

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220609005

一种融合时差频差和测向的运动目标跟踪方法*

徐海源, 苏成晓, 汪华兴

(北京市遥感信息研究所, 北京 100011)

摘要:传统的星载无源定位系统对空中辐射源定位求解通常采用假设高程的方法, 高程假设误差将对定位跟踪精度造成较大影响。为实现未知高程运动辐射源的高精度定位跟踪, 针对异轨三星构型的无源定位系统, 提出了一种基于时差、频差和二维测向融合的迭代扩展卡尔曼滤波(Iterative Extended Kalman Filter, IEKF)跟踪方法。在 WGS-84 坐标系下建立了状态方程和观测方程, 并采用 IEKF 方法对目标状态进行估计。仿真结果表明, 该方法可对未知高程的运动目标进行高精度状态估计, 典型仿真场景下的目标高程估计精度达到百米量级, 相对于已有方法收敛时间更短, 并且在卫星覆盖范围内具有更大的高精度定位跟踪区域。

关键词:星载无源定位; 目标跟踪; 迭代扩展卡尔曼滤波(IEKF)

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号: TN971 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2024)02-0261-05

A Moving Target Tracking Method Based on Fusion of TDOA/FDOA/DOA

XU Haiyuan, SU Chengxiao, WANG Huaxing

(Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100011, China)

Abstract: In the traditional satellite-borne passive location system, the assumed height is usually used to locate the airborne emitter, and the height assumption error will have a great impact on the positioning and tracking accuracy. In order to realize high-precision positioning and tracking of moving emitter with unknown height, a tracking method in the passive location system composed of three satellites in different orbits is proposed, which integrates time difference of arrival (TDOA), frequency difference of arrival (FDOA) and two-dimensional direction finding information. Firstly, the state equation and observation equation are established in WGS-84 coordinate system, and then the Iterative Extended Kalman Filter (IEKF) is used to estimate the target state. Simulation results show that this method can perform high-precision state estimation for moving targets with unknown height. The accuracy of target height estimation in typical simulation scenarios can reach the order of hundreds of meters. Compared with the existing methods, the proposed method has shorter convergence time and larger high-precision tracking area.

Key words: satellite-borne passive location; target tracking; iterative extended Kalman filter(IEKF)

0 引言

星载无源定位系统通过侦收地球表面或具有一定高程的雷达、通信等辐射源的辐射信号, 采用单星或多星定位体制获取辐射源的位置信息。其中, 由星座构成的无源定位系统具有覆盖面积大、定位精

度高的优点, 通过建立时差、频差等参数测量方程, 结合地球表面约束方程可以实现已知高程辐射源的高精度定位^[1-3]。对于运动辐射源, 无源定位系统需要估计其每一时刻的位置, 并进一步得到速度信息, 即实现目标的跟踪。对于未知高程的空中运动

* 收稿日期: 2022-06-09; 修回日期: 2022-07-28
通信作者: 徐海源 Email: haiyuan_xu@163.com

目标的无源定位跟踪,假设高程的定位方法将带来较大的跟踪误差。

目前,已有相关文献研究了基于星座体制无源定位系统的空中运动目标的定位跟踪问题。文献[4]在三星时差定位系统中增加一维干涉仪测方位角信息实现未知高程目标的定位,并通过无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)提高定位精度,但垂直于主星飞行方向存在不可观测区域。文献[5]提出了假定高程下的三星时差、频差运动辐射源定位和测速求解方法,但在高程估计误差较大时将导致定位误差和测速误差增大。文献[6]研究了双星时差、频差融合二维角度信息的运动目标跟踪方法,但仍假设目标高程为已知量参与跟踪滤波。文献[7]采用主星高精度测向和双星时差联合实现空中目标高精度定位,但需要较高的测向精度,传统的干涉仪测向系统难以满足要求。文献[8]提出了一种三星时差、频差融合一维干涉仪测向信息的改进迭代卡尔曼滤波目标跟踪方法,能够提高未知高程目标的位置、速度估计性能,但更适合三星同轨编队的应用场景,并且也存在不可观测区域。

针对由3颗卫星构成的无源定位系统,采用异轨三角形构型能够获得更高的时差定位精度分布^[9];若采用同轨编队构型,将导致星下点附近存在不可观测区域,对地球表面已知高程的固定或慢速目标的定位性能带来较大损失。因此,在异轨编队三星时差、频差定位系统基础上,本文提出在其中一颗卫星上增加二维干涉仪测向信息,然后采用迭代扩展卡尔曼滤波(Iterative Extended Kalman Filter, IEKF)方法实现未知高程运动目标的跟踪滤波。

1 三星时差、频差和二维测向融合跟踪模型

本文考虑的无源定位系统由异轨三星构成,假设一颗卫星上安装二维干涉仪,并且与另外两颗星之间可测得辐射源信号到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)和多普勒频差(Frequency Difference of Arrival, FDOA)。在目标定位跟踪中,一般采用WGS-84坐标系描述目标的状态,因此本文在WGS-84坐标系下建立未知高程运动目标跟踪的状态方程和观测方程。

1.1 状态方程

考虑空中目标运动模型为匀速模型(Constant Velocity, CV),定义 k 时刻的状态量为WGS-84坐标系下的目标位置及速度,即 $\mathbf{X}_k =$

$[x_k \ y_k \ z_k \ v_{xk} \ v_{yk} \ v_{zk}]^T$,则状态方程

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)中: \mathbf{A} 为状态转移矩阵; \mathbf{w}_{k-1} 为过程噪声,其均值为0;协方差矩阵为 \mathbf{Q}_{k-1} ; Δt 为观测时间间隔。

对于CV模型,状态噪声协方差 \mathbf{Q}_{k-1} 表示为^[10]

$$\mathbf{Q}_{k-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}(\Delta t)^4 \mathbf{I}_3 & \frac{1}{2}(\Delta t)^3 \mathbf{I}_3 \\ \frac{1}{2}(\Delta t)^3 \mathbf{I}_3 & (\Delta t)^2 \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \sigma_v^2 \quad (3)$$

式中: \mathbf{I}_3 为三维单位阵; σ_v^2 为速度在各方向的随机误差的方差。

1.2 观测方程

在干涉仪测向系统中,原始观测量为相位差 φ ,通过式(4)可以得到角度测量值 β :

$$\beta = \arccos \frac{\varphi}{2\pi n} \quad (4)$$

式中: $n = d/\lambda$, d 为干涉仪基线长度, λ 为信号波长。

由式(4)可以看出,角度与相位差呈现非线性关系,因此角度测量误差随着角度变化而发生变化。而干涉仪相位差测量误差在地面可以准确测量,且不随目标所在的方向而变化,因此本文将干涉仪相位差作为观测量。假设星体坐标系下辐射源的位置为 (x_b, y_b, z_b) ,则方位、俯仰向的相位差 φ_A 和 φ_B 可表示为

$$\begin{cases} \varphi_A = 2\pi n \frac{x_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2}} \\ \varphi_B = 2\pi n \frac{y_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2}} \end{cases} \quad (5)$$

记星体坐标系相对WGS-84系的旋转矩阵为 \mathbf{M} ,其推导过程参见文献[8]。WGS-84坐标系下卫星位置为 (x_s, y_s, z_s) ,辐射源位置为 (x, y, z) ,由于

$[x_b \ y_b \ z_b]^T = \mathbf{M} \cdot [x - x_s \ y - y_s \ z - z_s]^T$,则

$$\begin{cases} x_b = m_{11}(x - x_s) + m_{12}(y - y_s) + m_{13}(z - z_s) \\ y_b = m_{21}(x - x_s) + m_{22}(y - y_s) + m_{23}(z - z_s) \\ \sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2} = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: m_{ij} 为坐标旋转矩阵 \mathbf{M} 中的元素。于是,

式(5)可表示为

$$\begin{cases} \varphi_A = 2\pi n \frac{m_{11}(x-x_s) + m_{12}(y-y_s) + m_{13}(z-z_s)}{\sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2}} \\ \varphi_B = 2\pi n \frac{m_{21}(x-x_s) + m_{22}(y-y_s) + m_{23}(z-z_s)}{\sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2}} \end{cases} \quad (7)$$

假设 $t_{10,k}$ 和 $t_{20,k}$ 为卫星 1、卫星 2 与卫星 0 侦收到同一信号的时差, $f_{d10,k}$ 和 $f_{d20,k}$ 为卫星 1、卫星 2 与卫星 0 侦收到同一信号的多普勒频差, 二维干涉仪安装于卫星 0, φ_{Ak} 和 φ_{Bk} 为方位、俯仰向的相位差, 于是, 定义观测量为 $\mathbf{Z}_k = [t_{10,k} \ t_{20,k} \ f_{d10,k} \ f_{d20,k} \ \varphi_{Ak} \ \varphi_{Bk}]^T$, 则得到观测方程为

$$\mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{v}_k =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{c}(r_{1,k} - r_{0,k}) \\ \frac{1}{c}(r_{2,k} - r_{0,k}) \\ \frac{f_c}{c} \begin{pmatrix} u_{1,k} & u_{0,k} \\ r_{1,k} & r_{0,k} \end{pmatrix} \\ \frac{f_c}{c} \begin{pmatrix} u_{2,k} & u_{0,k} \\ r_{2,k} & r_{0,k} \end{pmatrix} \\ 2\pi n \frac{m_{11}(x_k - x_{0,k}) + m_{12}(y_k - y_{0,k}) + m_{13}(z_k - z_{0,k})}{\sqrt{(x_k - x_{0,k})^2 + (y_k - y_{0,k})^2 + (z_k - z_{0,k})^2}} \\ 2\pi n \frac{m_{21}(x_k - x_{0,k}) + m_{22}(y_k - y_{0,k}) + m_{23}(z_k - z_{0,k})}{\sqrt{(x_k - x_{0,k})^2 + (y_k - y_{0,k})^2 + (z_k - z_{0,k})^2}} \end{bmatrix} + \mathbf{v}_k \quad (8)$$

$$r_{i,k} = \sqrt{(x_k - x_{i,k})^2 + (y_k - y_{i,k})^2 + (z_k - z_{i,k})^2}$$

$$u_{i,k} = (x_{i,k} - x_k)(v_{xi,k} - v_{x,k}) + (y_{i,k} - y_k)(v_{yi,k} - v_{y,k}) + (z_{i,k} - z_k)(v_{zi,k} - v_{z,k})$$

式(8)中: \mathbf{v}_k 为均值为 0、协方差矩阵为 \mathbf{R}_k 的高斯白噪声; $(x_{i,k}, y_{i,k}, z_{i,k})$ 和 $(v_{xi,k}, v_{yi,k}, v_{zi,k})$ 分别为 WGS-84 坐标系下的卫星位置、卫星速度, $i = 0, 1, 2$; (x_k, y_k, z_k) 和 $(v_{x,k}, v_{y,k}, v_{z,k})$ 分别为 WGS-84 坐标系下辐射源的位置、速度; f_c 为信号载频。则观测方程噪声协方差 $\mathbf{R}_k = \text{diag}(\sigma_t^2, \sigma_t^2, \sigma_f^2, \sigma_f^2, \sigma_\varphi^2, \sigma_\varphi^2)$, σ_t^2 , σ_f^2 , σ_φ^2 分别为时差、频差、相位差测量误差的方差。

2 IEKF 跟踪算法

由于观测方程为非线性方程, 需要采用非线性滤波方法提高对运动目标位置和速度的估计精度。扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)算法

通过对非线性方程做线性化截断处理, 并只保留一阶泰勒级数的展开项, 以达到线性化的目的, 是一种次优非线性滤波算法。迭代扩展卡尔曼滤波算法通过多次计算量测更新环节, 即反复地去线性化量测方程, 并根据量测值修正估计值, 以逐渐减小估计误差, 从而提升滤波精度^[11]。本节采用 IEKF 算法基于上节建立的状态方程和观测方程进行空中运动目标的跟踪滤波。

2.1 滤波初始化

1) 目标状态初始值

对于目标初始位置的估计, 通过假定目标高程, 采用已知高程的三星时差定位求解方法得到目标初始位置 (x_0, y_0, z_0) 。目标初始速度设置为 $(0, 0, 0)$, 即目标状态的初始值为 $\mathbf{X}_{0/0} = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

2) 初始预测协方差矩阵

基于时差测量误差、高程假设误差、卫星位置测量误差等信息, 可以计算得到对初始点三星时差定位的定位协方差矩阵 \mathbf{P}_1 ^[1]。假定目标可能的最大航速为 v_{\max} , 记 $\mathbf{P}_2 = \text{diag}(v_{\max}^2, v_{\max}^2, v_{\max}^2)$ 。设置初始预测协方差矩阵 $\mathbf{P}_{0/0} = \text{diag}(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)$ 。

2.2 IEKF 跟踪算法步骤

由于观测量中相位差的直接测量值会出现模糊, 在实际应用中需要首先去除相位差模糊。采用 IEKF 跟踪算法的步骤如下:

1) 计算三星时差定位结果

利用上一时刻跟踪滤波结果, 得到目标高度估计值 \hat{H} , 利用已知高程的三星时差定位算法求解出目标位置估计值 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 。

2) 得到无模糊相位差

针对二维相位干涉仪, 可以采用长短基线结合解模糊或基于模糊相位差的多假设非线性最小二乘法解模糊; 同时, 利用卫星 0 的位置、速度参数和目标位置估计值 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$, 计算出干涉仪的二维相位差估计值, 辅助解模糊。综合上述信息, 得到观测量中的相位差修正值 $\Delta\varphi_A = m_1 \cdot (2\pi)$ 和 $\Delta\varphi_B = m_2 \cdot (2\pi)$, 进一步得到无模糊的相位差测量值 φ_{Ak} 和 φ_{Bk} 。

3) 目标状态和协方差矩阵预测

$$\mathbf{X}_{k/k-1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1/k-1}$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1/k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_k$$

4) 设置迭代初值

$$\mathbf{X}^0 = \mathbf{X}_{k/k-1}$$

$$\mathbf{P}^0 = \mathbf{P}_{k/k-1}$$

5) 开始迭代

①计算观测方程在预测点处的雅可比矩阵

$$H^j = \frac{\partial h(X)}{\partial X} \Big|_{X=X^j}$$

②计算卡尔曼增益矩阵

$$K^j = P^0 (H^j)^T [R + H^j P^0 (H^j)^T]^{-1}$$

③更新目标状态

$$X^{j+1} = X^0 + K^j [Z_k - h(X^j) - H^j (X^0 - X^j)]$$

④更新协方差矩阵

$$P^{j+1} = P^0 - K^j H^j P^0$$

当达到设定迭代次数或条件时终止迭代, 本文采用 $\|X^{j+1} - X^j\| \leq \varepsilon$ 作为迭代终止条件, ε 为设定的门限值。

6) 更新目标状态和协方差矩阵

$$X_{k/k} = X^N$$

$$P_{k/k} = P^N$$

3 仿真分析

为验证提出的三星时差、频差和二维测向融合的空运动目标跟踪方法的有效性, 建立典型场景进行了仿真分析。3 颗卫星采用双星同轨、一星异轨的构型, 卫星轨道高度均为 700 km, 星间距 80 km, 其中异轨卫星上安装二维正交干涉仪, 基线长度 3 m; 目标高程为 10 km, 作速度为 300 m/s 的匀速直线运动; 目标辐射源频率为 3 GHz。时差测量误差为 20 ns, 频差测量误差为 1 Hz, 相位差测量误差为 15°。观测时间间隔为 1 s, 图 1 给出了跟踪时长为 150 s 后的定位误差(含高程误差)几何精度因子(Geometric Dilution of Precision, GDOP)分布仿真结果, 单位为 km; 其中, 目标高度误差 GDOP 分布仿真结果如图 2 所示, 单位为 km。从图 1 中可以看出, 对存在高程的空中运动目标, 在三星异轨构型下, 采用本文所提的方法跟踪滤波后能在较大的范围内达到较高的定位精度, 这与同轨三星的目标跟踪方法在星下点附近存在不可观测区域是不同的^[4,8]。由于三星时差频差定位系统对地球表面目标的定位误差分布与星座构型密切相关, 采用三星异轨形成近似三角形构型能够在更大的范围内实现较高的目标定位精度。因此, 本文提出的在异轨三星中的一颗星上增加正交干涉仪, 通过时差、频差融合相位差的 IEKF 跟踪算法, 可以提升三星时差频差定位系统对空中运动目标的定位跟踪能力, 同时也保证了其对地球表面大范围固定目标和慢速目标

的定位能力。从图 2 中可以看出, 对目标高度的估计误差在较大范围内可以达到百米量级, 表明所提方法能够有效估计未知运动目标的高度信息。

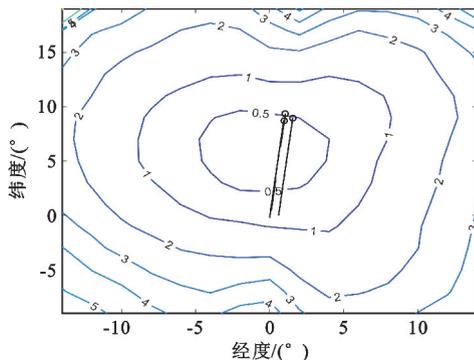


图 1 定位误差 GDOP 分布
Fig. 1 GDOP of positioning

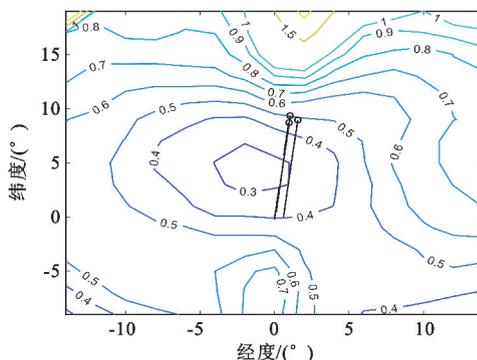


图 2 高度误差 GDOP 分布
Fig. 2 GDOP of height

在三星覆盖区域内选取一个目标位置, 按照上述目标运动参数和观测量误差对采用不同观测量的 IEKF 跟踪滤波方法的性能进行仿真比较。针对三星时差频差+一维测向、三星时差+一维测向和本文三星时差频差+二维测向等 3 种方法, 分别进行了 100 次蒙特卡罗仿真, 对目标位置、高度、航速和航向估计误差进行了比较, 结果如图 3~6 所示。

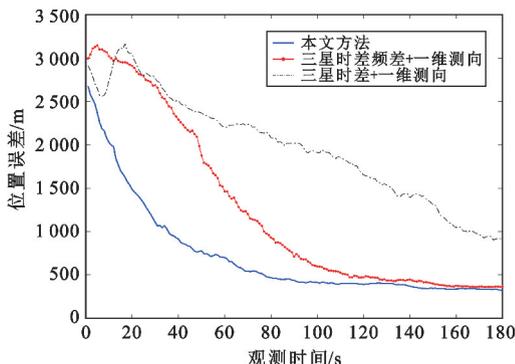


图 3 位置估计误差
Fig. 3 The curves of position estimation error

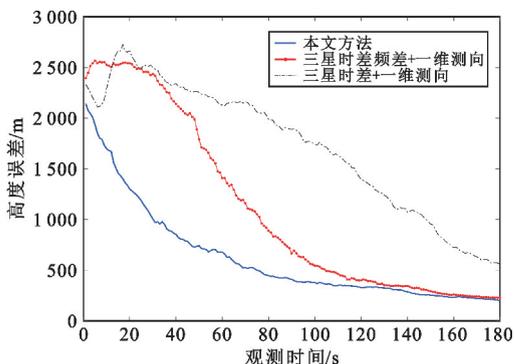


图 4 高度估计误差

Fig. 4 The curves of height estimation error

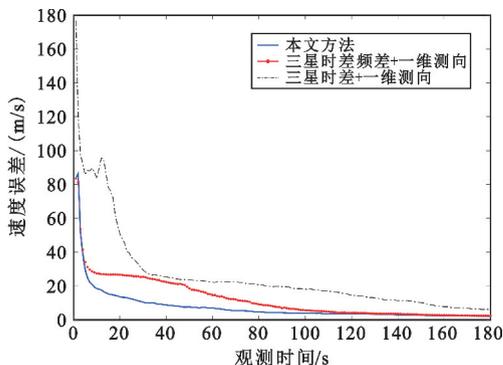


图 5 速度估计误差

Fig. 5 The curves of speed estimation error

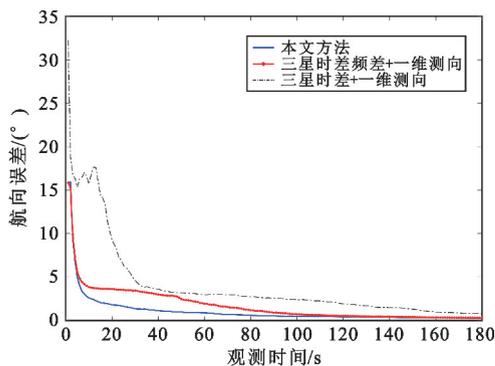


图 6 航向估计误差

Fig. 6 The curves of course estimation error

从图中可以看出,3种方法均可以实现未知高程目标的跟踪定位,但三星时差+一维测向的跟踪方法估计误差最大,收敛速度较慢;三星时差频差+一维测向的跟踪方法由于引入频差测量信息,在位置、速度估计精度方面有大幅提高;而本文的三星时差频差+二维测向跟踪方法通过增加一维测向信息,位置(含高度信息)、速度估计精度均进一步提高,且收敛速度更快。

4 结论

本文针对星载无源定位系统对未知高程运动目标的定位跟踪问题,提出了一种基于异轨三星时差频差和二维测向融合的跟踪滤波方法。在 WGS-84 坐标系下建立了由二维时差、二维频差和二维相位差构成的观测方程,并采用 IEKF 方法进行跟踪滤波。仿真结果表明,本文所提的目标跟踪方法在目标高程未知的情况下,能够实现运动目标位置、高度、航速和航向的高精度估计,相对已有方法在收敛速度和估计精度上有明显提高,并且可以获得更大范围的高精度定位跟踪结果。

参考文献:

- [1] 钟丹星, 邓新蒲, 周一宇. 基于 WGS-84 椭球模型的卫星测时差定位精度分析[J]. 电子对抗技术, 2002, 17(5): 18-21.
- [2] 郭福成, 樊昀. 双星时差频差联合定位方法及其误差分析[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1381-1386.
- [3] 徐海源, 吕守业, 韩涛. 三星多普勒频差无源定位方法及定位精度分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1832-1837.
- [4] 程小震, 唐宏, 王元利, 等. 高精度测向辅助的三星时差定位算法[J]. 电子信息对抗技术, 2010, 25(11): 11-16.
- [5] 张宇阳. 利用三星时频差的运动辐射源定位与测速方法[J]. 电讯技术, 2016, 56(6): 640-645.
- [6] 向张俊, 郭福成, 张敏, 等. 基于时差频差角度的低轨双星动目标融合跟踪方法[J]. 航天电子对抗, 2016, 32(3): 27-31.
- [7] 朱建丰, 何新生, 郝本建. 基于双星 TDOA 和主星 DOA 的空中动目标联合定位技术[J]. 电子学报, 2018, 46(6): 1378-1383.
- [8] 曲志昱, 王超然, 孙萌. 基于改进迭代扩展卡尔曼滤波的 3 星时频差测向融合动目标跟踪方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2871-2877.
- [9] 王海丽, 任萱, 陈磊. 三星时差定位星座的定位精度分析[J]. 中国空间科学技术, 2000(5): 24-29.
- [10] 石章松, 刘志坤, 吴中红. 目标定位跟踪方法与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [11] BELL B M, CATHEY F W. The iterated Kalman filter updated as a Gauss-Newton method[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(2): 294-297.

作者简介:

徐海源 男, 1979 年生于辽宁清原, 2007 年获博士学位, 现为副研究员, 主要研究方向为卫星应用技术。

苏成晓 男, 1985 年生于河南舞钢, 2013 年获博士学位, 现为副研究员, 主要研究方向为卫星应用技术。

汪华兴 男, 1988 年生于江西井冈山, 2011 年获硕士学位, 现为助理研究员, 主要研究方向为卫星应用技术。