目标在发射系中的坐标,能够计算出后续任何时刻的相对距离,纯方位目标跟踪模型改进如下:式(2)和式(3)不做改动,增加观测站速度作为量测,即将式(6)和式(7)分别拓展为

$$\mathbf{Z} = (0 \quad 0 \quad v_x \quad v_y \quad v_z)^T = (z_0 \quad z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4)^T \quad (8)$$
$$\begin{cases} z_0 = x_0 - x_1 \cot q_\gamma \cos q_\lambda \\ z_1 = x_2 + x_1 \cot q_\gamma \sin q_\lambda \\ z_2 = x_3 \\ z_3 = x_4 \\ z_4 = x_5 \end{cases} \quad (9)$$

滤波计算过程中,状态量 r_x, r_y, r_z 的初值($t=0$)设置为

$$\begin{cases} r_{x0} = r_{x,T0} - r_{x,M0} \\ r_{y0} = r_{y,T0} - r_{y,M0} \\ r_{z0} = r_{z,T0} - r_{z,M0} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $(r_{x,M0} \quad r_{y,M0} \quad r_{z,M0})^T$ 为观测站的发射系初始坐标, $(r_{x,T0} \quad r_{y,T0} \quad r_{z,T0})^T$ 为提前获取到的目标在发射系的初始时刻坐标。

1.3 改进方法二

针对坐标未知或者处于匀速运动状态的目标,可以通过令观测站进行特殊机动的方式增强相对距离和相对速度的可观测度。

模型二与模型一相同,状态向量为式(2),状态方程为式(3),量测向量为式(8),量测方程为式(9)。

为了模拟出观测站的特殊机动,在观测站的速度及位置计算中增加一个发射系 y 轴方向的加速度 $a_{y,M}$ 和一个 z 轴方向的加速度 $a_{z,M}$,计算公式为

$$\begin{cases} a_{y,M} = -80\pi^2 \cos(0.5\pi t) & t \geq 0 \\ a_{z,M} = -80\pi^2 \cos(0.5\pi t) & t \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

1.4 改进方法三

文献[12]指出当观测站和目标之间的相对高度 r_y 已知时,纯方位目标跟踪能够准确地估计出相对距离和相对速度,且不需要观测站进行任何机动。

若相对高度 r_y 为已知,状态向量修改为

$$\mathbf{X} = (r_x \quad r_z \quad v_x \quad v_z)^T \quad (12)$$

状态方程的离散形式为

$$\begin{cases} x_0(k+1) = x_0(k) + x_2(k) \Delta T + 0.5 a_x(k) \Delta T^2 \\ x_1(k+1) = x_1(k) + x_3(k) \Delta T + 0.5 a_z(k) \Delta T^2 \\ x_2(k+1) = x_2(k) + a_x(k) \Delta T \\ x_3(k+1) = x_3(k) + a_z(k) \Delta T \end{cases} \quad (13)$$

量测向量为

$$\mathbf{Z} = (0 \quad 0)^T = (z_0 \quad z_1)^T \quad (14)$$

量测方程为

$$\begin{cases} z_0 = x_1 - r_y \cot q_\gamma \cos q_\lambda \\ z_1 = x_3 + r_y \cot q_\gamma \sin q_\lambda \end{cases} \quad (15)$$

式中: r_y 为已知量。在实际情况下,如果被探测到的目标为地面目标,可以将探测器距离地面的高度近似作为探测器相对目标的高度,进而满足本方法的限制条件。

2 仿真条件及结果分析

为了方便对比分析,仿真过程中会根据状态量估计值计算出目标相对观测站的距离 r 和距离变化率 $\dot{r}$,在此基础上对比分析 3 种改进方法的估计精度。 r 和 $\dot{r}$ 与状态向量 $\mathbf{X}$ 之间的关系为

$$\begin{cases} r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \\ \dot{r} = \frac{r_x v_x + r_y v_y + r_z v_z}{r} \end{cases} \quad (16)$$

表 1 为观测站和目标在发射系中的初始位置和初始速度。为了验证上述 3 种方法的可行性,针对静止目标和匀速运动目标,仿真对比 3 种方法的精度和收敛速度。

表 1 观测站和目标的发射系初始位置及速度
Table 1 Position and velocity of missile and target

r_M^0	v_M^0	r_T^0	v_T^0	
			静止目标	运动目标
(0,5 000 m,0)	(100 m/s,0,100 m/s)	(5 000 m,0,5 000 m)	(0,0,0)	(2 m/s,2 m/s,2 m/s)

2.1 静止目标

为了探究上述3种方法对静止目标的跟踪过程,在静止目标的纯方位跟踪过程中对比分析3种方法的估计误差。为探究3种方法的相对距离估计误差的收敛过程,在初值设置中加入了误差,初始相对距离误差为115 m。

图2为相对距离估计误差 Δr 随时间的变化曲线,图3为相对距离变化率误差 $\Delta \dot{r}$ 随时间的变化曲线。从图2中可以看出方法三的相对距离误差收敛速度最快,误差收敛所需时间在1 s以内,方法二误差收敛所需时间为20 s,而方法一没有收敛趋势。这说明:①当观测站和目标之间的相对高度已知时,滤波器能够快速并准确地根据水平方位和高低方位信息,估计出目标的相对位置;②观测站能够通过进行机动的方式增强相对距离的可观测度;③方法一无法消除相对距离初值中存在的误差,或者说方法一只适用于能够准确获取初始目标距离且目标始终保持静止状态的情况。

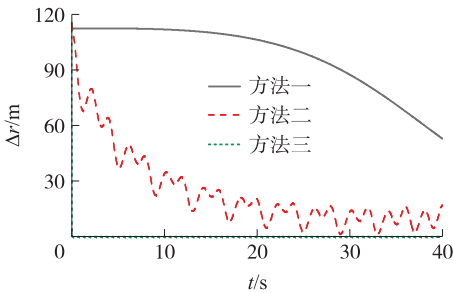


图2 目标静止时相对距离估计误差

Fig. 2 Estimation error of relative distance when the target is stationary

图3中方法一和方法二的收敛速度快于方法三,这是因为方法一和方法二的量测向量中包含了观测站的速度,对于静止目标而言,观测站的速度即为相对速度。在初始相对距离的基础上,根据相对速度即可计算出后续过程中的相对距离。

方法二是通过观测站进行机动的方式来增强相对距离的可观测度,从图2和图3中均能够看出方法二的曲线存在周期性的震荡,并且图3中的震荡幅度越来越大。分析认为观测站在机动过程中加速度的周期性变化导致了可观测度的周期性变化,而可观测度的周期性变化导致了曲线的周期性震荡;同时随着观测站和目标的接近,相对距离 r 变得越来越小,根据式(16)能够看出,相对速度误差对相对距离变化率 $\dot{r}$ 的影响越来越大,最终导致了震荡幅度越来越大。

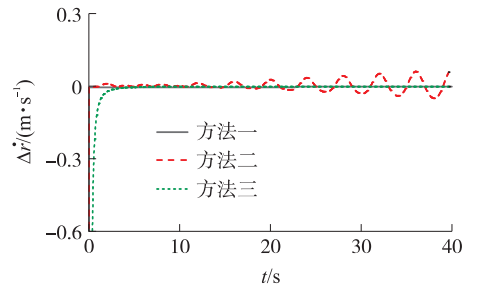


图3 目标静止时相对距离变化率估计误差

Fig. 3 Estimation error of relative distance rate when the target is stationary

2.2 匀速运动目标

为了探究上述3种方法对匀速目标的跟踪过程,在匀速目标的纯方位跟踪过程中对比分析3种方法的估计误差。图4为目标匀速运动时相对距离误差 Δr 曲线。从图中能够看出:方法二和方法三的相对距离误差曲线能够收敛,而方法一无法收敛且有增大趋势。这是因为当目标具有速度时,方法一中将观测站速度作为相对速度的条件不再满足。

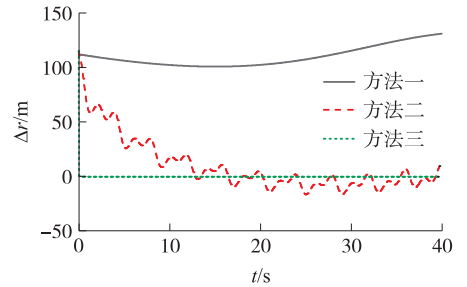


图4 目标匀速运动时相对距离估计误差

Fig. 4 Estimation error of relative distance when the target is moving at a constant speed

图5为目标匀速运动时相对距离变化率误差曲线。

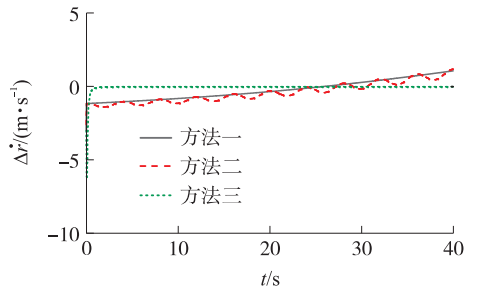


图5 目标匀速运动时相对距离变化率估计误差

Fig. 5 Estimation error of the rate of relative distance when the target is moving at a constant speed

相较于方法一和方法二,方法三可以准确地估计出相对速度。这再次表明了当观测站和目标的相对高度已知时,相对距离和相对速度均具有充分的

可观测度。

2.3 机动目标

2.1 节和 2.2 节的仿真结果证明了方法三对相对距离具有充分的可观测度,因此本节将针对方法三进行蒙特卡洛仿真验证。在本节的仿真中不但给目标的运动增加了机动过程,还在量测数据中增加高斯白噪声,即视线方位角和视线高低角噪声满足正态分布 $N(0 \text{ rad}, 0.001 \text{ rad})$,同时通过自适应算法完成卡尔曼滤波中的噪声参数的动态调整。目标的加速度模型以及噪声参数自适应算法如下。

①目标的加速度 $\mathbf{a}_T$ 模型^[15]设定为

$$\dot{\mathbf{a}}_T(t) = -\alpha \mathbf{a}_T(t) + \mathbf{w}(t) \quad (17)$$

式中: $\dot{\mathbf{a}}_T$ 为目标加速度变化率,目标机动时间常数的倒数 $\alpha = 0.1 \text{ s}^{-1}$; $\mathbf{w}(t)$ 为白噪声,其方差为

$$\sigma_w^2 = 2\alpha\sigma_m^2 \quad (18)$$

$$\sigma_m^2 = \frac{a_{\max}^2}{3}(1 + 4P_{\max} - P_0) \quad (19)$$

式中: $a_{\max}$ 为目标的最高机动加速度, $P_{\max}$ 为目标以最大加速度机动的概率, P_0 为目标处于非加速状态的概率。本文选取 $a_{\max} = 2.0 \text{ m/s}^2$, $P_{\max} = 0.1$, $P_0 = 0.5$ 。

②滤波噪声参数自适应算法^[16-17]为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{k+1} = \bar{\mathbf{Z}}_k \bar{\mathbf{Z}}_k^T + \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T \\ \mathbf{Q}_{k+1} = \mathbf{K}_k \bar{\mathbf{Z}}_k \bar{\mathbf{Z}}_k^T \mathbf{K}_k^T \end{cases} \quad (20)$$

$$\bar{\mathbf{Z}}_k = \frac{1}{W} \sum_{i=k-W+1}^k (\mathbf{Z}_i - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}_{i-1})) \quad (21)$$

式中: $\mathbf{R}_{k+1}$ 为量测噪声矩阵, $\mathbf{Q}_{k+1}$ 为系统噪声矩阵, $\mathbf{K}_k$ 为卡尔曼滤波增益矩阵, $\mathbf{Z}_k$ 为量测数据, $\mathbf{h}$ 为量测方程, $\hat{\mathbf{X}}$ 为状态估计值, $\bar{\mathbf{Z}}_k$ 为卡尔曼滤波新息数据 $\bar{\mathbf{Z}}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}_{k-1})$ 的均值矩阵, W 表示滤波噪声参数自适应算法中使用了连续 W 个时刻的数据,本文 $W = 50$ 。

图 6 和图 7 分别为单次仿真中相对距离误差的变化曲线。从图中可看出,当目标进行机动时,方法三的相对距离估计误差能够在 5 s 内收敛到 5 m 以内。同时,单次仿真中误差曲线抖动幅度越来越小的现象说明了滤波噪声自适应算法的有效性,即随着计算的进行,卡尔曼滤波的系统噪声参数和量测噪声参数得到了有效的自适应调整。

图 8 和图 9 分别为 50 次蒙特卡洛仿真中的相对距离误差均值和相对距离变化率误差均值。图 10 和图 11 分别为 50 次蒙特卡洛仿真中相对距

离的均方根误差(root mean squared error, RMSE) 和相对距离变化率的均方根误差。由图 8~图 10 中的数据统计得到:相对距离误差均值为 0.04 m,相对距离变化率误差均值为 0.16 m/s,相对距离的均方根误差为 0.81 m,相对距离变化率的均方根误差为 0.95 m/s。结果表明:当观测站和目标的相对高度已知时,利用方法三中提出的模型,能够在目标机动状态未知以及量测数据存在噪声的情况下,快速准确地估计出相对距离及相对距离变化率。该方法同样适用于静止及匀速运动目标。

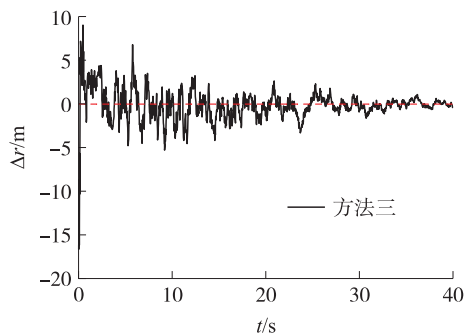


图 6 单次仿真中相对距离估计误差

Fig. 6 Estimation error of relative distance in a single simulation

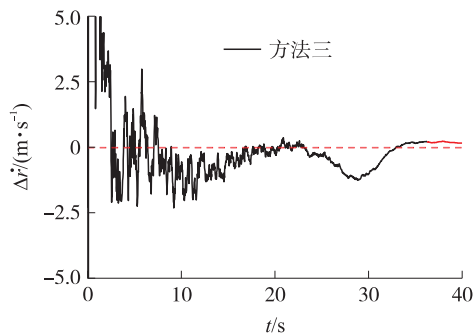


图 7 单次仿真中相对距离变化率估计误差

Fig. 7 Estimation error of the rate of relative distance in a single simulation

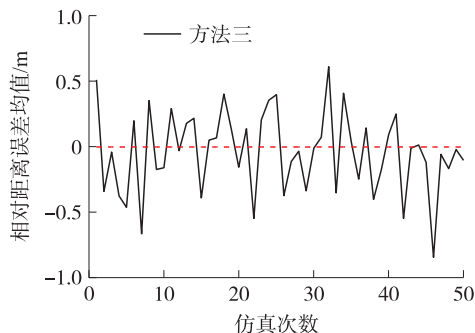


图 8 蒙特卡洛仿真相对距离误差均值

Fig. 8 The mean of relative distance error in Monte-Carlo simulation

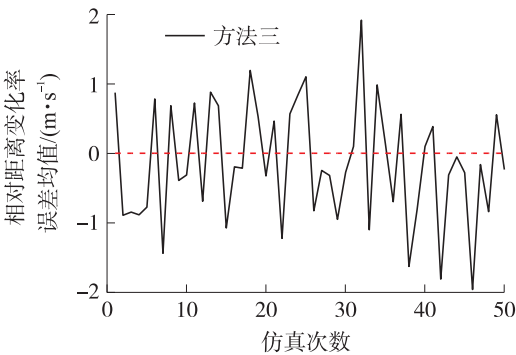


图 9 蒙特卡洛仿真相对距离变化率误差均值

Fig. 9 The mean of relative distance rate error in Monte-Carlo simulation

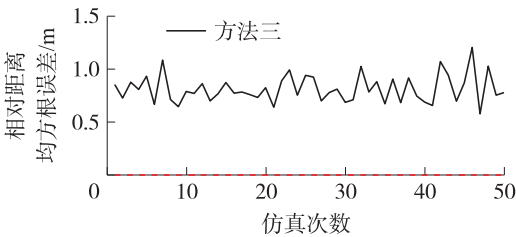


图 10 蒙特卡洛仿真相对距离均方根误差

Fig. 10 The RMSE of relative distance in Monte-Carlo simulation

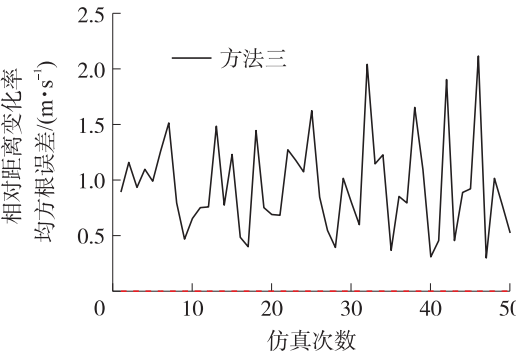


图 11 蒙特卡洛仿真相对距离变化率均方根误差

Fig. 11 The RMSE of the rate of relative distance in Monte-Carlo simulation

3 结束语

本文针对纯方位目标跟踪过程中观测站与目标之间相对距离观测度不足的问题,提出了 3 种改进模型,并分别针对静止目标、匀速运动目标和机动目标进行了仿真及对比分析,得出如下结论:

①在初始相对距离已知的情况下,能够根据观测站的速度实时计算出相对距离,但是此方法仅适用于目标静止以及初始相对距离准确的情况。

②可通过令观测站进行机动的方式,增强纯方位目标跟踪滤波器对相对距离的观测度,但误差收敛速度较慢且误差大小受到观测站机动加速度大小的影响。

③当观测站和目标的相对高度已知时,即使针对具有机动能力的目标以及在噪声环境下,也能够准确且稳定地估计出相对距离及其变化率,蒙特卡洛仿真结果表明,该方法估计出的相对距离均方根误差和相对距离变化率均方根误差分别能够达到 0.81 m 和 0.95 m/s。

参考文献

[1] 夏佩伦. 坐标系与纯角度目标跟踪[J]. 火力与指挥控制, 1992(4):46-53.
XIA Peilun. Coordinate system and bearing-only target tracking[J]. Fire Control & Command Control, 1992(4):46-53. (in Chinese)

[2] 褚东升,李华军,李春荣. 纯方位运动目标的跟踪估计算法[J]. 弹道学报,1997,9(2):15-20.
CHU Dongsheng,LI Huajun,LI Chunrong. A tracking estimation for bearing-only target[J]. Journal of Ballistics, 1997,9(2):15-20. (in Chinese)

[3] 辛沙欧,陈可,宋震林,等. 基于纯方位的多无人机协同目标跟踪算法[J]. 电子设计工程,2021,29(24):18-23.
XIN Shaou,CHEN Ke,SONG Zhenlin. A algorithm of multi-UAV cooperative target tracking based on only-bearings[J]. Electronic Design Engineering, 2021,29(24):18-23. (in Chinese)

[4] 李华军,梅宁. 潜艇纯方位跟踪的机动优控模型[J]. 弹道学报,1995,7(3):25-30.
LI Huajun,MEI Ning. A model of submarine's maneuvers for bearings-only tracking[J]. Journal of Ballistics, 1995,7(3):25-30. (in Chinese)

[5] 郑鑫,文成林. 基于强跟踪滤波的纯方位寻的导弹目标跟踪[J]. 吉林化工学院学报,2022,39(11):55-58.
ZHENG Xin,WEN Chenglin. Guidance of bearings only homing missile based on strong tracking filter[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2022,39(11):55-58. (in Chinese)

[6] 夏佩伦. 纯方位目标跟踪系统的可观测程度[J]. 火力与指挥控制,1992(2):25-31.
XIA Peilun. Observability of bearings-only target tracking system[J]. Fire Control & Command Control, 1992(2):25-31. (in Chinese)

[7] 杨婧,李银伢,戚国庆,等. 纯方位目标运动分析可观测性研究[J]. 火力与指挥控制,2015,40(12):1-8,17.
YANG Jing,LI Yinya,QI Guoqing,et al. Overview of observability of bearings-only target motion analysis [J]. Fire Control & Command Control, 2015,40(12):1-8,17. (in Chinese)

- manufactured by selective laser melting[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 149–157.
- [10] 张璇, 李晓雁. 微纳米点阵力学超材料的设计和性能[J]. 力学与实践, 2021, 43(1): 164–168.
ZHANG Xuan, LI Xiaoyan. Design and mechanical property of micro-/nano-scale architected metamaterials[J]. Mechanics in Engineering, 2021, 43(1): 164–168. (in Chinese)
- [11] AL-KETAN O, LEE D W. Mechanical properties of additively-manufactured sheet-based gyroidal stochastic cellular materials[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48: 102418.
- [12] ALMAHRI S, SANTIAGO R, LEE D W, et al. Evaluation of the dynamic response of triply periodic minimal surfaces subjected to high strain-rate compression[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102220.
- [13] NOVAK N, BOROVINSEK M, AL-KETAN O, et al. Impact and blast resistance of uniform and graded sandwich panels with TPMS cellular structures[J]. Composite Structures, 2022, 300: 116174.
- [14] PENG Chenxi, TRAN P. Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings[J]. Composites Part B, 2020, 188: 107773.
- [15] 吴桐, 王清辉, 徐志佳. 三周期极小曲面多孔材料渗透率尺度特性研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(5): 1015–1024.
WU Tong, WANG Qinghui, XU Zhijia. Study on the scale characteristics of permeability of TPMS porous materials[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(5): 1015–1024. (in Chinese)
- [16] LU Jiaxiong, DONG Peng, ZHAO Yongtao, et al. 3D printing of TPMS structural ZnO ceramics with good mechanical properties[J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12897–12905.
- [17] ORAIB A. MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces[J]. Material Design & Processing Communications, 2020, 3(6): e205.
- [18] NICKELS L. Software toolkits for architected materials, lightweighting, and more[J]. Metal Powder Report, 2020, 75(4): 203–206.
- [19] AN Rui, WANG Yangwei, FU Qiang, et al. Study on parameter acquisition and optimization methods of JH-2 constitutive model for ceramic[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 172: 104424.
- [20] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(12): 8060–8073.
- [21] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. Response of silicon carbide to high velocity impact[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(9): 5858–5866.
- [22] 祝奔霆, 吴国民. 侵入数值仿真中网格密度对单元失效应变影响分析[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 199–204.
ZHU Benting, WU Guomin. Analysis on influence of grid density on element failure strain in penetration numerical simulation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 199–204. (in Chinese)
- [23] TIAN Chao, SUN Qitian, AN Xuanyi, et al. Influences of ceramic constraint on protection performances of ceramic-metal hybrid structures under impact loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 159: 81–90.
- [24] TIAN C, AN X Y, SUN Q T, et al. Experimental and numerical analyses of the penetration resistance of ceramic-metal hybrid structures[J]. Composite Structures, 2018, 211: 264–272.

(上接第 59 页)

- [8] 石章松, 刘忠. 单站纯方位目标跟踪系统可观测性分析[J]. 火力与指挥控制, 2007(2): 26–29, 33.
SHI Zhangsong, LIU Zhong. The analysis of the observability on the single platform bearings-only target tracking system[J]. Fire Control & Command Control, 2007(2): 26–29, 33. (in Chinese)
- [9] 冯道旺, 李宗华, 周一宇, 等. 一种单站无源定位方法及其可观测性分析[J]. 国防科技大学学报, 2004(1): 68–71.
FENG Daowang, LI Zonghua, ZHOU Yiyu, et al. A new single observer passive location and tracking technology and its observability analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004(1): 68–71. (in Chinese)
- [10] 许志刚. 纯方位三维运动目标跟踪的不可观测性问题[J]. 弹道学报, 2007, 19(2): 33–36.
XU Zhigang. Unobservability for three-dimensional tracking based on bearings-only measurements[J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(2): 33–36. (in Chinese)
- [11] NARDONE S C, AIDALA V J. Observability criteria for bearings-only target motion analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981, 17(2): 162–166.
- [12] HAMMEL S E, AIDALA V J. Observability requirements for three-dimensional tracking via angle measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(2): 200–207.
- [13] 夏佩伦. 一般仅方位目标跟踪系统可观测的必要条件[J]. 电光与控制, 2011, 18(6): 1–4.
XIA Peilun. Necessary observable conditions for general bearings-only target tracking systems[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(6): 1–4. (in Chinese)
- [14] WELCH G, BISHOP G. An Introduction to the Kalman filter[M]. Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
- [15] FAN Y, QIAO S, WANG G. A modified adaptive Kalman filtering method for maneuvering target tracking of unmanned surface vehicles[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112890.
- [16] LI Q, SUN F. Adaptive cubature particle filter algorithm[C]//2013 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA). New York: IEEE, 2013: 1356–1360.
- [17] FANG J, YANG S. Study on innovation adaptive EKF for in-flight alignment of airborne POS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1378–1388.