

# 基于视在加速度与角速度信息的单站无源定位原理与目标跟踪算法研究

周亚强<sup>1</sup>, 曹延伟<sup>2</sup>, 冯道旺<sup>2</sup>, 皇甫堪<sup>2</sup>

(1. 北京航天指挥控制中心, 北京 100094; 2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文提出了一种基于视在加速度与角速度信息的单站无源定位方法, 分析了其定位原理和利用该方法对静止或匀速运动辐射源的即时定位. 同时提出了一种适合于这一定位方法的目标跟踪算法——测量空间卡尔曼滤波(MSKF)算法. 对即时定位精度与 MSKF 跟踪算法进行了计算机仿真实验, 最后, 将该定位方法和 MSKF 算法应用于某次无源定位外场试验中, 结果表明了该定位方法的有效性.

**关键词:** 无源定位; 视在加速度; 角速度; 目标跟踪

**中图分类号:** TN973 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2120-05

## Single Observer Passive Location and Tracking Arithmetic Using Look-Acceleration and Angle Rate of Changing Information

ZHOU Ya-qiang<sup>1</sup>, CAO Yan-wei<sup>2</sup>, FENG Dao-wang<sup>2</sup>, HUANGFU Kan<sup>2</sup>

(1. Beijing Astronautical Command Center, Beijing 100094; 2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** The method of single observer passive location using look-acceleration and angle rate of changing information is put forward. The paper analyse the location fundamental and point out that this method have advantage of single measurement location to static or movement emitter with same speed. At the same time the tracking arithmetic (MSKF) adapting to this location method is put forward. Finally, the computer simulation and outfield test of single measurement location and MSKF tracking arithmetic prove that this method is effective.

**Key words:** passive location; look-acceleration; angle rate of changing; target tracking

### 1 引言

随着战场环境的日益复杂, 传统的探测系统已无法完全满足现代战争的要求, 迫切需要寻求新的空中探测手段. 采用被动方式工作的单站无源定位技术作为定位技术发展的重要方向和对现有探测系统的完善, 越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>. 传统的单站无源定位技术利用单个运动观测器对辐射源连续测向定位 (Bearing Only, BO)<sup>[2,3]</sup>, BO 定位法收敛速度慢, 且对运动辐射源定位时要求观测器必须机动, 这使得该方法难于实用<sup>[4,5]</sup>. 文 [6~9] 分别提出了增加相位差变化率信息的定位方法和利用角度和角速度信息的定位方法, 研究表明这些方法可以加快定位收敛速度, 提高定位精度, 但是它们只利用观测器与辐射源间相对运动的切向信息, 如果观测器与辐射源间存在着相对径向运动, 则还可以利用它们间相对运动的径向信息进一步提高定位精度与收敛速度. 基于这一考虑, 本文提出了一种基于视在加速度与角速度信息的单站无源定位方法, 它充分利用了观测器与辐射源间的相对切向信息与径向

信息, 使得定位精度与收敛速度得到进一步提高.

通常由一次同步观测的数据无法实现对辐射源的即时定位, 即使可实现即时定位, 由于各定位参数的测量精度有限使得即时定位的精度往往难以满足要求, 需要积累多次的测量来提高定位精度. 对于运动辐射源, 除了需要估计其位置参数, 也可能希望获得其速度、加速度等运动参数的信息, 故对于运动目标必须采取跟踪的方式. 可见, 研究高精度、高稳定度的目标跟踪算法是单站无源定位与跟踪中的一项关键技术. 无源定位中常用的跟踪算法是 EKF 算法<sup>[10]</sup>, EKF 算法严重依赖于初始值的选取, 且其协方差矩阵容易出现病态. 文 [8, 11] 提出了改进的 EKF 算法-MGEKF 算法、MVEKF 算法, 使得跟踪滤波器性能大大提高. 本文提出了一种基于测量空间卡尔曼滤波 (MSKF) 的目标跟踪算法.

### 2 基于视在加速度与角速度信息的单站无源定位原理

在以观测器为原点的极坐标系中, 辐射源  $T$  相对于观测

器  $O$  的位置可以由三个独立的变量:斜距  $r$ 、方位角和俯仰角 来表示,如图 1 所示.

令  $e_r, e_\theta, e_\phi$  分别表示  $r, \theta, \phi$  增加方向上的正交单位向量,则辐射源的相对运动可表示为  $\dot{r} = \dot{r}e_r, \dot{\theta} = \dot{\theta}e_\theta, \dot{\phi} = \dot{\phi}e_\phi$ . 将位置向量  $r$  分别对时间  $t$  求一阶导数与二阶导数,得到辐射源相对速度和相对加速度向量分别为

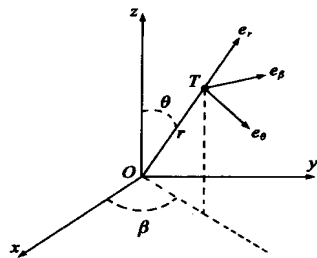


图 1 辐射源与观测器相对位置示意图

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dt}e_r + r \frac{de_r}{dt} = \dot{r}e_r + r \dot{\theta} \sin \theta e_\theta + r \dot{\phi} e_\phi \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2r}{dt^2} &= \frac{d\dot{r}}{dt}e_r + \dot{r} \frac{de_r}{dt} + \frac{d(r \dot{\theta} \sin \theta)}{dt}e_\theta + r \dot{\theta} \sin \theta \frac{de_\theta}{dt} \\ &\quad + \frac{d(r \dot{\phi})}{dt}e_\phi + r \dot{\phi} \frac{de_\phi}{dt} \\ &= (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \sin^2 \theta - r\dot{\phi}^2) e_r + (2\dot{r}\dot{\theta} \sin \theta + r\ddot{\theta} \sin \theta + 2r\dot{\theta} \dot{\phi} \cos \theta) e_\theta \\ &\quad + (2\dot{r}\dot{\phi} + r\ddot{\phi} - r^2 \sin \theta \cos \theta \dot{\theta}) e_\phi \end{aligned} \quad (2)$$

以上两式构成了基于质点运动学原理进行单站无源定位与跟踪的理论基础,从中可以导出多种体制的无源定位方法.

式(1)表明,在以观测器为原点的极坐标系中,辐射源的相对速度向量可分解为径向速度  $v_r$ 、水平面切向速度  $v_{tH}$ 、垂直面切向速度  $v_{tV}$ ,且有

$$v_r = \dot{r}, v_{tH} = r \dot{\theta} \sin \theta, v_{tV} = r \dot{\phi} \quad (3)$$

式(2)表明,辐射源与观测器间的相对加速度向量在以观测器为原点的极坐标系中可分解径向加速度  $a_r$ 、水平面切向加速度  $a_{tH}$ 和垂直面切向加速度  $a_{tV}$ ,且有

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \sin^2 \theta - r\dot{\phi}^2 \quad (4)$$

$$a_{tH} = r\ddot{\theta} \sin \theta + 2\dot{r}\dot{\theta} \sin \theta + 2r\dot{\theta} \dot{\phi} \cos \theta \quad (5)$$

$$a_{tV} = r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} - r^2 \sin \theta \cos \theta \dot{\theta} \quad (6)$$

令  $a_l = \ddot{r}$  表示相对距离标量的二次导数,它与相对运动的方向变化无关,称其为视在加速度.

由以上关系式可以看出,若观测器能测得  $\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}$  以及视在加速度  $a_l$ ,再通过导航设备或其他措施获得径向加速度  $a_r$ ,则可以根据式(4)求出  $r$  来.即

$$r = (a_l - a_r) / (\dot{\theta}^2 \sin^2 \theta + \dot{\phi}^2) \quad (7)$$

式(7)再结合角度信息就可以实现对辐射源的定位.这就是基于视在加速度与角速度信息进行单站无源定位与跟踪的基本原理.

在三维直角坐标系中,径向加速度  $a_r$  可以表示为

$$a_r = \ddot{x} \cos \theta \sin \phi + \ddot{y} \sin \theta \sin \phi + \ddot{z} \cos \theta \quad (8)$$

其中  $\ddot{x} = \ddot{x}_T - \ddot{x}_O, \ddot{y} = \ddot{y}_T - \ddot{y}_O, \ddot{z} = \ddot{z}_T - \ddot{z}_O$  分别表示  $a_r$  在各坐标轴上的分量,  $\ddot{x}_T, \ddot{y}_T, \ddot{z}_T$  与  $\ddot{x}_O, \ddot{y}_O, \ddot{z}_O$  分别表示辐射源和观测器加速度在各坐标轴上的分量.将式(8)代入式(7)中得

$$r = \frac{a_l - (\ddot{x} \cos \theta \sin \phi + \ddot{y} \sin \theta \sin \phi + \ddot{z} \cos \theta)}{\dot{\theta}^2 \sin^2 \theta + \dot{\phi}^2} \quad (9)$$

### 3 对静止或匀速运动辐射源的即时测距及其误差分析

对于静止或匀速运动辐射源,有  $\ddot{x}_T = \ddot{y}_T = \ddot{z}_T = 0$ ,式(9)可简化为

$$r = \frac{a_l + \ddot{x}_O \cos \theta \sin \phi + \ddot{y}_O \sin \theta \sin \phi + \ddot{z}_O \cos \theta}{\dot{\theta}^2 \sin^2 \theta + \dot{\phi}^2} \quad (10)$$

由式(10),如果观测器可以测得任意时刻的  $\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}, a_l$ ,通过导航设备获得各时刻的观测器状态  $(\ddot{x}_O, \ddot{y}_O, \ddot{z}_O)$ ,则可以对静止或匀速运动辐射源实现即时测距、定位.

为了便于分析,同时不失一般性,以二维情况为例来研究该定位法对静止或匀速运动辐射源即时测距的误差.二维情况下,式(10)可进一步简化为

$$r = \frac{a_l + \ddot{x}_O \cos \theta + \ddot{y}_O \sin \theta}{\dot{\theta}^2} \quad (11)$$

为了求各个参数误差对测距误差的影响对上式求全微分可得

$$\dot{r} = \frac{1}{(\dot{\theta})^2} \dot{a}_l + \frac{\cos \theta}{(\dot{\theta})^2} \dot{\ddot{x}}_O + \frac{\sin \theta}{(\dot{\theta})^2} \dot{\ddot{y}}_O + \frac{-\ddot{x}_O \sin \theta + \ddot{y}_O \cos \theta}{(\dot{\theta})^2} \dot{\theta} - \frac{2r}{\dot{\theta}} \dot{\theta} \quad (12)$$

假设各个测量量的误差相互独立且满足零均值的正态分布,而且在  $X$  方向和  $Y$  方向的加速度误差方差相等即  $\sigma_{\ddot{x}_O}^2 = \sigma_{\ddot{y}_O}^2 = \sigma_{ao}^2$ ,视在加速度、角度、角速度的测量误差均方差分别为  $\sigma_{a_l}, \sigma_\theta, \sigma_{\dot{\theta}}$ ,则即时定位的测距误差方差为

$$\dot{r}^2 = \frac{1}{(\dot{\theta})^4} [4\sigma_{a_l}^2 + \sigma_{ao}^2 + (-\ddot{x}_O \sin \theta + \ddot{y}_O \cos \theta)^2 + 4r^2 (\dot{\theta})^2] \sigma_{\dot{\theta}}^2 \quad (13)$$

### 4 测量空间卡尔曼滤波(MSKF)算法

即时定位的精度往往不高,且对于运动辐射源,通常也希望获得其速度加速度等信息,所以必须采取跟踪的方式.对于一个目标定位跟踪系统,设其状态方程和测量方程分别为

$$x(k+1) = F_{k+1,k}(k) x(k) + c(k) + w(k) \quad (14)$$

$$z(k) = y(k) + v(k) = f[x(k)] J + v(k) \quad (15)$$

其中,状态向量  $x(k)$  为  $n$  维列向量,测量向量  $z(k)$  为  $m$  维列向量,状态噪声  $w(k)$  和测量噪声  $v(k)$  假设都为零均值白高斯过程,且方差阵分别为  $Q_k, R_k$ .

MSKF 算法的基本思想是:在测量空间中直接对测量量进行卡尔曼滤波,再通过测量函数的逆变换来估计当前状态.由于滤波过程在测量空间中进行,故称该算法为测量空间卡尔曼滤波.需要注意的是:该方法要求测量函数必须可逆,而在许多实际系统中,单次测量往往不足以确定系统的全部状态,即测量函数不可逆.为此,可将单次测量不能确定的状态构造为辅助测量向量  $u$  并扩充到原有测量向量中,得  $y_E(k) = [y(k), u^T(k)]^T$ ,同时对应了扩充后的测量函数为  $f_E$ .新的测量函数  $f_E$  具有逆变换,即  $x(k) = f_E^{-1}[y_E(k)]$ .在扩充的测量空间下,测量方程应改写为

$$z(k) = H \cdot y_E(k) + v(k) = H \cdot f_E[x(k)] J + v(k) \quad (16)$$

其中系数矩阵  $H = [I_m \ 0]$ ,  $I_m$  为  $m$  维单位矩阵.

根据以上陈述, 给出 MSKF 算法的主要步骤如下:

**第一步: 滤波器初始化** 利用先验信息或最初几次的测量结果初始化滤波器, 得到初始的状态向量及其误差协方差的估计:  $\hat{x}(0/0)$  和  $P_x(0/0)$ .

**第二步: 状态预测** 利用状态转移方程预测下一状态及其误差协方差阵, 即

$$\hat{x}(k+1/k) = f_{k+1,k} \hat{x}(k/k) + c(k) \quad (17)$$

$$P_x(k+1/k) = f_{k+1,k} P_x(k/k) f_{k+1,k}^T + Q_k \quad (18)$$

然后从状态空间映射到测量空间, 得到下一测量的预测值及预测误差协方差阵为

$$\hat{y}_E(k+1/k) = f_E[\hat{x}(k+1/k)] \quad (19)$$

$$P_y(k+1/k) = J_y P_x(k/k) J_y^T \quad (20)$$

其中 Jacobi 矩阵  $J_y = \frac{\partial f_E[\hat{x}(k+1/k)]}{\partial \hat{x}(k+1/k)}$ .

**第三步: 测量空间滤波** 获得新的测量量  $z_{k+1}$  后, 在测量空间进行滤波. 容易得到滤波值及其协方差矩阵分别为

$$\hat{y}_E(k+1/k+1) = \hat{y}_E(k+1/k) + K \cdot [z_{k+1} - H \cdot \hat{y}_E(k+1/k)] \quad (21)$$

$$P_y(k+1/k+1) = (I_n - KH) \cdot P_y(k+1/k) \quad (22)$$

其中增益矩阵为

$$K = P_y(k+1/k) \cdot H^T (H \cdot P_y(k+1/k) \cdot H^T + R(k+1))^{-1} \quad (23)$$

**第四步: 状态更新** 利用扩充测量函数的逆映射实现新状态的估计

$$\hat{x}(k+1/k+1) = f_E^{-1}[\hat{y}_E(k+1/k+1)] \quad (24)$$

$$P_x(k+1/k+1) = J_x P_y(k+1/k) J_x^T \quad (25)$$

其中 Jacobi 阵  $J_x = \frac{\partial f_E^{-1}[\hat{y}_E(k+1/k+1)]}{\partial \hat{y}_E(k+1/k+1)}$ .

从以上步骤可见, 状态滤波是通过测量空间滤波间接地进行的. 该算法比一般 EKF 算法多了一个测量空间到状态空间的转换过程, 但所增加的计算量并不是很多. 辅助量  $u$  的构造具有多种方法, 为达到较好的滤波性能要求: (1)  $u$  中各项的非线性程度尽量低以减小引入的线性化误差; (2) 尽量减小系统的弱可观测状态与其他状态的耦合.

### 5 MSKF 算法在基于视在加速度、角速度信息定位中的应用

将 MSKF 算法应用在本文所提出的定位法中, 只需解决扩充测量空间的构造和初始值的选取问题. 以下针对最常见的匀速运动辐射源的跟踪问题为例, 给出目标跟踪中扩充量及扩充测量函数的构造方法.

取状态向量和测量向量分别为  $x = (x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$  和  $z = (m, m, m, m, (a_l)_m)^T$ , 为应用 MSKF 算法, 将测量向量扩充为  $y_E = (\dots, a_l, u)^T$ ,  $u = \dot{r}/r$  为径向速度与距离的比值. 这样得到了扩充的测量方程为

$$z(k) = H \cdot y_E(k) + v(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot y_E(k) + v(k) \quad (26)$$

按照定位原理, 可导出扩充测量函数的逆映射为

$$x = f_E^{-1}[y_E] = \begin{bmatrix} r \cos \sin \\ r \sin \sin \\ r \cos \\ r (-\sin \sin + \cos \cos + u \cos \sin) \\ r (\cos \sin + \sin \cos + u \sin \sin) \\ r (-\sin + u \cos) \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中,  $r = (x_0^2 \cos^2 \sin + y_0^2 \sin^2 \sin + z_0^2 \cos + a_l) / (\dot{r}^2 + \dot{r}^2 \sin^2)$ .

该定位法可以实现即时定位, 因此辐射源初始距离可按下式取值

$$\hat{r}(0/0) = (x_0^2 \cos^2 m \sin m + y_0^2 \sin^2 m \sin m + z_0^2 \cos m + (a_l)_m) / (\dot{r}_m^2 + \dot{r}_m^2 \sin^2 m) \quad (28)$$

结合首次测量的角度信息即可初始化辐射源的位置.

利用首次测量可以得到目标切向速度的初始值, 对于无法得到的径向速度, 将其初始化为零, 误差则按目标的最大可能速率来初始化. 则速度可按下式初始化

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(0/0) &= \hat{r}(0/0) (-\dot{r}_m \sin m \sin m + \dot{r}_m \cos m \cos m) \\ \hat{\dot{y}}(0/0) &= \hat{r}(0/0) (\dot{r}_m \cos m \sin m + \dot{r}_m \sin m \cos m) \\ \hat{\dot{z}}(0/0) &= -\hat{r}(0/0) \dot{r}_m \sin m \end{aligned} \quad (29)$$

由首次测量的误差不难估算出初始状态的误差协方差矩阵.

### 6 仿真实验

#### 仿真 1: 即时测距误差仿真

举一个对二维静止或匀速运动辐射源即时测距误差分布的例子, 假设观测器以相对速度  $\dot{y}$  匀速地沿  $Y$  轴方向飞行, 由式 (13) 可计算得到辐射源在地面上每一点处的测距理论误差  $r$ , 其等高线分布 (GDOP 图) 如图 2 所示, 其中以观测器为坐标原点, 相对方向为  $Y$  轴方向, 图中标注数值单位为 km. 仿真中取  $\dot{y} = 500 \text{ m/s}$ ,  $\dot{\alpha} = 5 \text{ mrad}$ ,  $\ddot{x}_0 = \ddot{y}_0 = 0$ .

由图 2 可见, 即时测距误差随着辐射源与观测器间距离

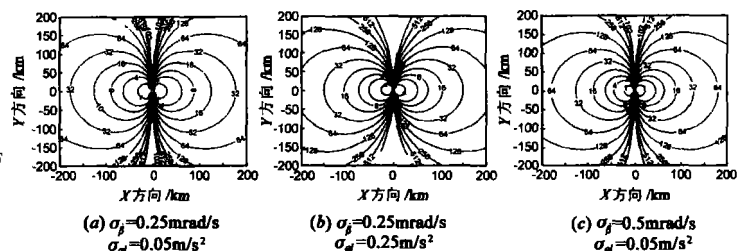


图 2 参数测量精度与即时定位的测距误差等高线分布图

的增大而增大;角速度的测量误差、视在加速度的测量误差对测距误差的影响均比较大,测距误差随着测量误差的增加而增加。从理论上讲,当辐射源与观测器相距越远时,系统的可观测性越弱,这导致了测距精度的下降;同时,参数测量精度的提高必然会改善测距精度。图 3 仿真了相对速度和观测器加速度对测距误差的影响。

仿真中:  $\dot{\alpha} = 5\text{mrad/s}$ ,  $\dot{\beta} = 0.25\text{mrad/s}$ ,  $a_t = 0.05\text{m/s}^2$ ,  $\dot{x}_0 = \dot{y}_0 = 0.025\text{m/s}^2$ 。

由图 3 可见,观测器相对运动速度越大,即时测距误差越小;观测器加速度的存在使得测距误差增大。从理论上讲,当观测器相对运动越大时,角速度值比较大,故其受误差的影响比较小,所以测距精度提高。

**仿真 2:MSKF 跟踪算法性能仿真**

设观测器以速率  $\dot{y}_0$ 、辐射源以速率  $\dot{y}_T$  相向运动,两者运动方向都平行于  $x$  轴;观测器初始位置在原点、目标初始位置在  $(L, W)$  处。视在加速度和角速度的观测噪声分别为  $a_t = 0.15\text{m/s}^2$ ,  $\dot{\alpha} = 0.2\text{mrad/s}$ 。仿真中取:  $L = W = 120\text{km}$ ,  $\dot{y}_0 = \dot{y}_T = 300\text{m/s}$ ,  $\dot{\alpha} = 5\text{mrad}$ ,并假定测量周期  $T = 1\text{s}$ 。利用 MSKF 算法进行跟踪处理,并与 MGEKF 算法、MVEKF 算法的处理结果比较。通过 500 次的 Monte-Carlo 仿真统计得到实际定位误差收敛曲线,如图 4 所示。

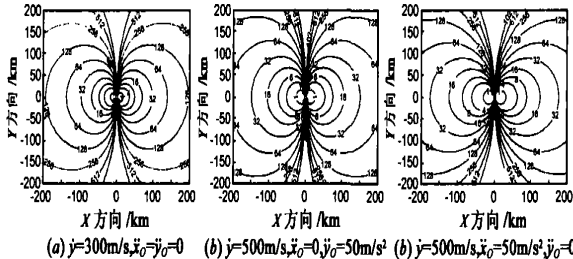


图 3 观测器运动与即时定位的测距误差等高线分布图

由图 4 可见,本文给出的 MSKF 算法具有收敛速度快、精度高的优点。同时,大量的仿真实验表明,MSKF 算法对滤波器初始值的选取不敏感。这主要是由于该算法通过减小系统弱可观测项与强可观测项的耦合来避免滤波过程中出现的病态条件,从而改善了系统的性能。

**仿真 3:本文算法在某地面无源定位缩比试验中的应用**

理论分析的结果必须在实践中才能真正得到检验。利用某次地面缩比试验采集到的脉冲数据对本文提出的算法进行验证,无疑是非常有意义的。试验系统主要包括辐射源、接收机、数据采集和处理机以及 GPS 定位设备等。

试验中观测站固定,搭载在汽车上的雷达信号源作为辐射源,可发射相参脉冲信号。利用某型号地面雷达接收机作为观测器,接收机抛物面天线截获辐射源信号,并经本振下变频为 30MHz 左右的中频,供采集及估计多普勒频率变化率参数。GPS 定位设备用于提供辐射源相对观测器的标称值。汽车稳定后的速度约为 15m/s,航迹捷径距离为 500m。雷达信号脉冲宽度为 1μs,脉冲重频为 2kHz。试验中的跟踪曲线如图 5 所

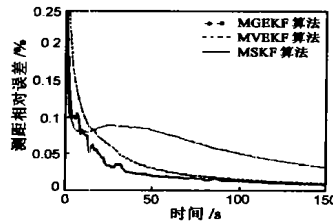


图 4 三种跟踪算法的测距误差收敛曲线

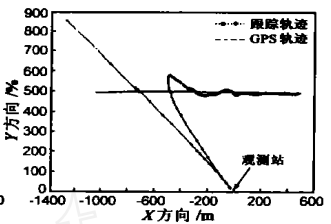


图 5 地面缩比试验跟踪曲线

示。

图 5 中,在跟踪的初期,由于初始条件的选择偏差以及积累信息较少,跟踪误差很大,随着跟踪时间的增加,跟踪轨迹逐渐趋向理论轨迹,表明了基于视在角速度和角速度信息的定位原理的正确性,同时验证了 MSKF 算法的有效性。

**7 结论**

综上所述,利用视在加速度和角速度信息可以对静止或匀速运动辐射源实现即时定位,对机动目标需要多次测量跟踪滤波定位。该方法充分利用了观测器与辐射源间相对运动的切向信息与径向信息,故定位速度快。文中提出的 MSKF 算法较 EKF 算法、MGEKF 算法、MVEKF 算法性能更加优异。通过计算机仿真实验,可以得出以下结论:

- (1) 即时定位的测距相对误差随着距离的增大而增大;方位角速度的测量误差、视在加速度的测量误差对测距相对误差的影响比较大。
- (2) MSKF 算法较 MGEKF 算法、MVEKF 算法具有收敛速度更快、定位精度更高的优点,且算法对初值的选取不敏感。

**参考文献:**

[ 1 ] Gershanoff H. Experimental passive range and aoa system shows promise [J]. Journal of Electronic Defence, 1992, 15 (12) :31 - 33.

[ 2 ] Steven C N, Vicent J A. Observability criteria for bearing-only target motion analysis. IEEE Trans, 1981, AES-17 (2) :162 - 166.

[ 3 ] Taff L G. Target location from bearing-only observation [J]. IEEE Trans, 1997, AES-33 (1) :2 - 9.

[ 4 ] 单月辉. 空中观测平台对海面慢速目标单站无源定位跟踪及其关键技术研究 [D]. 长沙:国防科技大学电子科学与工程学院, 2002.

[ 5 ] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 1996.

[ 6 ] Torrieri D J. Statistical theory of passive location systems [J]. IEEE Trans, 1984, AES-20 (2) :183 - 198.

[ 7 ] Rose C M, Dahlgren V. Doppler rate and angle rate passive emitter location [P]. United States Patent :5689274, 1997 - 11 - 18.

[ 8 ] 郭富成. 基于运动学原理的单站无源定位与跟踪关键技术研究 [D]. 长沙:国防科技大学电子科学与工程学院, 2002.



- [ 9 ] 邓新蒲. 运动单观测器无源定位与跟踪方法研究[D], 长沙:国防科技大学电子科学与工程学院,2000.
- [10] 冯道旺. 利用径向加速度信息的单站无源定位技术研究[D],长沙:国防科技大学电子科学与工程学院,2003.
- [11] Peach N. Bearing-only tracking using a set of range-parameterised extended kalman filter[J]. IEEE Proceedings on Control Theory Application,1995,142(1):73 - 80.
- [12] Song T L,Jason S. A stochastic analysis of a modified gain extended kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements[J], IEEE Transactions on Automatic Control,1985,30(10):940 - 949.

#### 作者简介:



**周亚强** 男,1975年10月生于陕西省扶风县,博士研究生,从事单站无源定位与跟踪、高精度测向、高精度测频、阵列信号处理等方面的研究. 目前已经发表论文数篇.

E-mail: arhqi2001@163.com.



**曹延伟** 男,1976年3月生于河南南阳,博士研究生,主要从事雷达信号处理、单站无源定位与跟踪等方面的研究. 目前已经发表论文数十篇. E-mail: yw\_jordan@163.com.

**冯道旺** 男,1975年9月生于广西南宁,现为国防科技大学电子科学与工程学院讲师,博士,主要研究领域为高精度多站、单站无源定位技术. E-mail: DW\_feng@163.com.

**皇甫堪** 男,1939年生于上海市,现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师、中国电子学会会员,目前研究领域为现代信号处理、雷达信号处理、多频连续波测距雷达.