

文章编号: 2095-4980(2024)10-1127-06

基于球面模型的单运动平台无源定位方法

国辛纯^{1,2}, 胡亚^{1,2}, 杜宇峰^{1,2}, 赵乾宏^{1,3}, 窦修全^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北石家庄 050081; 2. 河北省电磁频谱认知与管控重点实验室, 河北石家庄 050081; 3. 中国卫星海上测控部, 江苏江阴 214431)

摘要: 受地球曲率影响, 传统基于平面直角坐标系的定位模型随着侦测距离的增大, 定位误差显著增大, 严重影响远距离目标定位跟踪精确度。对此, 提出一种基于球面模型的单运动平台定位方法, 将平面直角函数方程转换为球面三角函数方程, 降低地球曲率误差影响; 利用无轨迹卡尔曼滤波(UKF)算法实现复杂非线性观测方程迭代求解及远距离目标高精度位置估计。仿真试验结果表明, 基于球面模型的定位方法具有较高的定位精确度, 定位精确度提升 0.3%R~0.6%R。

关键词: 球面模型; 单站无源定位; 无轨迹卡尔曼滤波; 测向

中图分类号: TN9112

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023172

Passive location method of single moving platform based on spherical model

GUO Xinchun^{1,2}, HU Ya^{1,2}, DU Yufeng^{1,2}, ZHAO Qianhong^{1,3}, DOU Xiuquan^{1,2}

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China;
2. Hebei Key Laboratory of Electromagnetic Spectrum Cognition and Control, Shijiazhuang Hebei 050081, China;
3. China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin Jiangsu 214431, China)

Abstract: Under the influence of earth curvature, the localization error of traditional positioning model based on rectangular plane coordinate system will increase significantly with the detection range increasing, and it seriously affects the positioning and tracking accuracy of long-range targets. This paper proposes a positioning method with single moving platform based on spherical models. It transforms the plane rectangular function equation into the spherical trigonometric function equation to reduce the influence of the earth curvature error. It utilizes the Unscented Kalman Filter(UKF) algorithm to solve the complicated nonlinear observation equation iteratively and realizes high-precision position estimation of long-range targets. Simulation results demonstrate that the proposed method based on spherical models has a higher position accuracy which is increased by 0.3%R~0.6%R.

Keywords: spherical model; single observer passive localization; Unscented Kalman Filter; direction finding

无源定位技术^[1]要求侦察装备本身不发射信号, 通过被动接收目标辐射的电磁波信号, 完成该辐射源的类型及空间或地理位置估计。无源定位方法具有作用距离远、隐蔽接收、不易被对方发觉等优点, 广泛用于电子侦察装备中。随着电子对抗技术的发展以及作战应用方式的更新, 基于单平台^[2-3]的高精确度无源定位装备的需求非常迫切, 其重点是战术飞机提供距离引导、目标瞄准定位、机载威胁告警与战场无源侦察, 为将来的局部军事冲突提供重要的情报支援信息。

目前基于机载平台的侦察装备多采用基于测向单运动平台定位模型^[4-6]、基于相位差变化率^[7-8]定位模型、基于旋转基线^[9]定位模型、基于目标直接定位模型^[10]以及多种定位体制综合的定位体模型。常见的定位模型均采用平面直角坐标系完成侦察平台与目标位置关联, 建立观测量与目标位置的观测方程; 通过实时更新观测量信息, 采用滤波迭代处理方式, 完成目标位置估计与跟踪, 并能够获得较高定位精确度与目标位置更新速度。但这些定位模型只考虑无线电信号直线传播, 未考虑地球曲率的影响。随着侦收目标距离的增加, 建立的平面直角坐

收稿日期: 2023-06-17; 修回日期: 2023-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20B2071)

标方程误差随之增大。因此，为提升远距离目标侦测定位精确度，需重点研究远距离条件下单运动平台定位模型的建立与修正问题，保证远距离条件下单运动平台定位精确度。为此，本文提出基于球面模型的单运动平台定位模型，利用球面三角函数实现目标位置与侦测平台位置的关联，推导出基于测向、相位差变化率二维信息的目标位置观测方程，采用 UKF^[11]滤波处理方法，选择特殊的 $2M+1$ 个 Sigma 点，实现高阶非线性观测系统方程均值和方差的有效捕获，解决 EKF 跟踪精确度低且容易发散的问题。

1 定位模型设计与分析

机载平台侦察系统通过实时快速运动实现地面静止目标或慢速移动目标高精度定位跟踪。为实现目标位置的解算，需建立机载平台与目标位置关系的观测方程。首先建立机载平台坐标系，以载机平台中心为坐标圆心，坐标系 X 轴方向位于机身并指向机头方向，坐标系 Y 轴方向与机身垂直且指向机翼方向，坐标系 Z 轴垂直于 XOY 面且指向上，如图 1 所示。 E_a 、 E_b 为侦察测向天线单元，沿机身布设于机腹下方，由于实际安装过程中受机体结构、气动等因素制约， E_a 与 E_b 组成基线，与机身成一定的夹角，记为 α ，其目标电磁波信号来波方向与机身夹角为 β 。

假设干涉仪的 2 个天线阵元 E_a 、 E_b 接收的来波信息相位差为 ϕ_i ，目标在载机坐标系中的方向为 β_i ，可知干涉仪测量得到的相位差表达式^[12]为：

$$\phi_i = \omega_T \Delta t = \frac{2\pi d}{c} f_T \cos(\beta_i - \alpha) \quad (1)$$

式中： i 为不同采样时刻； ω_T 为信号角频率； f_T 为信号频率； α 为基线安装偏差角度。

对式(1)进行求导，因 α 为固定值，角度变化率为 0，则相位差变化率表达式为：

$$\dot{\phi}_i = -\frac{2\pi d}{c} f_T \sin(\beta_i - \alpha)(\dot{\beta}_i - \dot{\alpha}) = -\frac{2\pi d}{c} f_T \sin(\beta_i - \alpha)\dot{\beta}_i \quad (2)$$

由于目标侦收距离较远，采用球面三角函数表示目标信号的来波方位角，其基于球面三角函数的方位角^[13-14]表达式为：

$$\beta_i = \arctan \frac{\sin(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})}{\tan \varphi_{2i} \cos \varphi_{1i} - \sin \varphi_{1i} \cos(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})} \quad (3)$$

式中： λ_{2i} 、 φ_{2i} 为侦测平台不同时刻位置的经纬度信息； λ_{1i} 、 φ_{1i} 为目标位置经纬度信息。式(3)实现了超视距条件下目标位置和侦测平台位置的关联，降低了地球曲率引起的定位误差。

对式(3)进行求导，得到目标来波方向角度变化率的表达式：

$$\dot{\beta}_i = \frac{\dot{\lambda}_{1i} [-\cos(\lambda_{2i} - \lambda_{1i}) \tan \varphi_{2i} \cos \varphi_{1i} + \sin \varphi_{1i}] + \dot{\phi}_i \sin(\lambda_{2i} - \lambda_{1i}) [\tan \varphi_{2i} \sin \varphi_{1i} + \cos \varphi_{1i} \cos(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})]}{\sin^2(\lambda_{2i} - \lambda_{1i}) + [\tan \varphi_{2i} \cos \varphi_{1i} - \sin \varphi_{1i} \cos(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})]^2} \quad (4)$$

通过以上定位原理分析，完成基于球面三角函数观测测量表达式的理论推导，因此本定位模型可建立以角度和相位差变化率为观测量的观测方程。

由式(2)~(3)可知， β_i 、 $\dot{\phi}_i$ 分别为角度和相位差变化率观测变量，利用该观测测量得到测向和相位差变化率的观测方程：

$$Y_{1i} = g_1(X_i) + v_{1i} = \beta_i = \arctan \frac{\sin(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})}{\tan \varphi_{2i} \cos \varphi_{1i} - \sin \varphi_{1i} \cos(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})} + v_{1i} \quad (5)$$

$$Y_{2i} = g_2(X_i) + v_{2i} = \dot{\phi}_i = \frac{2\pi d}{c} f_T \cos \beta_i \times \dot{\beta}_i + v_{2i} \quad (6)$$

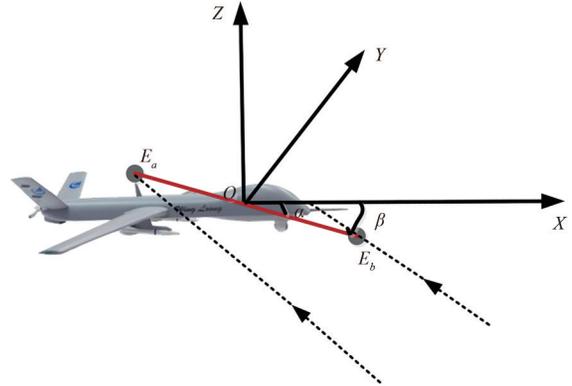


Fig.1 Schematic of airborne platform receiving electromagnetic waves of radiation source

图1 机载平台接收辐射源电磁波示意图

式中： λ_{1i} 、 φ_{1i} 为不同时刻估计目标经度和纬度； v_{1i} 和 v_{2i} 为侦测系统的测向和相位差变化率的测量误差，该测量误差为零均值的高斯白噪声，主要由干涉仪引起，其协方差矩阵记为 \mathbf{R}_v 。

对式(5)~(6)进行综合整理，得到以测向、相位差变化率为观测量的观测方程组^[15]，该观测方程组将侦测平台与目标建立关联，其表达式为：

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{H}(\mathbf{X}_i) + \mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} \beta_i \\ \dot{\phi}_i \end{bmatrix} + \mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} \arctan \frac{\sin(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})}{\tan \varphi_{2i} \cos \varphi_{1i} - \sin \varphi_{1i} \cos(\lambda_{2i} - \lambda_{1i})} \\ \frac{2\pi d}{c} f_T \cos \beta_i \times \dot{\beta}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{1i} \\ v_{2i} \end{bmatrix} \quad (7)$$

选取状态变量 $\mathbf{X}_i = [\lambda_{1i} \ \varphi_{1i}]^T$ ，建立如下状态方程：

$$\mathbf{X}_{i+1} = \begin{bmatrix} \lambda_{1(i+1)} \\ \varphi_{1(i+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{1i} \\ \varphi_{1i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta\varphi \end{bmatrix} = \Phi \mathbf{X}_i + \mathbf{B}\omega(i) \quad (8)$$

式中： $\omega(i) = [\Delta\lambda \ \Delta\varphi]^T$ 为目标的瞬时经纬度速度扰动噪声，且 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\varphi$ 均为零均值的高斯白噪声，其协方差矩阵记为 \mathbf{R}_ω 。由式(7)~(8)得到基于球面三角函数的定位模型，并利用 UKF 滤波算法估计出目标位置及运动速度等信息，该定位模式输出结果为目标经纬度信息。

2 UKF 定位滤波处理

在完成观测方程、目标状态方程推导后，通常需对实时观测测量进行更新，完成目标位置的非线性最优求解。对于非线性滤波问题的次优近似，有两大传统途径：a) 将非线性问题线性化，对高阶项采取忽略或逼近措施；b) 用采样方法近似非线性分布。由于本观测方程较复杂，且求导线性化处理后，误差较大，严重影响定位跟踪滤波处理精确度，为此采用 UKF 算法，选择特殊的 $2M+1$ (M 为变量的维数) 个 Sigma 点，通过非线性系统实现三阶随机变量均值和方差捕获，解决卡尔曼滤波复杂观测方程跟踪发散的问题。

无迹变换 (Unscented Transformation, UT) 是一种计算非线性变换中随机变量的数字特征方法，是 UKF 的基础，其基本原理是在原先状态分布中按某一规则取一些特殊的采样点，使这些点的均值和协方差等于原状态分布的均值和协方差，再将这些点代入非线性函数中，并利用得到的函数值点集求取变换后的均值和协方差。

将 UT 方法用于 Kalman 滤波算法，可得到 UKF 滤波算法。

初始化过程： $\hat{\mathbf{X}}_0 = E[\mathbf{X}_0]$ ， $\mathbf{P}_0 = E[(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)^T]$ ；

滤波过程：

1) 根据 UT 变化原理计算 $2M+1$ 个 Sigma 取样点。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_0(k-1) = \bar{\mathbf{X}}(k-1) \\ \mathbf{X}_i = \bar{\mathbf{X}} + (\sqrt{(M+\lambda)\mathbf{P}(k-1)})_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \\ \mathbf{X}_i = \bar{\mathbf{X}} - (\sqrt{(M+\lambda)\mathbf{P}(k-1)})_{i-M}, \quad i = M+1, M+2, \dots, 2M \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\pm(\sqrt{(M+\lambda)\mathbf{P}(k-1)})_i$ ， $i = 1, 2, \dots, 2M$ 表示平方根的第 i 列。

2) 利用状态方程传递取样点。

$$\chi_i(k|k-1) = F[\chi_i(k-1) \ \mathbf{u}_k], \quad i = 0, 1, \dots, 2M; k = 1, 2, \dots, \infty \text{ 表示采样时刻} \quad (10)$$

3) 利用预测取样点 $\chi_i(k|k-1)$ 和权值 \mathbf{W}_i ，计算预测均值 $\bar{\mathbf{X}}(k|k-1)$ 和预测协方差 $\mathbf{P}(k|k-1)$ 。

$$\bar{\mathbf{X}}(k|k-1) = \sum_{i=0}^{2M} \mathbf{W}_i^{(m)} \chi_i(k|k-1) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \sum_{i=0}^{2M} \mathbf{W}_i [\chi_i(k|k-1) - \bar{\mathbf{X}}(k|k-1)] [\chi_i(k|k-1) - \bar{\mathbf{X}}(k|k-1)]^T + \mathbf{R}_\omega \quad (12)$$

4) 利用 2) 所得结果预测测量取样点。

$$\mathbf{Y}_i(k|k-1) = H(\chi_i(k|k-1)), \quad i = 0, 1, \dots, 2M \quad (13)$$

5) 预测测量值和协方差。

$$\begin{cases} \bar{Y}(k|k-1) = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(m)} Y_i(k|k-1) \\ P_{YY} = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(o)} [Y_i(k|k-1) - \bar{Y}(k|k-1)][Y_i(k|k-1) - \bar{Y}(k|k-1)]^T + R_v \\ P_{XY} = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(o)} [X_i(k|k-1) - \bar{X}_i(k|k-1)][Y_i(k|k-1) - \bar{Y}_i(k|k-1)]^T \end{cases} \quad (14)$$

6) 计算 UKF 增益 $G(k)$, 更新状态向量 $\bar{X}(k)$ 和方差 $P(k)$ 。

$$\begin{cases} G(k) = P_{XY}(k) P_{YY}^{-1}(k) \\ \bar{X}(k) = \bar{X}(k|k-1) + G(k) [Y(k) - \bar{Y}(k|k-1)] \\ P(k) = P(k|k-1) - G(k) P_{YY}(k) G^T(k) \end{cases} \quad (15)$$

由 UKF 计算公式可知, 以上均值和方差的估计精确到非线性函数 Taylor 级数展开的二次项, 误差只由三次以上高阶项引起。

3 仿真试验验证及分析

为验证基于球面模型的单运动平台定位能力及性能指标, 开展远距离条件下定位仿真试验, 完成 2 种定位模型下定位精确度、定位收敛时间的仿真分析; 同时在球面定位模型下开展 UKF 和 MGEKF(Modified Gain Extended Kalman Filter)、EKF(Extended Kalman Filter) 三种滤波性能对比分析。仿真试验场景如图 2 所示, 辐射源目标距离侦察平台(400~600) km 范围, 侦察平台飞行速度为 800 km/h。

分别针对定位模型和滤波算法性能进行仿真试验。仿真试验条件: 无人机侦察平台运动速度为 800 km/h, 飞行高度为 18 000 m, 最远侦察范围为 550 km; 侦察平台测向精确度 1° , 相位差测量误差按正态分布考虑, 测量误差为 15° 。在距离目标 550 km、400 km 条件下, 针对球面坐标定位模型和平面直角坐标定位模型分别开展 UKF 定位滤波仿真试验。进行 2 000 次蒙特卡洛仿真试验, 统计处理得到 2 种定位模型条件下定位收敛曲线, 其仿真试验结果如图 3~图 4 所示。

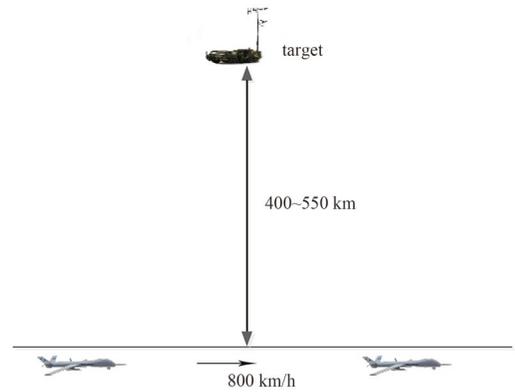


Fig.2 Positioning scene of simulation
图2 定位仿真试验场景

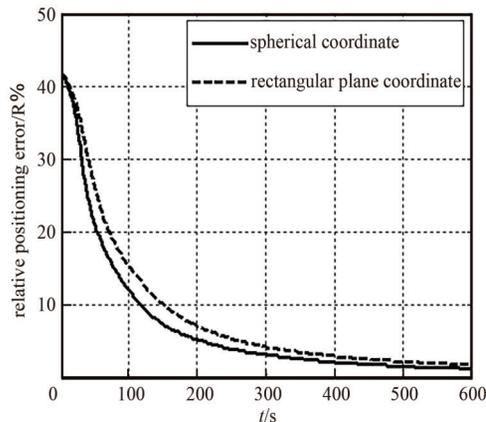


Fig.3 Location convergence curves of 550 km away from the target
图3 距离目标 550 km 定位收敛曲线

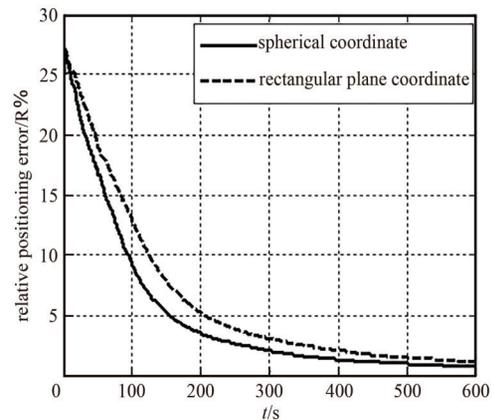


Fig.4 Location convergence curves of 400 km from the target
图4 距离目标 400 km 定位收敛曲线

图 3 为距离目标 550 km 定位收敛曲线, 在测向精确度为 1° 的条件下, 基于球面定位模型达到 5%R 定位精确度时, 收敛时间为 210 s; 基于平面直角坐标定位模型达到 5%R 定位精确度时, 收敛时间为 260 s。两种定位模型在 500 s 时, 定位均可收敛, 其中基于球面定位模型的定位精确度为 1.6%R, 基于平面直角坐标定位模型的定位

精确度为 $2.2\%R$ ，基于球面定位模型的定位精确度比基于平面直角坐标方程的定位精确度提高 $0.6\%R$ 。

图 4 为距离目标 400 km 定位收敛曲线，在测向精确度为 1° 的条件下，基于球面定位模型达到 $5\%R$ 定位精确度时，收敛时间为 155 s；基于平面直角坐标定位模型达到 $5\%R$ 时，定位精确度其收敛时间为 200 s。两种定位模型在 350 s 时，定位均达到收敛，其中基于球面定位模型的定位精确度为 $1.1\%R$ ，基于平面直角坐标定位模型的定位精确度为 $1.4\%R$ ，基于球面定位模型的定位精确度比基于平面直角坐标方程的定位精确度提高 $0.3\%R$ 。

对基于球面模型的 UKF、MGEKF、EKF 三种定位滤波算法性能进行仿真试验，试验条件同上，UKF 和 MGEKF、EKF 滤波算法性能仿真试验结果如图 5~图 6 所示。

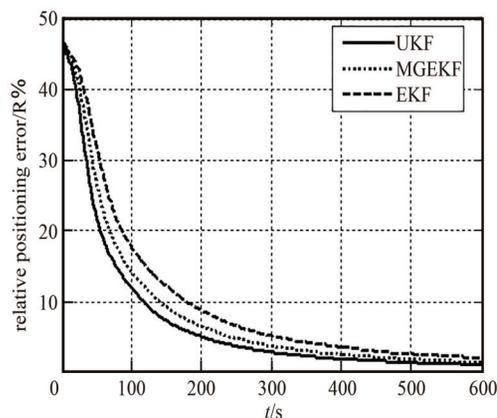


Fig.5 Comparison of three kinds of filtering performance at 550 km away from the target

图 5 距离目标 550 km 三种滤波性能对比

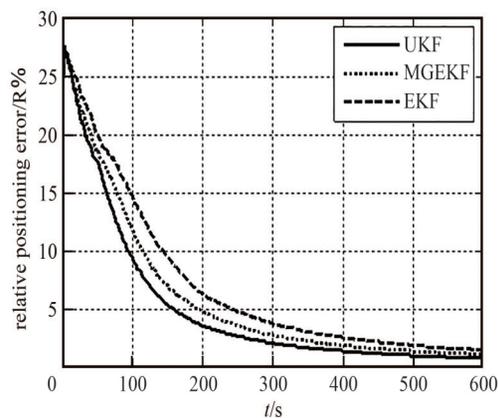


Fig.6 Comparison of three kinds of filtering performance at 400 km away from the target

图 6 距离目标 400 km 三种滤波性能对比

从图 5、图 6 仿真试验结果可以看出：UKF 和 MGEKF、EKF 三种滤波算法均能实现目标定位滤波处理和目标位置估计。距离目标 550 km 条件下，达到 $5\%R$ 定位精确度时，UKF 和 MGEKF、EKF 所需收敛时间分别为 210 s、245 s、300 s；距离目标 400 km 条件下，达到 $5\%R$ 定位精确度时，UKF 和 MGEKF、EKF 所需收敛时间分别为 155 s、190 s、240 s。通过对 3 种滤波算法性能比较，验证了 UKF 滤波算法具有较短的收敛时间和较高的定位精确度，证明 UKF 算法能够实现高阶误差捕获，更加精准实现目标信息更新迭代处理。

仿真试验中采用 UKF 滤波方法，由于 UKF 能够跟踪二阶以上的误差信息，具有更高的定位跟踪精确度，EKF 仅能精确到一次项误差信息。

从仿真试验的结果可确认本文所提出的基于球面模型定位模型有效性，相对于直角坐标模型具有更高的定位精确度，定位精确度提升 $0.3\%R\sim 0.6\%R$ 。同时本文所采用的基于 UKF 滤波处理算法，不需要对观测方程进行求导计算，降低了定位滤波处理算法的复杂度，易于工程实现。

4 结论

针对当前远距离目标侦测定位模型误差大的问题，本文提出了基于球面模型的单站无源定位方法。采用球面三角函数实现平面直角坐标方程到球面坐标方程的转换，实现观测量方程与目标位置信息的关联，得到基于球面模型的目标观测方程和状态方程；利用 UT 变换处理方法，通过选择特殊的 $2M+1$ (M 为变量的维数) 个 Sigma 点去捕获随机变量，实现观测方程的三阶随机变量均值和方差的跟踪，保证了复杂观测方程下目标高精度定位与跟踪性能。仿真试验结果表明 UKF 滤波处理方法能够实现复杂观测方程下目标的定位跟踪，具有较强的工程实用性和可扩展性。

参考文献：

- [1] 孙仲康,郭福成,冯道旺,等. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008:302-308. (SUN Zhongkang, GUO Fucheng, FENG Daowang, et al. Passive location and tracking technology by single observer[M]. Beijing: Publishing House of National Defence Industry, 2008:302-308.)
- [2] 马若飞,李辰梓,王超. 一种基于运动平台的单站无源定位算法研究与应用[J]. 火控雷达技术, 2022,51(4):42-46. (MA Ruofei, LI Chenzi, WANG Chao. Analysis and application on a single observer passive location algorithm based on moving platform[J]. Fire Control Radar Technology, 2022,51(4):42-46.) doi:10.19472/j.cnki.1008-8652.2022.04007.

- [3] 李明. 一种长基线阵列地面单站无源定位方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):569–572. (LI Ming. Passive location method to long baseline antenna array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):569–572.) doi:10.11805/TKYDA2021184.
- [4] 邢怀玺,吴华,陈游,等. 基于方位多假设的单基线干涉仪定位方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021,47(5):1049–1057. (XING Huaixi, WU Hua, CHEN You, et al. Single-baseline interferometer positioning method based on azimuth multiple hypothesis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021,47(5):1049–1057.)
- [5] 罗正华,廖钧华,蒋霓,等. 一种基于相位干涉仪的单站无源定位技术研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2020,39(3):286–291. (LUO Zhenghua, LIAO Junhua, JIANG Ni, et al. Design and research of single station passive location system based on phase interferometer[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science Edition), 2020,39(3):286–291.)
- [6] 韦卓. 基于单站干涉仪测向法的未知辐射源定位技术[J]. 舰船电子工程, 2022,2(7):159–161. (WEI Zhuo. Location technology of unknown radiation source based on single-station interferometer direction finding method[J]. Ship Electronic Engineering, 2022,2(7):159–161.) doi:10.3969/j.issn.1672–9730.2022.07.035.
- [7] 邢怀玺,吴华,陈游. LMS 预处理的相位差机载单站无源定位方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019,20(6):9–14. (XING Huaixi, WU Hua, CHEN You. A phase difference airborne single-station passive location method based on LMS preprocessing[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2019,20(6):9–14.)
- [8] 田明辉,马敏. 基于相位差的机载单站无源定位算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):190–194. (TIAN Minghui, MA Min. An algorithm research for air-borne single observer passive locating based on phase difference[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):190–194.) doi:10.11805/TKYDA201602.0190.
- [9] 徐满军,刘聪锋. 运动旋转基线单站无源定位 CRLB 分析[J]. 雷达科学与技术, 2019,17(1):77–82. (XU Manjun, LIU Congfeng. Single station passive location CRLB analysis in consideration of motion rotation baseline[J]. Radar Science and Technology, 2019,17(1):77–82.)
- [10] 余婉婷,于宏毅,杜剑平,等. 辐射源信号波形已知的超视距目标直接定位方法[J]. 电子学报, 2019,47(11):2368–2377. (YU Wanting, YU Hongyi, DU Jianping, et al. A direct position determination method for over-the-horizon target on known radiation source waveforms[J]. Acta Electronica Sinica, 2019,47(11):2368–2377.) doi:10.3969/j.issn.0372–2112.2019.11.019.
- [11] 王睿,黄清华,李世玲. 自适应 UKF 算法在 GNSS/INS 深组合系统中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):221–226. (WANG Rui, HUANG Qinghua, LI Shiling. Application of adaptive hybrid UKF algorithm in GNSS/INS deep integrated navigation system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2):221–226.) doi:10.11805/TKYDA201902.0221.
- [12] 张辉,陈赞. 固定辐射源目标单机无源定位方法[J]. 通信技术, 2021,54(3):575–579. (ZHANG Hui, CHEN Zan. Algorithm of passive location of airborne for communication station[J]. Communications Technology, 2021,54(3):575–579.) doi:10.3969/j.issn.1002–0802.2021.03.008.
- [13] 马方立,徐扬,徐鹏. 基于大地经纬度的二维 TDOA 无源定位[J]. 通信学报, 2019,40(5):136–143. (MA Fangli, XU Yang, XU Peng. 2D-TDOA passive location based on geodetic longitude and latitude[J]. Journal on Communications, 2019,40(5):136–143.) doi:CNKI:SUN:TXXB.0.2019–05–015.
- [14] 王铭三. 通信对抗原理[M]. 北京:解放军出版社, 1999:135–141. (WANG Mingsan. Principles of communication countermeasure [J]. Beijing, China: PLA Publishing House, 1999:135–141.)
- [15] 王海涛,张明,符渭波. 基于相位差变化率的直升机载无源定位技术[J]. 火控雷达技术, 2015,44(2):1–5. (WANG Haitao, ZHANG Ming, FU Weibo. Helicopter-borne passive location technique based on rate of phase difference change[J]. Fire Control Radar Technology, 2015,44(2):1–5.) doi:10.3969/j.issn.1008–8652.2015.02.001.

作者简介:

国辛纯(1980–), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无线自组网电台对抗、无源定位与跟踪、阵列天线波束赋形. email:xiaodou6664@sina.com.

胡亚(1972–), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星侦察对抗、电磁环境构建、无源定位跟踪.

杜宇峰(1981–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为超视距侦察、反无人机对抗、单双星定位.

赵乾宏(1976–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无源定位与跟踪、电子对抗侦察、高精度测向.

窦修全(1980–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无源定位与跟踪、阵列天线波束赋形、分布式侦察对抗.