

基于角度信息测量的无源跟踪算法研究

乔 梁

(广东金融学院 计算机系, 广东 广州 510520)

摘 要: 针对只测向单站无源定位中推广卡尔曼滤波(EKF)算法受初值、测量噪声影响大以及算法具有不稳定性等缺点,提出了增加方位角和俯仰角角速度观测信息,运用修正协方差的扩展卡尔曼滤波(MVEKF)算法对机动目标进行无源定位的新方法.该方法能够进一步提高系统的定位与跟踪精确度、可靠性和防御作战能力,滤波性能更好.通过计算机仿真,验证了该方法的正确性与有效性.

关键词: 单站无源跟踪; 空域信息; 方位角和俯仰角变化率

中图分类号: TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)04-0064-04

Research of Passive Tracking Arithmetic Based on Spatial Information Measurement

QIAO Liang

(Department of Computer, Guangdong University of Finance, Guangzhou 510520, China)

Abstract: According to the erratic filter behavior of traditional extended Kalman filter (EKF) of bearing only algorithm in passive emitter location, in this paper, we introduced a new tracking algorithm of moving emitter, which added angle velocity measurement information on the basis of bearing measurement. And a new filtering method called Modified covariance EKF (MVEKF) is put forward in this algorithm. This method improves the location and tracking accuracy, reliability and defensive operational capability of the system and solves the problem of passive location better. With the help of computer simulation, the method is proven to be correct and effective.

Key words: single station passive tracking; spatial information; azimuth and elevation angle changing rate

0 引 言

以往研究比较多的是传统的只测向(bearing only)定位算法.由于固定单站对运动辐射源定位跟踪时除了测量角度外必须增加新的观测信息,否则无法满足可观测条件^[1-2].这使它的应用受到很大的限制.另一方面,由于定位系统的测量方程在直角

坐标系中是非线性的,而对非线性方程滤波最经典的算法是扩展卡尔曼滤波(extended kalman filter, EKF),在传统EKF滤波算法中,由于非线性方程的线性化舍弃了二阶以上的高次项,导致滤波定位结果不稳定.文[3-4]分别提出了将加权最小二乘估计与卡尔曼滤波相结合的无源定位方法和对机动目标无源定位IMM算法,用不同的方式研究了无源定位问题.但是概括来讲,它们各有自己的适用范围和

收稿日期: 2010-10-09

基金项目: 总装备部基金资助项目(5140104C703CB0102)

作者简介: 乔 梁(1961—),男,博士,高级工程师, E-mail: eiylw2009@163.com.

局限性. 文 [6] 指出, 如果每一个观测时刻观测器不但观测到目标辐射源相对于观测器的方位角、俯仰角, 还可以通过无线电、红外或其它手段测量到它们的变化率, 这时就能够对空间中的运动辐射源进行单站无源快速定位. 文 [6] 针对卡尔曼滤波的缺点, 研究了修正协方差扩展卡尔曼滤波算法. 根据国内外近年来研究的启示 [7-8], 本文提出了一种利用方位角和俯仰角及其变化率信息, 采用修正协方差扩展卡尔曼滤波算法对运动辐射源进行单站无源定位的新方法, 由于它在只测向定位算法的基础上增加了方位角和俯仰角变化率信息, 因此它比只测向定位算法的收敛速度更快, 同时还克服了 EKF 算法的缺点. 通过计算机仿真证明了这一点.

1 系统数学模型的建立

1.1 系统状态方程

在三维直角坐标系中, 设观测器和目标的相对运动状态变量为 $X_k = [x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k]^T$, 假设观测器 O 在三维空间里作机动运动, 第 k 个观测时刻的加速度为 $U_{Ok} = [a_{Oxk}, a_{Oyk}, a_{Ozk}]^T$. 设目标作匀速直线运动, 可得目标相对于观测器的相对运动状态方程为

$$X_{k+1} = X_{T_k+1} - X_{O,k+1} = FX_k - BU_{Ok} \quad (1)$$

$$\text{式中: 状态转移矩阵 } F = \begin{bmatrix} I_3 & T_s I_3 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{T_s^2}{2} I_3 \\ T_s I_3 \end{bmatrix}$$

其中: I_3 为 3 阶单位阵; T_s 为测量周期.

1.2 系统测量方程

方位角和俯仰角及其变化率是常用的无源定位观测量, 由方位角和俯仰角及其变化率的定义, 得到测量方程:

$$\left. \begin{aligned} \beta_k &= \arctan\left(\frac{x_k}{y_k}\right) + \delta_{\beta k} \\ \varepsilon_k &= \arctan\left[\frac{z_k}{(x_k^2 + y_k^2)^{1/2}}\right] + \delta_{\varepsilon k} \\ \dot{\beta}_k &= \frac{\dot{x}_k y_k - \dot{y}_k x_k}{x_k^2 + y_k^2} + \delta_{\dot{\beta} k} \\ \dot{\varepsilon}_k &= \frac{-z_k x_k \dot{x}_k - z_k y_k \dot{y}_k + (x_k^2 + y_k^2) \dot{z}_k}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)(x_k^2 + y_k^2)^{1/2}} + \delta_{\dot{\varepsilon} k} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: $\delta_{\beta k}$ 、 $\delta_{\varepsilon k}$ 、 $\delta_{\dot{\beta} k}$ 、 $\delta_{\dot{\varepsilon} k}$ 分别为方位角、俯仰角、方位角变化率及俯仰角变化率的测量噪声.

1.3 扩展线性化定位模型

由 β 、 ε 、 $\dot{\beta}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 的定义:

$$\beta_k = \arctan \frac{x_k}{y_k} \triangleq g_1(X_k)$$

$$\dot{\beta}_k = \frac{\dot{x}_k y_k - \dot{y}_k x_k}{x_k^2 + y_k^2} \triangleq g_2(X_k)$$

$$\varepsilon_k = \arctan \frac{z_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \triangleq g_3(X_k)$$

$$\dot{\varepsilon}_k = \frac{-z_k x_k \dot{x}_k - z_k y_k \dot{y}_k + (x_k^2 + y_k^2) \dot{z}_k}{(x_k^2 + y_k^2 + z_k^2)(x_k^2 + y_k^2)^{1/2}} \triangleq g_4(X_k)$$

$$\text{设 } Z'_{1mk} = \begin{bmatrix} \beta_{mk} \\ \dot{\beta}_{mk} \\ \varepsilon_{mk} \\ \dot{\varepsilon}_{mk} \end{bmatrix}, G(X_k) = \begin{bmatrix} g_1(X_k) \\ g_2(X_k) \\ g_3(X_k) \\ g_4(X_k) \end{bmatrix}, N'_{1k} = \begin{bmatrix} \delta_{\beta k} \\ \delta_{\dot{\beta} k} \\ \delta_{\varepsilon k} \\ \delta_{\dot{\varepsilon} k} \end{bmatrix}$$

其中 N'_{1k} 为角度及其变化率的测量误差.

则可以得到测量方程:

$$Z'_{1mk} = G(X_k) + N'_{1k} \quad (3)$$

将函数 $G(X_k)$ 在某一个估计点 $\hat{X}_{Tk}$ 进行泰勒展开:

$$Z'_{1mk} = G(X_k) + N'_{1k} = G(\hat{X}_k) + H_k^-(X_k - \hat{X}_k) + \text{H. O. T.} + N'_{1k} \quad (4)$$

其中: H. O. T. 为高次项; H_k^- 为 Jacobi 矩阵.

由 $X_k = X_{Tk} - X_{Ok}$, $\hat{X}_k = \hat{X}_{Tk} - X_{Omk}$ 代入上式整理并忽略高次项得到

$$Z'_{1mk} - G(\hat{X}_k) + H_k^- \hat{X}_{Tk} = H_k^- X_{Tk} - H_k^-(X_{Ok} - X_{Omk}) + N'_{1k} \quad (5)$$

则得到扩展线性化测量模型:

$$Z_{1mk} = H_k^- X_{Tk} + N_{1k} \quad (6)$$

2 MVEKF(修正协方差扩展卡尔曼滤波) 算法

MVEKF 的基本思想是在 EKF 方程中计算出状态滤波值 $\hat{X}_{k|k}$ 之后, 采用状态滤波值 $\hat{X}_{k|k}$ 重新计算 Jacobi 矩阵 $H_k^+ = \frac{\partial G(X)}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}_{k|k}}$ 对协方差矩阵进行更新, 从而得到更加准确的协方差矩阵, 使得: $H_k^+ \cdot P_k^+ \approx 0$

MVEKF 算法程序框图如图 1 所示.

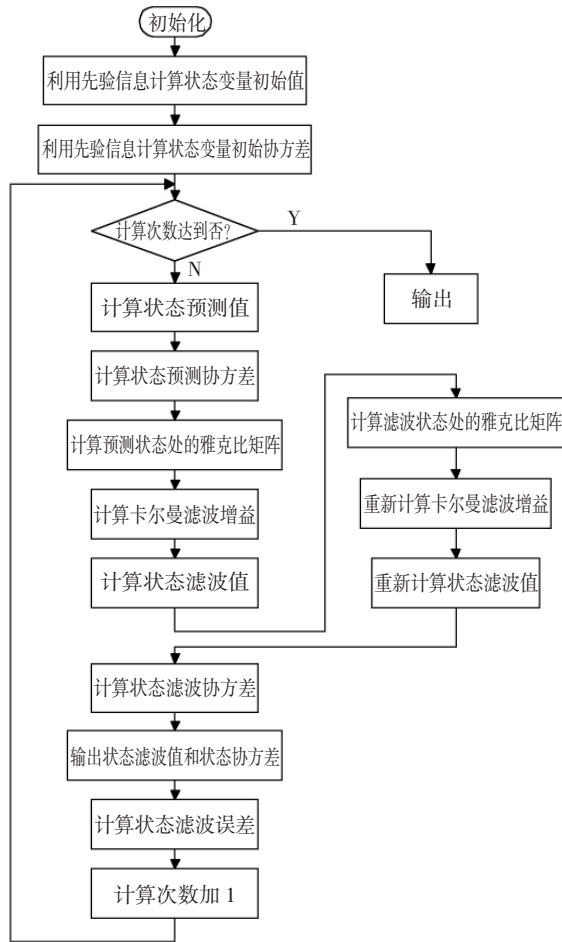


图1 MVEKF 算法程序框图

3 计算机仿真

为验证这种定位算法的性能和有效性,对一种典型的机动目标航迹进行了计算机模拟.本仿真算例的设计参考了文[5-8].

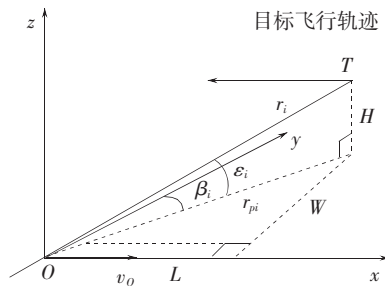


图2 观测器和运动辐射源的几何运动关系

3.1 仿真

选择不同观测参数 A (子集 1): $\{\beta, \varepsilon\}$ 、 B (子集 2): $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}\}$ 、 C (子集 3): $\{\beta, \varepsilon, \dot{\varepsilon}\}$ 、 D (子集 4): $\{\beta, \varepsilon, \dot{\beta}, \dot{\varepsilon}\}$ 4 种情况下的对运动辐射源单站无源定

位性能比较.

假设观测器和运动辐射源的几何运动关系如图 2 所示,目标辐射源 T 处于巡航状态作匀速直线运动,观测器从原点开始运动,起始速度为 v_0 .

试验条件: $W = 200 \text{ km}$, $L = 100 \text{ km}$, $H = 5 \text{ km}$, $v_T = 250 \text{ m/s}$, $T = 200 \text{ s}$, $T_s = 1 \text{ s}$, $\sigma_{\dot{\beta}} = \sigma_{\dot{\varepsilon}} = 0.1 \text{ mrad/s}$, $\sigma_{x_0} = \sigma_{y_0} = 15 \text{ m}$, $\sigma_{v_x} = \sigma_{v_y} = 0.1 \text{ m/s}$, $\sigma_{\beta} = \sigma_{\varepsilon} = 5 \text{ mrad}$, $250 \text{ m/s} \leq v_0 \leq 400 \text{ m/s}$, $a_0 = \pm 0.5 \text{ g}$.

采用修正协方差扩展 Kalman 滤波(MVEKF)方法,可以得到图 3 所示的 4 种选择不同观测参数情况下的相对定位误差曲线.

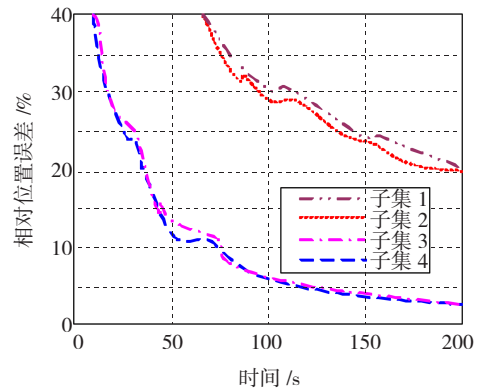


图3 相对定位误差曲线

由图 3 可见,定位跟踪误差曲线从收敛速度上可以分为两类,第一类为 A、C 曲线,两者基本差不多, C 曲线收敛误差比 A 曲线收敛误差略好. 另一类为 B、D 曲线,两者也基本差不多. 但是在收敛到同样的定位误差条件下,第一类的 A、C 曲线比第二类的 B、D 曲线需要的时间大约长 2 ~ 3 倍甚至还要多.

3.2 EKF 算法和 MVEKF 算法的性能比较

仿真条件: 辐射源脉冲周期 $T_r = 1 \text{ ms}$, 采样脉冲数 $N = 1000$. 观察时间: $T = 200 \text{ s}$. 观测站位于坐标原点, 观测量为 β_k, ε_k 和 $\dot{\beta}_k$, 辐射源运动状态:

$$[x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k]^T =$$

$$[100\text{km}, 100\text{km}, 50\text{km}, -500\text{m/s}, 0\text{m/s}, 0\text{m/s}]^T$$

观测站对角度和角度变化率的测量精确度分别为: $\sigma_{\beta} = \sigma_{\varepsilon} = 5 \text{ mrad}$, $\sigma_{\dot{\beta}} = 0.1 \text{ mrad/s}$.

分别采用 EKF 和 MVEKF 滤波算法对目标进行定位跟踪. 仿真结果如图 4 所示.

由图 4 可见, MVEKF 算法比 EKF 算法在定位精度和收敛速度等性能方面都有了明显的改善, 主要原因是定位初始阶段 EKF 的线性化误差比较大, EKF 对于观测噪声、初始状态估计误差都很敏感,

影响了定位收敛速度.

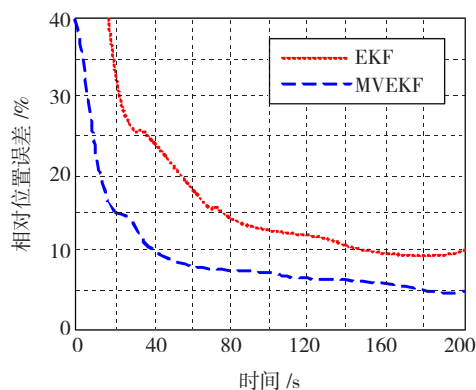


图4 EKF 和 MVEKF 定位算法的比较

4 结 语

本文分析和研究了基于辐射源角度信息的无源定位算法. 对选择不同观测参数情况下的定位性能进行了比较,同时也对 EKF 算法和 MVEKF 算法的性能进行了比较. 理论分析和仿真结果表明,增加高精度的角度变化率信息可以大大提高收敛速度和定位精确度,利用空域信息对运动辐射源进行定位与

跟踪是一种有效的定位方法,尽管本文的方法还存在着一定的局限性,但仍不失为一种好的定位手段.

参 考 文 献:

- [1] 杨争斌,谢恺,郭福成,周一宇. 基于角度约束采样的单站无源定位混合粒子滤波算法 [J]. 电子与信息学报,2008,30(3): 576-580.
- [2] 徐卫明,刘雁春. 水下目标的多速率交互多模型跟踪算法 [J]. 电子与信息学报,2008,30(3): 581-584.
- [3] 焦淑红,刘申建,司锡才. 机动目标时差无源定位自适应滤波算法研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报,2001,22(5): 57-63.
- [4] 王杰贵,罗景青. 固定单站对机动目标无源定位 IMM 算法 [J]. 信息处理,2002,18(2): 137-140.
- [5] 郭福成,孙仲康,安玮. 对运动辐射源的单站无源伪线性定位跟踪算法 [J]. 宇航学报,2002,23(5): 28-32.
- [6] 郭福成,李宗华,孙仲康. 无源定位跟踪中修正协方差扩展卡尔曼滤波算法 [J]. 电子与信息学报,2004,26(6): 917-923.
- [7] 王鼎. 外辐射源定位中的修正增益扩展卡尔曼滤波 [J]. 电子信息对抗技术,2008(23): 13-17.
- [8] 杨争斌,郭福成,周一宇. 基于 UT 变换的机动辐射源单站被动跟踪 IMM 算法 [J]. 系统工程与电子技术,2007,29(1): 5-8.

(编辑: 温泽宇)