

球坐标系中的战术导弹跟踪

张 岩, 高文春, 龙 腾

(北京理工大学电子工程系雷达技术研究所, 北京 100081)

摘 要: 本文就球坐标中的机动目标跟踪, 特别是用舰上跟踪雷达对来袭的飞航式反舰导弹进行跟踪的问题提出了一套新的模型和算法. 这个新的模型着重于对球坐标系中目标运动模式和加速度非线性关系的深入分析. 同时本文提出了一种称为二级自适应滤波器组(TSAFG)的自适应跟踪滤波器结构. 对于满足一定条件的机动目标, 这一方法具有简单、灵活、有效的优越性. 它还可推广到在球坐标系中对多种类型的机动目标进行精确跟踪.

关键词: 跟踪; 机动目标; 球坐标系; 自适应卡尔曼滤波器

中图分类号: TN953+.6 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2001)06-0751-04

Tracking a Tactical Missile in Spherical Coordinates

ZHANG Yan, GAO Wen chun, LONG Teng

(Research Center of Radar Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new motion model with a tracking algorithm is introduced in this paper to track a maneuvering target such as a sea skimming anti ship cruise missile (ASCM) in spherical coordinates. The algorithm is based on a more accurate analysis of the motion of maneuver targets. Unlike previous models that treat uncertainties introduced by maneuvering as general random process, this model takes emphasis on nonlinear relationships between maneuver accelerations. A modified adaptive two stage Kalman filter, named Two Stage Adaptive Filter Group (TSAFG), is implemented with this model to track simulated incoming ASCM and other maneuvering targets. It is manifested that the proposed method is simple and effective under many situations, and can be extended to track various types of maneuvers.

Key words: tracking; maneuver targets; spherical coordinates; adaptive Kalman filter

1 引言

在球坐标系中进行跟踪滤波有其特殊的优点和缺点. 由于观测量直接在球坐标系中获得, 系统观测方程是线性的, 速度信息易于利用, 且数据关联与融合更易进行. 但是, 球坐标系状态之间的耦合相当复杂, 更重要的是, 一直缺少比较精确的模型来描述状态变化的过程. 解决上述问题最简单的方法是把所有由目标机动引起的不确定性归结为动态噪声. 这种方法显然比较粗糙. 后来发展的方法^[1,2]都是试图将机动加速度归结为我们熟悉的随机过程. 但是, 这类方法没有充分利用目标可能的运动模式信息, 对于我们熟悉的直角坐标系中的运动形式, 仍然描述得不够精确和深刻.

为了尽可能地克服上述局限, 本文从彻底地在球坐标系中描述机动的思想出发, 提出了一套新的模型和算法. 其中的算法通过二级自适应滤波器组的方式使模型得以实施. 实验证明, 这一结构可以在球坐标系中对多种类型的机动进行精确有效的跟踪. 本文的背景和一项重要课题, 是利用舰载跟踪传感器跟踪来袭的低空掠海反舰导弹, 在本文中, 按制导规律飞行被描述为一类特殊的机动, 而针对它的跟踪算法, 也可以推广到在球坐标系中跟踪其它类型的机动目标.

2 问题描述

2.1 基本模型

本文采用的基本目标状态向量是 6 维向量, 包括目标的距离、方位、仰角及其一阶导数:

$$X_k = [r_k \quad \dot{r}_k \quad \beta_k \quad \dot{\beta}_k \quad \theta_k \quad \dot{\theta}_k]^T \quad (1)$$

状态方程采用考虑加速度输入的常速模型:

$$X_{k+1} = FX_k + G\ddot{u}_k + V_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

其中 V_k 按假设是均值为 0 且方差确定的高斯白噪声, 设 T 为采样间隔且

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix}, \quad (3)$$
$$\ddot{u}_k = [\ddot{r}_k, \ddot{\beta}_k, \ddot{\theta}_k]^T$$

舰载跟踪传感器一般提供距离、距离率、方位和仰角的观测数据, 并假设有零均值的高斯观测误差, 则基本观测方程为

$$Z_k = HX_k + W_k \quad (4)$$

$$\text{其中 } H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, W_k \sim N(0, R_k) \quad (5)$$

2.2 坐标系之间的基本关系

由球坐标到直角坐标的转换关系

$$x = r \cos \theta \cos \beta, y = r \cos \theta \sin \beta, z = r \sin \theta \quad (6)$$

对式(6)两端微分一次,可得直角坐标系和球坐标系中速度向量的关系

$$\xi = T_1 u \quad (7)$$

其中

$$\xi = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}, T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \beta & -r \cos \theta \sin \beta & -r \sin \theta \cos \beta \\ \cos \theta \sin \beta & r \cos \theta \cos \beta & -r \sin \theta \sin \beta \\ \sin \theta & 0 & r \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(8)两端再做微分,可以得到加速度矢量 $\ddot{\xi} = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}]^T$ 和 $\ddot{u} = [\ddot{r}, \ddot{\theta}, \ddot{\beta}]^T$ 之间的关系

$$\ddot{u} = T_2 \ddot{\xi} + T_3 \dot{u} \quad (9)$$

$$T_2 = T_1^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \beta & \cos \theta \sin \beta & \sin \theta \\ -\frac{\sin \beta}{r \cos \theta} & \frac{\cos \beta}{r \cos \theta} & 0 \\ -\frac{\sin \theta \cos \beta}{r} & \frac{\sin \theta \sin \beta}{r} & \frac{\cos \theta}{r} \end{bmatrix},$$

$$T_3 = -T_1^{-1} \dot{T}_1 = \begin{bmatrix} 0 & r \cos^2 \theta \cdot \dot{\beta} & \dot{\theta} \\ -\dot{\beta}/r & -\dot{r}/r + \tan \theta \cdot \dot{\theta} & \tan \theta \cdot \dot{\beta} \\ -\dot{\theta}/r & -\sin \theta \cos \theta \cdot \dot{\beta} & -\dot{r}/r \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 球坐标系中的运动描述

3.1 速度矢量与机动分析

球坐标系中运动描述的关键,是将目标机动归结为目标速度矢量大小和方向的变化,设在 t_{k-1} 时刻速度向量 $V(t_{k-1})$ 的大小是 $v(t_{k-1})$, 从时刻 t_{k-1} 到 $t_k = t_{k-1} + \Delta t$, 其速率增加了 $a \Delta t$, 速率方位角增加了 $\omega_\varphi \Delta t$, 又在仰角方向增加了 $\omega_\gamma \Delta t$, 从而在 t_k 时刻速度变为 $V(t_k)$.

在 $k-1$ 时刻和 k 时刻,目标速度在直角坐标系中的分量分别为

$$\begin{aligned} v_x(t_{k-1}) &= v(t_{k-1}) \cos \gamma(t_{k-1}) \cos \varphi(t_{k-1}) \\ v_y(t_{k-1}) &= v(t_{k-1}) \cos \gamma(t_{k-1}) \sin \varphi(t_{k-1}) \\ v_z(t_{k-1}) &= v(t_{k-1}) \sin \gamma(t_{k-1}) \end{aligned} \quad (11)$$

和

$$\begin{aligned} v_x(t_k) &= [v(t_{k-1}) + a \Delta t] \cos[\gamma(t_{k-1}) + \omega_\gamma \Delta t] \cos[\varphi(t_{k-1}) + \omega_\varphi \Delta t] \\ v_y(t_k) &= [v(t_{k-1}) + a \Delta t] \cos[\gamma(t_{k-1}) + \omega_\gamma \Delta t] \sin[\varphi(t_{k-1}) + \omega_\varphi \Delta t] \\ v_z(t_k) &= [v(t_{k-1}) + a \Delta t] \sin[\gamma(t_{k-1}) + \omega_\gamma \Delta t] \end{aligned} \quad (12)$$

现在定义

$$\begin{aligned} d_{x,k-1}^f &= a \cos \gamma(t_{k-1}) \cos \varphi(t_{k-1}) \\ d_{y,k-1}^f &= a \cos \gamma(t_{k-1}) \sin \varphi(t_{k-1}) \\ d_{z,k-1}^f &= a \sin \gamma(t_{k-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

根据基本关系

$$a_x(t_k) = [v_x(t_k) - v_x(t_{k-1})] / \Delta t, a_y(t_k) = [v_y(t_k) -$$

$$v_y(t_{k-1})] / \Delta t, a_z(t_k) = [v_z(t_k) - v_z(t_{k-1})] / \Delta t \quad (14)$$

将式(11)~(13)代入式(14),并展开成矩阵方程形式,得到

$$\begin{bmatrix} a_x(t_k) \\ a_y(t_k) \\ a_z(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_\gamma \Delta t \cos \omega_\varphi \Delta t & -\cos \omega_\gamma \Delta t \sin \omega_\varphi \Delta t & -\cos \varphi(t_k) \sin \omega_\gamma \Delta t \\ \cos \omega_\gamma \Delta t \cos \omega_\varphi \Delta t & \cos \omega_\gamma \Delta t \cos \omega_\varphi \Delta t & -\sin \varphi(t_k) \sin \omega_\gamma \Delta t \\ 0 & 0 & \cos \omega_\gamma \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_{x,k-1}^f \\ d_{y,k-1}^f \\ d_{z,k-1}^f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cos \omega_\gamma \Delta t \cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} & \frac{-\cos \omega_\gamma \Delta t \sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} & \frac{-\cos \varphi(t_k) \sin \omega_\gamma \Delta t}{\Delta t} \\ \frac{\cos \omega_\gamma \Delta t \sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} & \frac{\cos \omega_\gamma \Delta t \cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} & \frac{-\sin \varphi(t_k) \sin \omega_\gamma \Delta t}{\Delta t} \\ 0 & 0 & \frac{\cos \omega_\gamma \Delta t - 1}{\Delta t} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x(t_{k-1}) \\ v_y(t_{k-1}) \\ v_z(t_{k-1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$m_z = a \cos \gamma(t_{k-1}) \sin \omega_\gamma \Delta t + v(t_{k-1}) \cos \gamma(t_{k-1}) \frac{\sin \omega_\gamma \Delta t}{\Delta t} \quad (16)$$

可以看到在以上结果中,速度在方位和俯仰上的转动在直角坐标系中引起的机动是紧密耦合的.我们可以首先令 $\omega_\gamma = 0$ 和 $\omega_\varphi = 0$, 分别处理两套解耦的形式再设法综合在一起,从而实现三维空间内任意机动的建模.对于一般掠海攻击的反舰导弹,目标机动主要发生在水平面内,速度在俯仰方向的转动与在方位向的转动相比是可以忽略的.因此,本文只分析 $\omega_\gamma = 0$ 的简化情况,此时式(15)、(16)的解耦形式为

$$\begin{bmatrix} a_x(t_k) \\ a_y(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_\varphi \Delta t & -\sin \omega_\varphi \Delta t \\ \sin \omega_\varphi \Delta t & \cos \omega_\varphi \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{x,k-1}^f \\ d_{y,k-1}^f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} & \frac{-\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} \\ \frac{\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} & \frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x(t_{k-1}) \\ v_y(t_{k-1}) \end{bmatrix}, a_z(t_k) = d_{z,k-1}^f \quad (17)$$

3.2 动态方程的建立

下一步定义

$$\begin{aligned} d_{x,k-1}^f &= a_x(t_{k-1}) + \Delta a_x(t_{k-1}) \\ d_{y,k-1}^f &= a_y(t_{k-1}) + \Delta a_y(t_{k-1}) \\ d_{z,k-1}^f &= a_z(t_{k-1}) + \Delta a_z(t_{k-1}) \end{aligned} \quad (18)$$

$\Delta a_x(t_{k-1})$, $\Delta a_y(t_{k-1})$ 和 $\Delta a_z(t_{k-1})$ 可看成是由于 a 的起伏和速度的旋转带来的误差,如果目标以恒定加速度沿直线运动,这三项误差都将是 0. 随即定义

$$\begin{aligned} \Delta a_x^p(t_k) &= [\cos \omega_\varphi \Delta t \quad -\sin \omega_\varphi \Delta t] \begin{bmatrix} \Delta a_x(t_{k-1}) \\ \Delta a_y(t_{k-1}) \end{bmatrix}, \\ \Delta a_y^p(t_k) &= [\sin \omega_\varphi \Delta t \quad \cos \omega_\varphi \Delta t] \begin{bmatrix} \Delta a_x(t_{k-1}) \\ \Delta a_y(t_{k-1}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

结合式(17)~(19)进行整理得到

$$\begin{bmatrix} a_x(t_k) \\ a_y(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_\varphi \Delta t & -\sin \omega_\varphi \Delta t \\ \sin \omega_\varphi \Delta t & \cos \omega_\varphi \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x(t_{k-1}) \\ a_y(t_{k-1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} & \frac{-\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} \\ \frac{\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} & \frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x(t_{k-1}) \\ v_y(t_{k-1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x^p(t_k) \\ \Delta a_y^p(t_k) \end{bmatrix} \quad (20)$$

对误差项 $\Delta a_x^p(t_k)$ 和 $\Delta a_y^p(t_k)$ 的分析基于如下的近似假设:这两项误差近似为高斯分布的和相关性很弱的随机模型噪声.由式(17)~(19)并经过两次近似处理,获得它们的协方差表达式为

$$\begin{bmatrix} \text{var}\{\Delta a_x^p(t_k)\} \\ \text{var}\{\Delta a_y^p(t_k)\} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^2(t_{k-2}) \\ v_y^2(t_{k-2}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} \right]^2 + \sin^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} \right]^2 \\ a_{12} &= \cos^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} \right]^2 + \sin^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} \right]^2 \\ a_{21} &= \sin^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} \right]^2 + \cos^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} \right]^2 \\ a_{22} &= \sin^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\sin \omega_\varphi \Delta t}{\Delta t} \right]^2 + \cos^2 \omega_\varphi \Delta t \left[\frac{\cos \omega_\varphi \Delta t - 1}{\Delta t} \right]^2 \end{aligned} \quad (21)$$

而对于垂直方向的加速度, 有

$$a_z(t_k) = a_z(t_{k-1}) + \Delta a_z^p(t_k) \quad (22)$$

且 $\Delta a_z^p(t_k)$ 是预先设定一方差很小的高斯白噪声。至此, 式 (17) ~ (22) 建立了完整的模型框架。

4 自适应二级卡尔曼滤波器

先将基本的状态转移方程(2) 分裂为两部分, 第一部分:

$$X_{1,k+1} = FX_k + GT_3 i u_k + V_k \quad (23)$$

式(23) 是第一级滤波器的状态转移方程, 它计算并补偿了由非机动目标在球坐标系中引起的伪加速度。

设第二级滤波器的状态变量为 $X_{2,k} = [a_x, k, a_y, k, a_z, k]^T$,

取 $t_{k-1} \sim k-1, t_k \sim k, \Delta t \sim T$, 并利用式(7)、(17)、(20) 最终化为

$$\begin{bmatrix} a_x, k \\ a_y, k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_\varphi T & -\sin \omega_\varphi T \\ \sin \omega_\varphi T & \cos \omega_\varphi T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x, k+1 \\ a_y, k+1 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{\cos \omega_\varphi T - 1}{T} & -\frac{\sin \omega_\varphi T}{T} & 0 \\ \frac{\sin \omega_\varphi T}{T} & \frac{\cos \omega_\varphi T - 1}{T} & 0 \end{bmatrix} T_1 \begin{bmatrix} r_k \\ \beta_k \\ \theta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x^p, k \\ \Delta a_y^p, k \end{bmatrix}$$

$$a_z, k = a_z, k-1 + \Delta a_z^p, k \quad (24)$$

第一级滤波的残差包含着加速度变化的信息, 把它作为第二级滤波的观测, 由式(9)和(23), 第二级滤波的“伪测量”观测方程是

$$Z_k^f = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \cos \theta \cos \beta & \frac{T^2}{2} \cos \theta \sin \beta & \frac{T^2}{2} \sin \theta \\ T \cos \theta \cos \beta & T \cos \theta \sin \beta & T \sin \theta \\ -\frac{T^2 \sin \beta}{2r \cos \theta} & \frac{T^2 \cos \beta}{2r \cos \theta} & 0 \\ -\frac{T^2 \sin \theta \cos \beta}{2r} & -\frac{T^2 \sin \theta \sin \beta}{2r} & \frac{T^2 \cos \theta}{2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x, k \\ a_y, k \\ a_z, k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta z_r^f \\ \Delta z_\beta^f \\ \Delta z_\theta^f \end{bmatrix} \quad (25)$$

这里, 观测误差的协方差矩阵可以直接由第一级滤波器新息的协方差矩阵获得。

全局估计应当是两部分滤波结果的合并:

$$X_{klk} = X_{1,klk} + GT_2 X_{2,klk}, \quad (26)$$

$$P_{klk} = P_{1,klk} + GT_2 P_{2,klk} T_2^T G^T$$

其中 P_1, P_2 分别是第一、二级状态估计的协方差矩阵。注意滤波过程中 a_x, a_y, a_z 应合并在同一向量中。第一级滤波器的每步初始值要按全局估计进行更新:

$$X_{1,k-1|k-1} = X_{k-1|k-1}, P_{1,k-1|k-1} = P_{k-1|k-1} \quad (27)$$

对于舰载传感器跟踪来袭的反舰导弹, 注意到大多数情

况下, 目标视线角的变化率十分接近目标方位的变化率, 即

$$\omega_\varphi = Kq = K\beta \quad (28)$$

其中 K 是比例制导常数。将式(28)带入式(24), 得到以系数 K 为参数的动态模型, 由于 K 是相对更易于把握的量, 这样的滤波器更容易实现。

5 自适应二级滤波器的实现

二级滤波器实现的关键是考虑转弯速率和制导系数 K 未知的情况。为此, 引入一种基于贝叶斯自适应滤波^[5] 的多模型结构。并称之为自适应二级滤波器组(TSAFG)。例如, 第二级滤波器可以是 4 个并行的卡尔曼滤波器构成的滤波器组, $t = 0$ 时刻的初始模型参数设为:

$$\omega_{1,0} = 0; \omega_{2,0} = 0; \omega_{3,0} = \omega_{\max}; \omega_{4,0} = -\omega_{\max} \quad (29)$$

其中 ω_{\max} 是目标可能的最大转弯速率。

现在设 $v_{j,k}$ 是第 j 个滤波器的残差, α_j 代表“模型参数 ω_j 是正确的”这一事件, Z^k 是到时刻 k 的累积虚拟量测集, 则每个滤波器的模型概率按下式计算:

$$p(\alpha_i / Z^k) = p(\alpha_i / Z^{k-1}, Z^k) = \frac{1}{\sum_{j=1}^4 2\pi S_{j,k} |^{-1/2} \exp\{-\frac{1}{2} v'_{j,k} S_{j,k}^{-1} v_{j,k}\} p(\alpha_j / Z^{k-1})} \times 2\pi S_{i,k} |^{-1/2} \exp\{-\frac{1}{2} v'_{i,k} S_{i,k}^{-1} v_{i,k}\} p(\alpha_i / Z^{k-1}) \quad (30)$$

继而状态估计和模型参数按下式进行混合:

$$X_{2,klk} = \sum_{i=1}^4 X_{2,i,klk} p(\alpha_i / Z^k),$$

$$P_{2,klk} = \sum_{i=1}^4 (P_{2,i,klk} + v_{i,k} v'_{i,k}) p(\alpha_i / Z^k) - X_{2,klk} X_{2,klk}^T$$

以及

$$\omega_{\varphi,k} = \sum_{i=1}^4 \omega_{\varphi,i} p(\alpha_i / Z^k), \text{ 或 } K_k = \sum_{i=1}^4 K_i p(\alpha_i / Z^k) \quad (31)$$

随后, 在下一轮滤波的开始重新调整四个模型参数, 使之以一定间隔分布在模型参数混合估计周围。

6 仿真结果

6.1 对模拟反舰导弹的跟踪

一系列掠海来袭的导弹都保持恒定速率 300m/s, 高度 10m, 在前 10s 内沿直线作巡航飞行, 然后按比例制导规律转弯对我舰发起攻击, 它们的制导比例系数 K 在 2 到 5 之间。假设我舰以 15m/s 的速率作匀速直线运动。图 1 和图 2 分别显示了这些弹道的转弯机动部分和转弯速率的变化过程。

舰上跟踪传感器具有零均值高斯测量误差, 其中距离误差标准差为 5m, 径向速率误差标准差为 2m/s, 方位和仰角的误差标准差都是 2 个毫弧度。设备采样率为 0.02 秒。

TSAFG 采用制导参数 K 作为模型参数, 其自动结构调整遵循

$$K_{1,k} = 0; K_{2,k} = K_{k-1}; K_{3,k} = K_{k-1} + 2; K_{4,k} = K_{k-1} - 2$$

全局初始条件为

$$K_{1,0} = 0, K_{2,0} = 1, K_{3,0} = 2, K_{4,0} = 5$$

对每条弹道的跟踪进行了 50 次蒙特卡洛仿真, 距离、距离率、方位、仰角的平均绝对误差在图 3 中给出, 可以看到本文提出

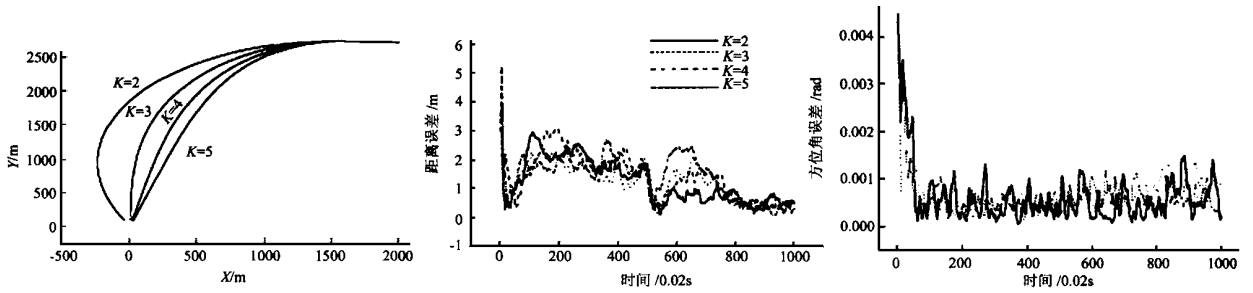


图 1 各条弹道的转弯部分

(a) 距离平均绝对误差

(c) 方位平均绝对误差

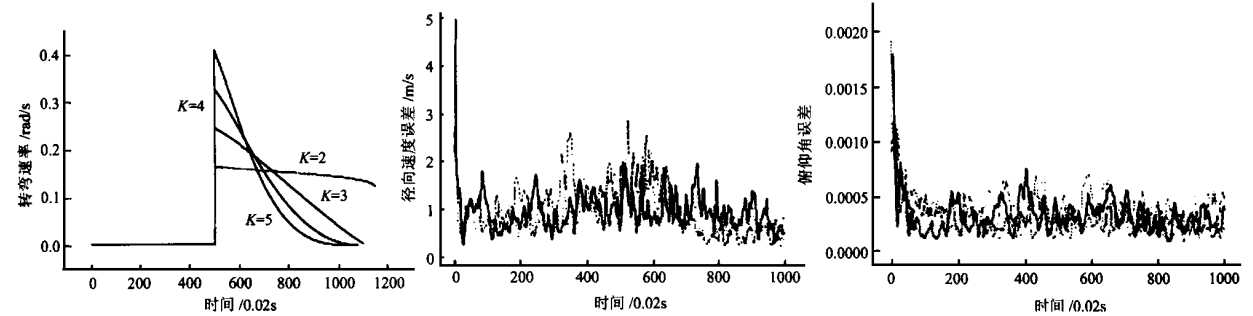


图 2 各条弹道转弯速率变化

(b) 径向速度平均绝对误差

(d) 俯仰平均绝对误差

图 3 对模拟导弹的跟踪结果

的方法可以对各条弹道进行稳定精确的跟踪.

6.2 对其它机动目标的跟踪

模拟与文[1]中相同的 S 形机动飞行目标, 并使用与上一节相同的传感器指标, 表 1 总结了用 TSAFG 和文[1]中采用 meaur jerk 模型进行跟踪的统计结果(模型参数和曲线从略).

表 1 对文[1]介绍的 S 形机动目标的跟踪性能(各个坐标方向的平均绝对跟踪误差, 50 次仿真)

	距离(m)	径向速度(m/s)	方位(毫弧度)	俯仰(毫弧度)
TSAFG	3.11	1.55	1.50	1.40
文[1]介绍的多模型滤波算法	4.02	1.71	1.70	1.43

模拟的跟踪结果统计表明 TSAFG 有更好的平均性能.

参考文献:

[1] W D Blair, G A Watson, T R Rice. Interacting multiple model filter for tracking maneuvering targets in spherical coordinates [A]. Conference Proceeding IEEE SOUTHEASTCON [C], 1991, Apr 8-10: 1055-1059.

[2] D' Souza, Christopher N, McClure, Mark A. Second order adaptive spherical target state estimation [A], Proceedings of American Control Conference [C], sponsored by AACC, Jun 21-23, 1995: 2153-2157.

[3] G A Watson, W D Blair. Interacting acceleration compensation algorithm for tracking maneuvering targets [J]. IEEE Transactions, Jun 1995, AES 31(3): 1152-1159.

[4] V P Jilkov, D S Angelova, TZ A Semerdjiev. Design and comparison of mode set adaptive IMM algorithm for maneuvering target tracking [J]. IEEE Trans. AES, January 1999, 35(1): 343-350.

[5] A Farina, F A Studer. Radar Data Processing [M], Research Studies Press LTD, (Volume I), 1985.

[6] E Daecipour, W D Blair, Y Bar-Shalom. Bias compensation and target elevation tracking with monopulse radars in the presence of multipath [J]. IEEE Trans, July 1997, AES-33(3): 863-882.

[7] Becker K. Closed form solution of pure proportional navigation [J]. IEEE Trans, May 1990, AES 26(3): 526-533.

作者简介:



张 岩 男, 1975 年生于北京. 北京理工大学电子工程系硕士研究生. 主要研究方向为雷达数据处理, 多传感器数据融合, 分布式信息处理系统.

高文春 男, 工程师, 北京理工大学电子工程系博士生, 研究方向为电子对抗, 系统效能分析, 多目标跟踪与信息融合, 目标识别.

龙腾 男. 1968 年生于河南洛阳, 1995 年获北京理工大学工学博士学位, 北京理工大学电子工程系教授, 主要研究方向为雷达系统, 高速实时数字信号处理.