

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209433

基于 CSM_UKF 的双经纬仪强机动目标跟踪研究^{*}彭争飞^{1,2} 郭 杨¹ 魏 丹² 陶雁华¹ 王少博¹

(1. 火箭军工程大学 西安 710025; 2. 西安卫星测控中心 西安 710043)

摘要: 以双经纬仪纯角度测量与定位为研究内容,考虑量测方程的非线性,采用无迹卡尔曼滤波(UKF)进行系统状态估计。同时,设定非合作目标预警跟踪背景,假设目标存在强机动的情况,以当前统计模型(CSM)拟合目标运动状态,建立了双经纬仪对强机动目标的 CSM_UKF 跟踪模型。在相同条件下,与匀加速模型进行了仿真对比。仿真结果表明,该模型能实现双经纬仪纯角度测量条件下对目标的稳定跟踪,尤其在目标存在强机动条件下,跟踪效果优于匀加速模型。

关键词: 双经纬仪定位;当前统计模型;无迹卡尔曼滤波

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Strong maneuvering target tracking for theodolite based on CSM_UKF model

Peng Zhengfei^{1,2} Guo Yang¹ Wei Dan² Tao Yanhua¹ Wang Shaobo¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: In this paper, pure angle measurement and location of double theodolite was studied. Considering the non-linearity of measurement equation, unscented Kalman filter (UKF) was used to estimate the system state. Assuming that the target had strong maneuvering, this paper applied the current statistical model (CSM) to fit the target motion state. At the same time, based on the background of non-cooperative target early-warning and tracking, the CSM_UKF tracking model of double theodolite against strongly maneuvering target was established. Under the same conditions, the simulation was compared with the CA model. The simulation results show that the model can track the target stably under the condition of pure angle measurement by double theodolite, especially under the condition of strong maneuvering target, the tracking effect is better than that of the CA model.

Keywords: double theodolite location; current statistical model; unscented Kalman filter

0 引 言

随着反电子侦察、隐身技术的不断发展,传统的雷达、激光等有源探测预警设备,在对目标进行跟踪时,易被敌方侦察,进而遭受干扰甚至攻击^[1]。光电经纬仪为无源测量设备,性能可靠、隐蔽性好、直观性强,且可实时获取目标的实况景象信息,尤其在进出“黑障”、强电磁干扰等不利于无线电测量的场景下,具有明显的优势。

光电经纬仪在实时跟踪测量时,只能得到目标的方位、俯仰角度信息,因此单套经纬仪无法实现目标定位。通过两套(多套)经纬仪的几何交会原理,实现目标运动参数和空间姿态解算,是经纬仪定位的主要方法。文献[2]以线性

模型参数最小二乘(LS)辨识理论为基础,建立多台光测设备交会处理算法。文献[3]提出多套经纬仪的最小距离平方和定位,同时采用自适应容错算法,无需事前修复野值,仍能确保定位结果可靠。文献[4]根据目标运动特点,提出补充条件定位解算的数学模型,在只有角度测元的情况下,提供了定位解算的方法。文献[5]通过对每台经纬仪构建两个方向余弦,利用加权算法实时估计被测目标的三维坐标,提出了基于方向余弦的交会方法。

几何交会方法模型建立后,如何处理交会数据是决定目标定位精度的关键。文献[6]考虑目标相对站点是动态变动的,在各点的解算弹道参数精度并不相同,提出基于最小二乘融合的动态加权定位方法。文献[7]在双经纬仪布

收稿日期:2022-03-28

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61673386,62073335)、陕西省杰出青年科学基金(2022JC-42)项目资助

站对定位精度影响分析的基础上,提出了基于遗传算法的光电经纬仪布站优化设计。文献[8]从系统误差修正算法、跟踪滤波算法及共轴跟踪信息融合系统研究的基础上,提出了基于多信息源数据融合的跟踪精度提高方法。文献[9]提出了函数约束误差模型,并与传统的方向余弦定位方法进行了比较,证明该方法具有更高的定位精度。

由当前研究现状可知,双经纬仪定位精度受设备系统误差、交会角度、所处地理位置、大气折射等因素影响,且在整个航迹测量过程中,诸要素处于实时变化中,而卡尔曼滤波能实现在递推过程中状态噪声和量测噪声的不断更新。文献[10]以雷达采用无迹卡尔曼滤波为例,建立了干扰信号的数学模型。文献[11]结合强跟踪滤波器和 UKF 滤波器的优点,提出一种基于强跟踪 UKF 的视频目标跟踪算法。文献[12]针对北斗伪距定位中噪声统计特性未知或不准确带来的定位精度不高问题,采用了 UKF 和噪声统计值估计器相结合的滤波方法。文献[13]针对低轨卫星编队飞行中的环航飞行、共面漂移和共线保持 3 种模式,设计了 UKF 的相对导航滤波算法。无迹卡尔曼滤波(UKF)是通过 sigma 点采样和无损变换,用一系列的确定样本,逼近状态的后验概率密度,不需要对非线性函数进行近似。从现有研究结果来看,对于非线性滤波问题,相对于扩展卡尔曼滤波,无迹卡尔曼不会忽略高阶项,具有更高的精度。

敌方非合作目标担负侦察与攻击任务时,为躲避拦截和防止暴露,常常伴随着频繁的轨道机动。当前统计模型(CSM)对目标的机动加速度采用非零均值的一阶时间相关模型描述^[14],在机动性强的场景中,具有显著的跟踪优势。因此,本文建立双经纬仪对目标跟踪定位的 CSM_UKF 模型,以实现对强机动目标的稳定跟踪。

1 双经纬仪目标定位原理

光学经纬仪仅可获取被测目标的角度信息(方位角、俯仰角),无法获取距离信息,因而单套经纬仪无法实现目标定位。只有利用多套(两套以上)经纬仪的测量数据进行几何交会处理才可以解算目标位置。

1.1 双经纬仪光轴相交

经纬仪测量的方位角和俯仰角数据是相对于测站坐标系,为利用双站测量数据进行交会处理,需将其统一于地心地固系,如图 1 所示。

假设利用高精度定位设备测得的经纬仪中心点 o_1 与 o_2 的大地坐标分别为 (L_1, B_1, H_1) 和 (L_2, B_2, H_2) ,将中心点的大地坐标转换为地心地固系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_{o_i} \\ y_{o_i} \\ z_{o_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H_i) \cos B_i \cos L_i \\ (N + H_i) \cos B_i \sin L_i \\ [N(1 - e^2) + H_i] \sin B_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_i}}$, $i = 1, 2$, a 为地球长半轴半径,

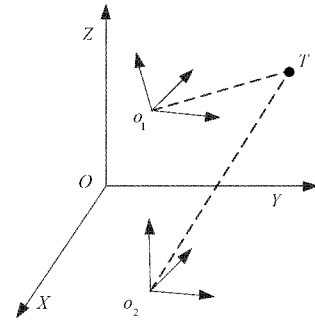


图 1 双经纬仪定位原理

e 为地球的第一偏心率。

两套经纬仪跟踪同一目标,理想情况下,在空间交会于同一点 T , T 点相对于经纬仪的方位角和俯仰角分别为 A_i 和 E_i , 则 $o_i T$ 在测站坐标系下的方向向量为:

$$p_i = \begin{bmatrix} \cos E_i \sin A_i \\ \cos E_i \cos A_i \\ \sin E_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

测站坐标系到地固坐标系的旋转矩阵为:

$$R_i = R_z(90 + L_i) R_x(90 - B_i) = \begin{bmatrix} -\sin L_i & -\sin B_i \cos L_i & \cos B_i \cos L_i \\ \cos L_i & -\sin B_i \sin L_i & \cos B_i \sin L_i \\ 0 & \cos B_i & \sin B_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

则经纬仪光轴在地固坐标系中的方向向量为:

$$\begin{bmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{bmatrix} = R_i \begin{bmatrix} \cos E_i \sin A_i \\ \cos E_i \cos A_i \\ \sin E_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

基线 $o_1 o_2$ 的方向向量为:

$$l_{12} = \begin{bmatrix} \frac{x_{o_1} - x_{o_2}}{d} \\ \frac{y_{o_1} - y_{o_2}}{d} \\ \frac{z_{o_1} - z_{o_2}}{d} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$d = \sqrt{(x_{o_1} - x_{o_2})^2 + (y_{o_1} - y_{o_2})^2 + (z_{o_1} - z_{o_2})^2}$$

经纬仪光轴指向与基线之间的夹角为:

$$\cos \varphi_1 = l_1 l_{12} + m_1 m_{12} + n_1 n_{12} \quad (6)$$

$$\cos \varphi_2 = l_2 l_{12} + m_2 m_{12} + n_2 n_{12} \quad (7)$$

结合三角形正弦定理,即可确定目标 T 的位置。

1.2 双经纬仪光轴异面

工程实际中,受经纬仪结构和成像机理、测角精度、时间同步、跟踪目标部位差异及工作环境(诸如所处的地理位置、与太阳的夹角、大气折射)等方面的影响以及测量误差的存在^[15],两经纬仪观测同一目标时其光轴并非交会于 T 点,而是呈现为异面关系,根据最小距离和原理^[3],目标真实位置应位于两光轴公垂线上。设公垂线与两光轴相交于 T_1 和 T_2 ,如图 2 所示。

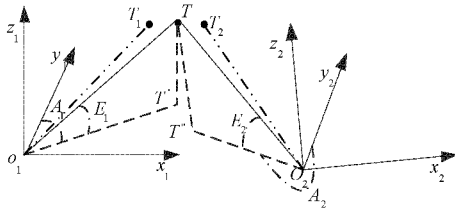


图 2 经纬仪光轴相交或异面

则两光轴指向的空间夹角为：

$$\cos\varphi_{12} = l_1l_2 + m_1m_2 + n_1n_2 \quad (8)$$

经纬仪到目标的斜距分别为^[6]：

$$\begin{cases} r_1 = d(\cos\varphi_{12}\cos\varphi_2 + \cos\varphi_1)/\sin\varphi_{12}^2 \\ r_2 = d(\cos\varphi_{12}\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2)/\sin\varphi_{12}^2 \end{cases} \quad (9)$$

据此，可以解算 T_1 和 T_2 位置信息。进一步，根据误差传递特性推导出坐标精度与交会角、基线长度、方位角和俯仰角之间的关系公式，通过选取适当的加权系数 ρ ，即可估算目标最优位置。

各系统加权系数通常依据测量误差进行确定，与测量误差成反比关系。然而，影响经纬仪测量误差的因素，诸如大气折射模型等，无法实时精确标定，因此常规的动态加权方法实际上仍是建立在初始静态误差基础上。卡尔曼滤波通过时间更新和量测更新过程，动态调整状态噪声和量测噪声，在解决此类问题中有明显优势。

2 目标运动模型建立

本文以经纬仪对目标进行预警跟踪为背景，假设目标具有强的机动性能。因此，考虑采用“当前”统计模型(CSM)描述目标的运动状态。在 CSM 模型中，目标的机动加速度采用非零均值的一阶时间相关模型描述^[14]，即：

$$a(t) = \bar{a}(t) + \tilde{a}(t) \quad (10)$$

其中， $\bar{a}(t)$ 为机动加速度的均值，在一个采样周期内可以看作常值； $\tilde{a}(t)$ 为机动加速度的随机分量，为零均值一阶 Markov 过程，其统计特性由一阶时间相关函数表征，其中 α 为机动时间常数的倒数， $R_{\tilde{a}}(\tau) = E[\tilde{a}(t)\tilde{a}(t+\tau)] = \sigma_a^2 \exp(-\alpha\tau)$ ，即机动频率，一般根据实际应用情况取为经验值； σ_a^2 为机动加速度的方差，其加速度特征使用修正的 Rayleigh 分布描述，方差为：

$$\sigma_a^2 = \begin{cases} \frac{4-\pi}{\pi} [a_{-\max} - \bar{a}(t)]^2, & a(t) > 0 \\ \frac{4-\pi}{\pi} [a_{-\max} - \bar{a}(t)]^2, & a(t) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中， a_{\max} 和 $a_{-\max}$ 为目标机动加速度极值。由上式可知，当测得目标加速度均值时，加速度方差随之确定。

考虑三维运动状态，选取目标的位置、速度、加速度作为状态量，建立 CSM 模型下的离散化状态方程为：

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + U(k)\bar{a} + W(k) \quad (12)$$

式中：

$$\mathbf{X} = [x \quad y \quad z \quad v_x \quad v_y \quad v_z \quad a_x \quad a_y \quad a_z]^T$$

$$\Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & M & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & M \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S \end{bmatrix}$$

其中：

$$M = \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T})$$

$$N = \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T})$$

$$S = e^{-\alpha T}$$

$$Q(k) = E[W(k)W(k)^T] = 2\alpha \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Q_{ij} = \text{diag}[q_{ij} \quad q_{ij} \quad q_{ij}][\sigma_{a_x}^2 \quad \sigma_{a_y}^2 \quad \sigma_{a_z}^2]^T$$

其中， $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$ 。

$$q_{11} = \frac{1}{2\alpha^5} \left(1 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T + \frac{2\alpha^3 T^3}{3} - 2\alpha^2 T^2 - 4\alpha T e^{-\alpha T} \right)$$

$$q_{12} = \frac{1}{2\alpha^4} (e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T} + 2\alpha T e^{-\alpha T} - 2\alpha T + \alpha^2 T^2)$$

$$q_{13} = \frac{1}{2\alpha^3} (1 - e^{-2\alpha T} - 2\alpha T e^{-\alpha T})$$

$$q_{22} = \frac{1}{2\alpha^3} (4e^{-\alpha T} - 3 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T)$$

$$q_{23} = \frac{1}{2\alpha^2} (e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T})$$

$$q_{33} = \frac{1}{2\alpha} (1 - e^{-2\alpha T})$$

$$U(k) = \begin{bmatrix} u_1 & 0 & 0 \\ 0 & u_1 & 0 \\ 0 & 0 & u_1 \\ u_2 & 0 & 0 \\ 0 & u_2 & 0 \\ 0 & 0 & u_2 \\ u_3 & 0 & 0 \\ 0 & u_3 & 0 \\ 0 & 0 & u_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中：

$$u_1 = \frac{1}{\alpha} \left(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \right)$$

$$u_2 = T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha}$$

$$u_3 = 1 - e^{-\alpha T}$$

目标的量测模型为:

$$Z_{k+1} = h(X_{k+1}) + V_{k+1} \quad (15)$$

其中:

$$h(X_{k+1}) = \begin{bmatrix} A_1(k) \\ E_1(k) \\ A_2(k) \\ E_2(k) \end{bmatrix}$$

式中: A_i 和 E_i 分别为两测站观测到的方位角和俯仰角。

假设目标在 k 时刻心地固系下的位置信息为 $[x_k, y_k, z_k]$, 则其在测站坐标系下坐标由上一节交会定位原理的分析可知:

$$\begin{bmatrix} e_i \\ n_i \\ u_i \end{bmatrix} = R_i^{-1} \begin{bmatrix} x_k - x_{oi} \\ y_k - y_{oi} \\ z_k - z_{oi} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\Lambda_i = \begin{cases} \arccos\left(\frac{n_i}{\sqrt{e_i^2}}\right), & e_i \geq 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{n_i}{\sqrt{e_i^2}}\right), & e_i < 0 \end{cases}$$

$$E_i = \frac{u_i}{\sqrt{e_i^2 + n_i^2}}$$

3 目标状态滤波流程

由上节分析可知,经纬仪测量获取的仅仅是角度信息,因此所建立的量测方程是典型的非线性方程,无迹卡尔曼滤波(UKF)是解决非线性问题的常用方法,因其具有较高的滤波精度,在工程中得到了广泛应用。

UKF 滤波过程如下^[16]:

1) 初始化状态 \hat{x}_0 以及状态误差协方差矩阵 P_0 :

$$\hat{x}_0 = E[x_0]$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]$$

2) 无迹变换

标准的对称 sigma 点集的选取为:

$$\begin{cases} \chi_{k|k}^{(0)} = \hat{x}_{k|k} \\ \chi_{k|k}^{(i)} = \hat{x}_{k|k} + (\sqrt{(n+\lambda)P_{k|k}})_i \\ \chi_{k|k}^{(n+1-i)} = \hat{x}_{k|k} - (\sqrt{(n+\lambda)P_{k|k}})_i \end{cases}$$

式中: $(\sqrt{(n+\lambda)P_{k|k}})_i$ 为矩阵的第 i 列, $i = 1, 2, \dots, n$; $\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n$, α 是一个尺度参数, κ 为第 3 刻度因素。

权系数的计算:

$$\begin{cases} W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{n+\lambda} \\ W_0^{(c)} = W_0^{(m)} + (1 - \alpha^2 + \gamma) \\ W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(n+\lambda)}, i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases}$$

式中: γ 是一个与状态的先验分布信息信息有关的参数。

3) 时间更新

$$\hat{x}_{k-1|k} = f[\chi_{k-1|k}^{(i)}]$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \hat{x}_{k+1|k}^{(i)}$$

$$P_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (\hat{x}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{x}_{k+1|k}) \cdot (\hat{x}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{x}_{k+1|k})^T + Q_k$$

4) 量测更新

根据时间更新得到的 $\hat{x}_{k+1|k}$ 和 $P_{k+1|k}$ 及采样策略可得 $2n+1$ 个采样点和相应的权值,继续进行 UT 变换。

$$\hat{z}_{k+1|k} = h(\zeta_{k|k}^{(i)})$$

$$\hat{z}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \hat{z}_{k+1|k}^{(i)}$$

$$P_{xz, k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (\hat{x}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{x}_{k+1|k}) \cdot (\hat{z}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{z}_{k+1|k})^T$$

$$P_{zz, k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (\hat{z}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{z}_{k+1|k}) \cdot (\hat{z}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{z}_{k+1|k})^T + R_{k+1}$$

5) 滤波结果更新

根据 $k+1$ 时刻的量测值 z_{k+1} , 可以求出滤波增益

K_{k+1} , $k+1$ 时刻状态估计 $\hat{x}_{k+1|k+1}$ 和状态协方差估计:

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} \cdot (z_{k+1} - \hat{z}_{k+1|k})$$

$$K_{k+1} = P_{xz, k+1|k} (P_{zz, k+1|k})^{-1}$$

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1} P_{zz, k+1|k} K_{k+1}^T$$

4 仿真及分析

选取两测站大地坐标分别为测站 1($L=101^\circ E, B=34^\circ N, H=900$ m), 测站 2($L=108^\circ E, B=38^\circ N, H=1000$ m), 目标运动过程如表 1 所示。

基于 CSM-UKF 的滤波过程参数设置如表 2 所示。

基于上述仿真参数,将 CSM 模型下的仿真结果与 CA 模型^[17]下的仿真结果进行比较,得到跟踪情况如图 3~11 所示。

表 1 目标运动状态

时间/s	运动模式	运动参数
0~20	匀速直线	各方向速度均为 20 m/s
20~30	匀加速直线	X 方向加速度为 12 m/s ² , Y 方向为 20 m/s ² , Z 方向为 0 m/s ²
30~40	匀加速直线	X 方向加速度为 20 m/s ² , Y 方向为 20 m/s ² , Z 方向为 0 m/s ²
40~50	匀加速直线	X 方向加速度为 50 m/s ² , Y 方向为 20 m/s ² , Z 方向为 0 m/s ²
50~60	匀加速直线	X 方向加速度为 100 m/s ² , Y 方向为 20 m/s ² , Z 方向为 0 m/s ²

表 2 模型参数设置

初始化参数	模型参数
$X_0 = [-699\ 464.6\ \text{m}; 20\ \text{m/s}; 0\ \text{m/s}^2]$	测量周期 $T = 0.5\ \text{s}$
$Y_0 = [5\ 170\ 700\ \text{m}; 20\ \text{m/s}; 0\ \text{m/s}^2]$	机动频率 $a = 0.002\ \text{s}^{-1}$
$Z_0 = [3\ 851\ 580\ \text{m}; 20\ \text{m/s}; 0\ \text{m/s}^2]$	目标峰值加速度 $a_{\text{max}} = 180\ \text{m/s}$
$P_{X_0} = P_{Y_0} = P_{Z_0} = 1\text{e}1 \cdot \text{diag}([1\ 0.1\ 0.1])$	测量噪声方差阵 $R = (0.05)^2 \text{diag}([1\ 1\ 1])$

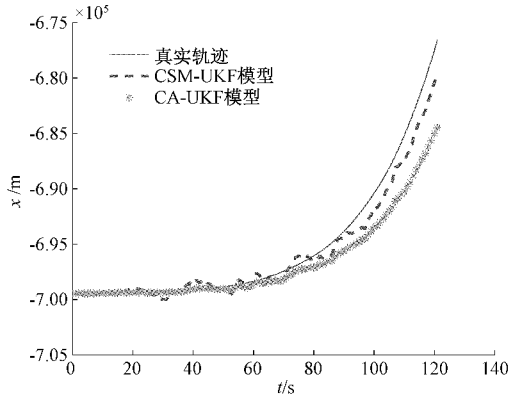


图 3 目标 X 方向位置跟踪曲线

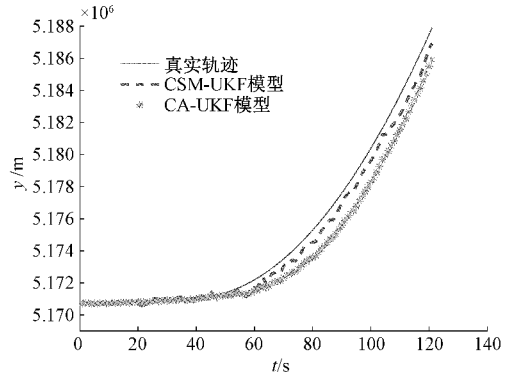


图 6 目标 Y 方向位置跟踪曲线

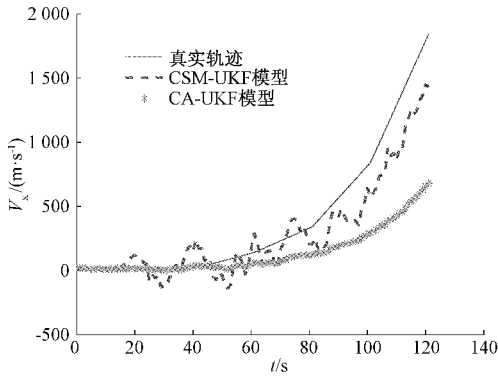


图 4 目标 X 方向速度跟踪曲线

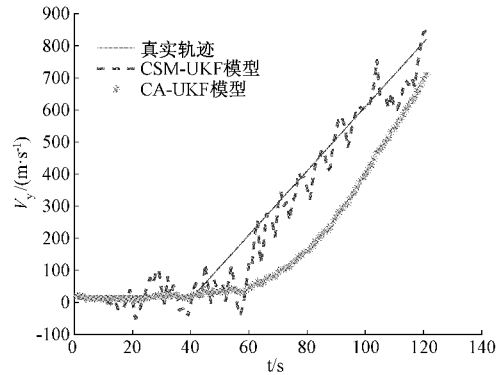


图 7 目标 Y 方向速度跟踪曲线

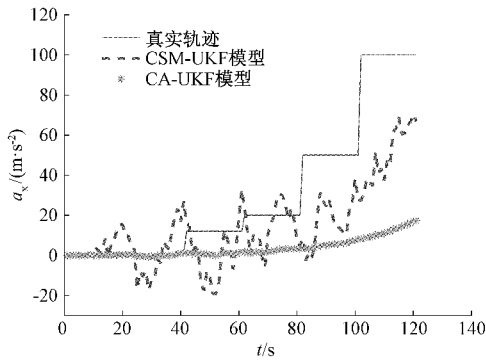


图 5 目标 X 方向加速度跟踪曲线

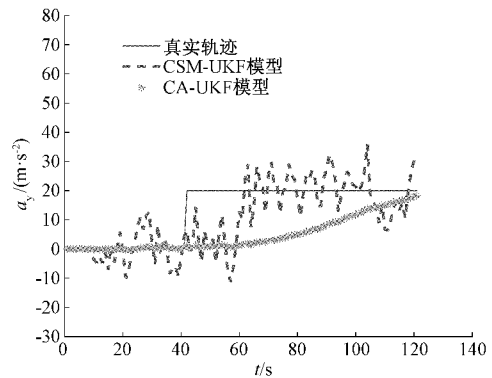


图 8 目标 Y 方向加速度跟踪曲线

对比图 3~11 仿真结果可以看出,在采用双经纬仪进行目标跟踪定位时,CSM 模型与 CA 模型均能实现对目标的有效跟踪,在目标存在强机动的 X 轴方向上,CSM 模型

对目标速度与加速度的跟踪效果更佳,在无加速度的 Z 轴方向上,CSM 模型波动更大,跟踪不稳定。

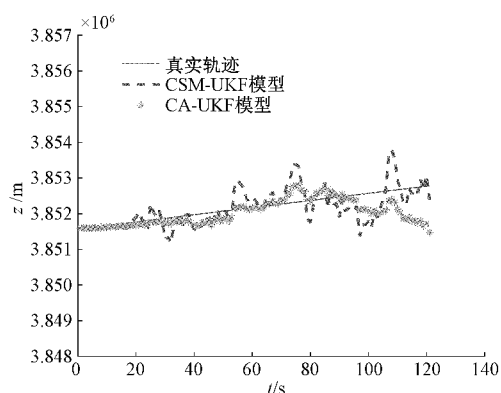


图 9 目标 Z 方向位置跟踪曲线

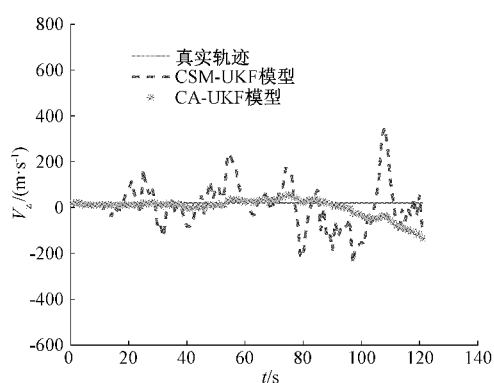


图 10 目标 Z 方向速度跟踪曲线

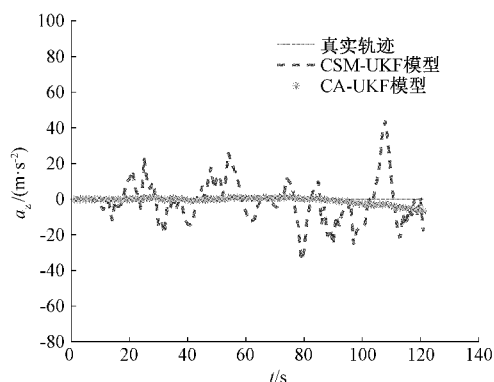


图 11 目标 Z 方向加速度跟踪曲线

5 结 论

本文以双经纬仪对非合作目标的预警跟踪为背景,考虑目标存在强机动性的情况,以当前统计模型建立目标状态方程,结合经纬仪测量信息特点,以无迹卡尔曼滤波作为滤波方式,建立 CSM_UKF 跟踪模型。仿真结果表明,该模型能实现双经纬仪对目标的稳定跟踪,同时与 CA_UKF 相比,在目标频繁机动的情况下,其对目标的速度和加速度跟踪效果更优。但当目标机动性不强时,跟踪不够平稳,波动较大,据此在后续的研究中,可以考虑采用 CSM 模型与其他模型相结合的方式,以提高对目标的跟踪效果。

参考文献

- [1] 郁春来,张元发,万方. 无源定位技术体制及装备的现状与发展趋势[J]. 空军雷达学院学报,2012,26(2): 79-85.
- [2] 乜铁宁. 靶场光测设备目标检测与定位定姿技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [3] 梁家辉,李建,胡绍林. 多套光学经纬仪联合跟踪的容错最小距离平方和定位[J]. 光学精密工程,2020, 28(12):2596-2604.
- [4] 张广兴,张野. 光电经纬仪补充条件定位方法及其应用[J]. 测控技术,2021,40(8):86-89.
- [5] 吴能伟. 基于方向余弦的交会方法[J]. 光电子·激光, 2017,28(1):87-90.
- [6] 赵满庆. 基于融合动态加权的光电经纬仪交会定位方法[J]. 电子测量技术,2017,40(12):1233-1235.
- [7] 郭丽华,朱元昌,邸彦强. 基于遗传算法的光电经纬仪布站优化设计[J]. 仪器仪表学报,2010,31(4): 741-746.
- [8] 杨宏韬. 基于多信息源数据融合的光电跟踪系统精度提高方法的研究[D]. 合肥:中国科学院大学,2016.
- [9] 宫志华,徐旭,段鹏伟,等. 一种基于 Hermite 函数约束的光学经纬仪多站定位方法研究[J]. 兵工学报,2014, 35(12):2092-2097.
- [10] 贵彦乔,吴彦鸿. 一种对跟踪雷达的航迹干扰方法[J]. 国外电子测量技术,2018,37(9):62-67.
- [11] 杨新欣,邓联文,陈鸿飞,等. 基于强跟踪 UKF 的视频目标跟踪算法[J]. 电子测量技术,2016,39(10): 95-99.
- [12] 李燕,鲁昌华,张国强,等. 自适应 UKF 在北斗伪距定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(2): 125-131.
- [13] 李轶,张善从. 基于视线测量的航天器相对导航滤波方法研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(6):1201-1209.
- [14] ZHOU HR, KUMAR K S P. A "current" statistical model and adaptive algorithm for estimating maneuvering targets[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 1984, 7(5):596-602.
- [15] 吴能伟. 异面交会法在光电经纬仪中应用[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):1233-1235.
- [16] 梁晓波. 基于卡尔曼滤波器的在轨目标跟踪算法研究[D]. 合肥:中国科学院大学,2017.
- [17] 李松洲. 跟踪滤波方法在跟踪系统中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

作者简介

彭争飞,硕士研究生,主要研究方向为航天器测量与控制。

E-mail:syfway@126.com

郭杨(通信作者),博士生导师,副教授,主要研究方向为飞行器导航、制导与控制。

E-mail:guoyang820@foxmail.com