

# 基于径向加速度的机动辐射源单站被动跟踪算法

杨争斌, 郭福成, 周一宇

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对机动辐射源的单站被动跟踪问题, 提出联合利用径向加速度和角度信息, 结合基于UT的交互多模型算法进行单站被动跟踪, 并给出了径向加速度信息的数学模型及测量方法。与典型只测角、联合角度和角速度等单站跟踪方法的仿真比较表明, 该方法具有更好的滤波效果。

**关键词:** 机动目标跟踪; 无源定位; 径向加速度; 交互多模型; UT变换

中图分类号: TN97 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2007)S1-0104-04

## Maneuvering emitter tracking using a single passive observer based on radial acceleration information

YANG Zheng-bin, GUO Fu-cheng, ZHOU Yi-yu

(School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** To tackle the problem of tracking a maneuvering emitter by a single passive observer, a method using the radial acceleration and angle measurements, combined with unscented transformation(UT) based interacting multiple-model(IMM) algorithm is proposed. The associated mathematical model and to measuring the approaches radial acceleration are also presented. Computer simulations are conducted to compare the proposed method with the traditional bearing only method and the method using the bearing and the bearing rate. Simulation results show that the proposed method is more effective.

**Key Words:** maneuvering target tracking; passive location; radial accelerations; interacting multiple model; unscented transformation

单站无源定位跟踪技术是近年来被广泛研究的一个热点问题<sup>[1]</sup>。文[2]提出了基于质点运动学原理的单站无源测距方法, 后来, 文[3~5]对此类方法进行了进一步研究。但是以往单站无源定位研究中, 一般假定目标是匀速运动, 实际上目标机动总是存在的。对于机动辐射源单站被动跟踪问题, 文[3]分析了联合利用角度、角速度以及径向加速度测量时的可观问题, 结果表明, 对于匀加速机动辐射源, 只要满足在观测时间内角速度不恒等于零值, 则通过测量积累可惟一确定目标状态。

从单站无源机动跟踪算法来讲, 目前研究最多的依然是基于交互多模型(IMM)的跟踪方法。传统基于EKF的IMM方法<sup>[5,6]</sup>, 在卡尔曼递推过程中容易产生协方差矩阵的病态, 导致滤波发散。文[7]提出了基于UT(Unscented Transformation)的非线性估计方法, 文[8]将该方法和IMM算法结合, 给出了一种单站机动跟踪算法, 其仿真表明该方法比基于EKF的方法有更好的滤波精度和稳定性。笔者将径向加速度信息用于单站机动目标跟踪, 并采用基于UT的IMM算法, 对只测角、联合角度和角速度等单站定位方法进行了比较, 最后给出了计算机仿真结果。

收稿日期: 2007-05-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2006AA701303); 武器装备预研基金(9140C1011010601)

作者简介: 杨争斌(1978-), 男, 国防科技大学博士研究生。

## 1 利用径向加速度测量的数学模型

三维情况下, 目标  $T$  按照轨迹  $\mathbf{r}_T(t)$  运动, 观测器  $O$  按照轨迹  $\mathbf{r}_O(t)$  运动, 相对位置向量为  $\mathbf{r}$ , 辐射源和观测器的相对位置关系如图 1。观测器被动接收目标  $T$  的辐射的信号, 利用对该信号的被动观测量对目标进行定位跟踪。定义  $k$  时刻目标状态  $\mathbf{X}_{tk}$ , 观测器状态  $\mathbf{X}_{ok}$ , 则  $k$  时刻辐射源目标相对观测器的相对状态向量为  $\Delta\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{tk} - \mathbf{X}_{ok} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \dot{x}, \Delta \dot{y}, \Delta \dot{z}, \Delta \ddot{x}, \Delta \ddot{y}, \Delta \ddot{z}]^T$ 。

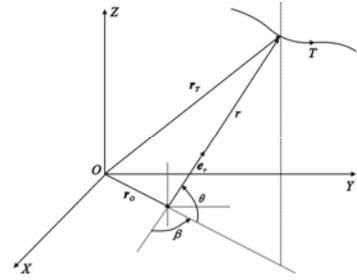


图 1 辐射源目标和观测器相对位置

根据质点运动学原理<sup>[2]</sup>

$$\frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} = (\ddot{r} - r\dot{\beta}^2 \cos^2 \theta - r\dot{\theta})\mathbf{e}_r + (2r\dot{\beta} \cos \theta + r\ddot{\beta} \cos \theta + 2r\dot{\beta} \dot{\theta} \sin \theta)\mathbf{e}_\beta + (2r\dot{\theta} + \ddot{r}\theta - 2\dot{\beta}^2 \sin \theta \cos \theta)\mathbf{e}_\theta. \quad (1)$$

若目标和观测器相对运动在径向上加速度分量为  $a_r$ , 则

$$a_r = \Delta \ddot{x} \cos \beta \cos \theta + \Delta \ddot{y} \sin \beta \cos \theta + \Delta \ddot{z} \sin \theta. \quad (2)$$

由于  $a_r$  即为加速度向量  $\frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2}$  在  $\mathbf{e}_r$  上的投影, 因此有

$$\Delta \ddot{x} \cos \beta \cos \theta - \Delta \ddot{y} \sin \beta \cos \theta + \Delta \ddot{z} \sin \theta = (\ddot{r} - r\dot{\beta}^2 \cos^2 \theta - r\dot{\theta}), \quad (3)$$

即

$$\ddot{r} = (\Delta \ddot{x} \cos \beta \cos \theta + \Delta \ddot{y} \sin \beta \cos \theta + \Delta \ddot{z} \sin \theta) + r(\dot{\beta}^2 \cos^2 \theta + \dot{\theta}), \quad (4)$$

上式即利用径向加速度信息测量的数学模型。

## 2 径向加速度信息的获取

要将利用径向加速度信息用于无源定位技术, 必须有相应测量技术支持。目标径向加速度参数测量一般从频域测量和时域测量两种方法<sup>[9]</sup>。

### 2.1 时域方法

假设辐射源发射信号时间为  $t_0$ , 观测站接收目标信号的到达时间为  $t_r$ , 则  $t_r = r/c + t_0$ , 对等式两边求二阶导数, 并整理有

$$\ddot{r} = c \frac{\partial^2 t_r}{\partial t^2}. \quad (5)$$

由式 (5), 显然, 对于离散系统而言, 通过对脉冲 TOA 进行二阶求导就可得到径向加速度测量  $\ddot{r}$ 。实际中由于脉冲 TOA 测量是时间离散的, 可以通过对脉冲 TOA 进行二阶差分得到。

### 2.2 频域方法

假设辐射源信号载频为  $f_c$ , 接收机接收信号实际频率  $f = f_c - \frac{f_c}{c} \dot{r}$ , 其中  $-\frac{f_c}{c} \dot{r}$  为多普勒频率分量。频率等式两边对时间求导并整理, 有

$$\ddot{r} = -\frac{c}{f_c} \dot{f} \quad (6)$$

也就是说,  $\dot{r}$  也可以通过信号频率或多普勒频率变化率得到。

### 3 基于 UT 的 IMM 机动跟踪算法

UT 变换是一种非线性估计的有效方法, 它通过设置 sigma 点和相应权值, 计算逼近样本的一阶、二阶矩。考虑一个多维随机变量  $\mathbf{x}$  经过非线性变换后得到  $\mathbf{z} = \mathbf{g}(\mathbf{x})$ , 并假设  $\mathbf{x}$  的均值和方差分别为  $\bar{\mathbf{x}}$  和  $\mathbf{P}_x$ 。 $\mathbf{x}$  的 sigma 点  $\{\mathbf{x}_i\}$  和权值  $\{\omega_i\}$  可由  $\bar{\mathbf{x}}$  和  $\mathbf{P}_x$  得到, 具体方法可见文献[7]。

IMM算法<sup>[10]</sup>一般包括: 输入交互、模型滤波、模型概率更新、交互输出等4个主要步骤。考虑基于UT的Kalman滤波算法(UKF)良好滤波稳定性和一致性, 在采用IMM算法进行跟踪时, 并行滤波器也分别采用UKF进行滤波, 其他步骤和一般IMM算法相同。也就是说, 基于UT的IMM算法(UKF-IMM)和一般基于EKF的IMM算法(EKF-IMM)相比, 不同之处就在于, UKF-IMM模型滤波的均值和协方差是通过UT变换所得的sigma点及对应的权值计算实现, 无需求解线性化所需Jacobian矩阵。UKF-IMM可以参考文[8], 这里不再赘述。

## 4 计算机仿真分析

### 4.1 仿真设计

为验证算法性能, 将联合径向加速度和角度的方法和常见只测角<sup>[1]</sup>以及联合测角和角速度<sup>[5]</sup>的方法进行比较, 做如下仿真实验。辐射源从直角坐标为(100km, 200km)处沿X轴负方向以  $v_t = 300\text{m/s}$  的速度匀速运动200s, 从  $t = 201\text{s}$  开始做典型的匀速回转机动, 回转角速度为  $\omega_t = \frac{\pi}{30}\text{rad/s}$ , 机动持续时间30s, 从231s开始沿X轴正方向匀速运动。观测器从原点开始沿X轴正向做匀速圆周运动, 速度大小为300m/s, 圆周半径为5km。

仿真中角度测量误差  $\sigma_\beta = 5\text{mrad}$ ,

径向加速度测量误差  $\sigma_{\ddot{r}} = 0.05\text{m/s}^2$ ,

角速度测量误差为  $0.1\text{mrad}$ 。观测器运动

时位置误差  $\sigma_x = \sigma_y = 10\text{m}$ , 速度误差

$\sigma_{V_x} = \sigma_{V_y} = 0.1\text{m/s}$ 。观测采样周期为

1s, 观测时间长度为400s。

IMM算法采用加扰动的CV模型<sup>[11]</sup>和 Singer模型<sup>[11]</sup>进行交互, 初始模型概率均为0.5, 模型转移概率矩阵为  $\mathbf{p}^{ij} = [0.9, 0.1; 0.1, 0.9]$ 。仿真中滤波器初始化, 假定目标距离搜索范围为0~500km, 目标速度范围假定为-500~

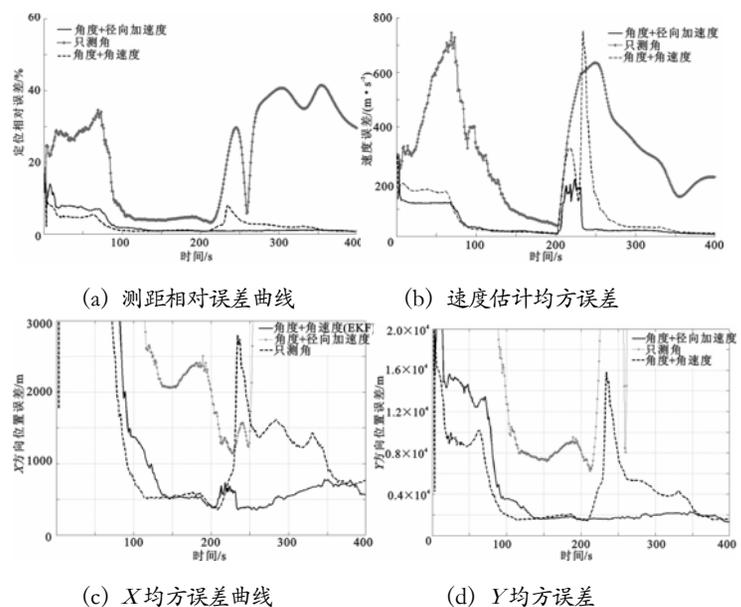


图2 观测器机动时的估计误差曲线

500m/s, 初始分布假定为均匀分布, 在此假定下可由概率论知识得到目标位置和速度的期望值以及相应协方差值作为滤波器初始条件。

评价无源定位跟踪效果的一个重要指标就是测距相对误差<sup>[1]</sup>, 定义为测距误差和真实距离的比值。仿真中采用 50 次 Monte Carlo 仿真实验定位误差的统计平均值作为测距相对误差的输出。

## 4.2 仿真结果

图 2 给出了观测器机动条件下, 不同单站定位系统采用相同滤波条件得到的测距相对误差曲线和速度估计的均方误差曲线。从图 2 (a), 相比利用角速度的系统而言, 采用径向加速度的系统从测距性能来讲, 虽然在起始阶段比角速度系统收敛稍慢一些(这是主要是由于观测器机动引起系统可观测度不同导致), 但是在目标机动处理上, 误差明显小于角速度系统。

需要说明的是, 径向加速度系统的测距相对误差曲线在目标机动期间变化很小, 在图 2 (a) 中几乎没有体现, 这是由于基于径向加速度信息的测距误差在目标机动期间增加的并不多, 如图 (c), (d) 所示, 加之目标相对观测器距离比较远, 所增加的误差从距离的相对误差来看没有反映出来。图 2 (b) 说明了采用径向加速度信息在目标速度估计上的优势, 可以看出, 径向加速度系统不仅在目标机动期间速度估计均方误差最小, 并且在目标机动结束之后可以很快恢复到较低误差水平。

## 5 结束语

研究了利用径向加速度信息进行机目标跟踪的方法, 分析了径向加速度信息的数学模型, 给出了径向加速度信息的获取途径。通过和传统只测角系统和联合角度角速度系统的仿真比较表明, 在角度基础上引入径向加速度信息, 可以提高对机动辐射源的跟踪精度。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 孙仲康. 基于运动学原理的无源定位技术[J]. 制导与引信, 2001,22(1):40-44.
- [3] 郭福成. 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: 国防科技大学研究生院, 2002.
- [4] 冯道旺, 李宗华, 周一宇. 一种单站无源定位方法及其可观测性分析[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(1):68-71.
- [5] 郭福成, 孙仲康. 三维机动辐射源的单站无源跟踪算法[J]. 现代雷达, 2005,27(3):5-8.
- [6] 王杰贵, 罗景青. 对机动辐射源单站无源定位 IMM 算法[J]. 现代雷达, 2002,24(6):9-12.
- [7] Julier S J, Uhlmann J K. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation[J]. Proc of the IEEE, 2004, 92(3): 401-422.
- [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.
- [9] 郭福成, 孙仲康. 基于离心加速度信息的单站无源测距定位方法[J]. 宇航学报, 2005,26(sup):55-58.
- [10] Li X R, Jilkov V P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods[J]. IEEE Trans on AES, 2005, 41(4):1255-1321.
- [11] Li X R, Jilkov V P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models[J]. IEEE Trans on AES, 2003, 39(4):1333-1364.