

一种基于弹道模型的机动目标跟踪算法^{*}

张丕旭,石章松,刘 忠

(海军工程大学电子工程学院,武汉 430033)

摘 要:针对当前目标跟踪算法中跟踪模型与现代反舰导弹实际运动不匹配而影响跟踪精度的问题,根据反舰导弹的弹道特点,通过分析导弹受力情况和运动状态的关系,提出了一种基于弹道模型的机动目标跟踪算法,并针对高速跃升俯冲运动,分别与基于 CV、CA 模型的目标跟踪算法作了性能比较。仿真结果表明,该算法在原理上是正确可行的,可显著提高对高速强机动目标的跟踪性能。

关键词:弹道模型;跃升俯冲;目标跟踪;扩展卡尔曼滤波

中图分类号:TJ761.14 文献标志码:A

A Maneuvering Target Tracking Algorithm Based on Ballistic Model

ZHANG Pixu, SHI Zhangsong, LIU Zhong

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Focused on the tracking precision problem caused by mismatch of tracking model with the real movement of modern anti-ship missile in current algorithms, a maneuvering target tracking algorithm based on ballistic model was presented by analyzing the ballistic characteristics of anti-ship missile and the relationship between missile dynamics and the kinematics. Then, the performance of the algorithm was compared with target tracking algorithms based on CV and CA as for zoom and dive movement with high speed. The simulation results show that the method is right and feasible; the performance of tracking high speed and strong maneuvering targets can be improved significantly with the algorithm.

Keywords: ballistic model; zoom and dive; target tracking; extended Kalman filter

0 引言

在舰载反导系统中,对反舰导弹的精确跟踪是一项关键技术,数据处理算法中的 Kalman 滤波器是其核心。Kalman 滤波器要求有匹配良好的目标状态模型^[1],CV、CA 模型是将目标运动先验的定义为匀速(CV)和匀加速运动(CA),机动被看作是一种随机的输入,其大小体现在过程噪声的协方差矩阵中,这两种运动模型最为简单,而且发展较成熟,在跟踪算法中最常用^[2]。但随着反舰导弹性能的提高,超音速强机动模式的突防技术不断完善,现有的机动目标跟踪算法的预置模型不能完全满足要求,结果造成滤波器发散和跟踪性能的下降。如何针对反舰导弹的弹道特点建立跟踪模型是舰载反导跟踪算法中亟需解决的问题^[3-4]。

反舰导弹的运动是一个可控过程,在大气层内利用弹翼产生的升力平衡自身重量和做必要的机动飞行,由于受弹体自身结构强度和弹上仪器工作状况的限制,现代反舰导弹的机动过载限制在某一范围内,一般不超过 10。在做机动运动时,导弹通过弹体操纵机构的偏转,改变受力状态,进而实现运动参数的变化,文中从分析导弹受力情况和运动状态的关系着手,提出了一种基于弹道模型的机动目标跟踪算法,并针对跃升俯冲运动,分别与基于 CV、CA 模型的目标跟踪算法作了性能比较。

1 导弹机动弹道建模

由动力学规律可知,导弹的运动是由其质心运动和绕其质心的转动所组成的^[5],但在研究导弹的飞行弹道及跟踪模型时,可将导弹简化为可

^{*} 收稿日期:2008-08-03

基金项目:湖北省自然科学基金(2006ABA010)资助

作者简介:张丕旭(1984-),男,山东即墨人,硕士研究生,研究方向:目标定位与跟踪。

操纵质点,则描述作用在导弹上的力与导弹运动参数之间关系的导弹运动方程组可表示为:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = g \cdot (n_x - \sin \theta) \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V} \cdot (n_y - \cos \theta) \\ \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{g}{V \cdot \cos \theta} \cdot n_z \\ \frac{dx}{dt} = V \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \\ \frac{dy}{dt} = V \cdot \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = -V \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: V 为导弹速度; g 为重力加速度; n_x 为切向过载,是过载矢量在速度方向上的投影; n_y 、 n_z 为法向过载,是过载矢量在垂直于速度方向上的投影; θ 为弹道倾角; φ 为弹道偏角; x 、 y 、 z 为导弹在直角坐标系中的坐标。

为简捷的说明问题,建立导弹铅垂平面内的机动弹道模型,导弹运动方程组为:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = g \cdot (n_x - \sin \theta) \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V} \cdot (n_y - \cos \theta) \\ \frac{dx}{dt} = V \cdot \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} = V \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

$$\Phi(k+1, k) = \left. \frac{\partial f(\mathbf{X}(k), k)}{\partial \mathbf{X}(k)} \right|_{\mathbf{X}(k) = \mathbf{X}(k/k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \\ \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \\ \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \\ \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -gT \cdot \cos \theta(k) & 0 & 0 \\ \frac{-gT \cdot [n_y(k) - \cos \theta(k)]}{V(k)^2} & 1 + \frac{gT}{V(k)} \cdot \sin \theta(k) & 0 & 0 \\ -T \cdot \cos \theta(k) & V(k) \cdot T \cdot \sin \theta(k) & 1 & 0 \\ T \cdot \sin \theta(k) & V(k) \cdot T \cdot \cos \theta(k) & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$U(k) = f(\mathbf{X}(k/k), k) - \left. \frac{\partial f(\mathbf{X}(k), k)}{\partial \mathbf{X}(k)} \right|_{\mathbf{X}(k) = \mathbf{X}(k/k)} \cdot \mathbf{X}(k/k) \quad \mathbf{W}(k) \quad (7)$$

则得线性化的状态方程:

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi(k+1, k) \cdot \mathbf{X}(k) + U(k) +$$

导弹在末端的跃升俯冲攻击弹道,基本是在铅垂平面内,其弹道示意图如图 1 所示。

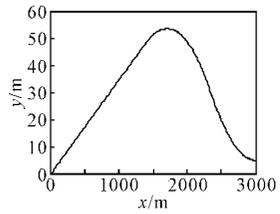


图 1 跃升俯冲攻击弹道示意图

2 基于弹道模型的机动目标跟踪算法

弹道模型(2)反映了导弹铅垂平面内运动的动力学规律,通过力学参数 n_x 、 n_y 的不同组合,可以描述铅垂面内不同的机动模式。运用数值微分的方法,对式(2)做离散化处理,可得:

$$\begin{cases} \mathbf{V}(k+1) = \mathbf{V}(k) + gT \cdot [n_x(k) - \sin \theta(k)] + \omega_1(k) \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \frac{gT}{V(k)} \cdot [n_y(k) - \cos \theta(k)] + \omega_2(k) \\ x(k+1) = x(k) + V(k) \cdot T \cdot \cos \theta(k) + \omega_3(k) \\ y(k+1) = y(k) + V(k) \cdot T \cdot \sin \theta(k) + \omega_4(k) \end{cases} \quad (3)$$

取 $\mathbf{X}(k) = [V(k) \ \theta(k) \ x(k) \ y(k)]^T$, 式(3)可表示为:

$$\mathbf{X}(k+1) = f(\mathbf{X}(k), k) + \mathbf{W}(k) \quad (4)$$

式(4)是非线性的,对其做线性化处理,令

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \\ \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \\ \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(3)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \\ \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(1)}(k)} & \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(2)}(k)} & \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(3)}(k)} & \frac{\partial f^{(4)}}{\partial \mathbf{X}^{(4)}(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -gT \cdot \cos \theta(k) & 0 & 0 \\ \frac{-gT \cdot [n_y(k) - \cos \theta(k)]}{V(k)^2} & 1 + \frac{gT}{V(k)} \cdot \sin \theta(k) & 0 & 0 \\ -T \cdot \cos \theta(k) & V(k) \cdot T \cdot \sin \theta(k) & 1 & 0 \\ T \cdot \sin \theta(k) & V(k) \cdot T \cdot \cos \theta(k) & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{W}(k)$ 是过程噪声,与量测噪声和初始状态独立,为零均值的高斯白噪声,统计特性为:

$$E[\mathbf{W}(k)] = 0, E[\mathbf{W}(k) \cdot \mathbf{W}^T(j)'] = \mathbf{Q}(k) \cdot \delta_{kj}$$

对于铅垂面内的运动,雷达观测量有两个,斜距 d 和俯仰角 ϵ ,斜距和俯仰角的量测误差标准差

分别为 σ_d 和 σ_ϵ , 将雷达测量转换到笛卡尔坐标系^[6], 测量值 $Z = [d \cdot \cos \epsilon \quad d \cdot \sin \epsilon]^T$, 则量测方程为:

$$Z(k) = H(k) \cdot X(k) + V(k) \quad (8)$$

其中: $H(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $V(k)$ 是笛卡尔坐标系中的量测噪声, 与过程噪声和初始状态独立, 为零均值的高斯白噪声, 其协方差矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中:

$$\sigma_x^2 = \sigma_d^2 \cdot \cos^2 \epsilon + d^2 \cdot \sigma_\epsilon^2 \cdot \sin^2 \epsilon$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_d^2 \cdot \sin^2 \epsilon + d^2 \cdot \sigma_\epsilon^2 \cdot \cos^2 \epsilon$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_d^2 \cdot \cos \epsilon \cdot \sin \epsilon + d^2 \cdot \sigma_\epsilon^2 \cdot \cos \epsilon \cdot \sin \epsilon$$

运用扩展卡尔曼滤波^[6], 得到如下滤波方程:

$$\hat{X}(k/k-1) = \Phi(k, k-1) \cdot X(k-1/k-1) + U(k-1) = f(X(k-1/k-1), k-1)$$

$$P(k/k-1) = \Phi(k, k-1) \cdot P(k-1/k-1) \cdot \Phi^T(k, k-1) + \Gamma(k, k-1) \cdot Q(k-1) \cdot \Gamma^T(k, k-1)$$

$$K(k) = P(k/k-1) \cdot H^T(k) \cdot [H(k) \cdot P(k/k-1) \cdot H^T(k) + R(k)]^{-1}$$

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k/k-1) + K(k) \cdot [Z(k) - H(k) \cdot \hat{X}(k/k-1)]$$

$$P(k/k) = [I - K(k) \cdot H(k)] \cdot P(k/k-1) \quad (10)$$

3 仿真计算

定义如下性能指标:

$$\text{均方差: } RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}(i) - X(i))^2}$$

相对误差压缩比:

$$RECR = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}(i) - X(i))^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z(i) - X(i))^2}}$$

$$\text{反应时间: } RT = \frac{\text{运行时间}}{\text{数据采样个数}}$$

其中, $\hat{X}(i)$, $X(i)$, $Z(i)$ 分别为 i 时刻的滤波值、理论值、观测值。

假设导弹飞行过程中的过载矢量是已知的, 则状态转移矩阵中的参数 n_x, n_y 是已知的, 式(7)所描述的跟踪模型可以反映导弹在铅垂面内的运

动情况。针对导弹末端的高速跃升俯冲运动, 对基于弹道模型的机动目标跟踪算法与基于 CV、CA 模型的目标跟踪算法的性能作比较研究, 使用 Matlab 语言进行编程并仿真, 设置仿真初始条件如下:

导弹开始跃升机动时的坐标为 (2000m, 5m), 速度为 850m/s; 雷达测距误差为 10m, 测角误差为 1.5mrad; 采样间隔为 0.01s; 滤波初值 $X(0/0)$ 取初始时刻的观测值。

基于弹道模型的目标跟踪算法仿真结果如图 2 ~ 图 6 所示, 三种算法的性能比较结果如表 1。在同等计算机硬件平台上, 三种算法程序运行的反应时间变化较小, 同时基于弹道模型的目标跟踪算法与基于 CV、CA 模型的目标跟踪算法相比, 对机动目标的跟踪性能有较大提高。由此可见, 该算法在原理上是正确可行的。

表 1 三种算法的性能比较

	x 的均方差 RMSE/m	x 的相对误差 压缩比 RECR	y 的均方差 RMSE/m	y 的相对误差 压缩比 RECR	反应时间 RT/ms
基于 CV 模型的目标跟踪算法	43.6716	4.5606	0.2493	1.2103	14.4
基于 CA 模型的目标跟踪算法	31.4290	3.1526	0.2126	0.6917	14.5
基于弹道模型的目标跟踪算法	3.7087	0.4060	0.0848	0.3396	14.8

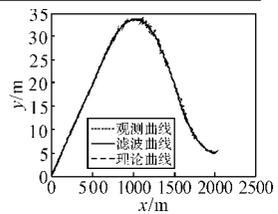


图 2 导弹轨迹跟踪效果图

在实际作战环境中, 我方对于来袭反舰导弹飞行过程中的过载矢量是未知的, 即状态转移矩阵中的参数 n_x, n_y 是变化的, 这时, 可以在滤波过程中在线辨识参数 n_x, n_y , 实时更新滤波模型, 依然可以完成对机动目标的高精度跟踪。

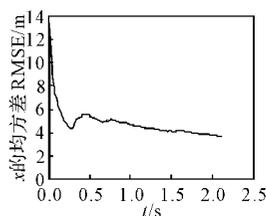


图 3 x 的均方差曲线

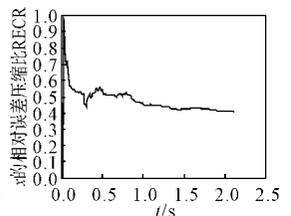


图 4 x 的相对误差压缩比曲线

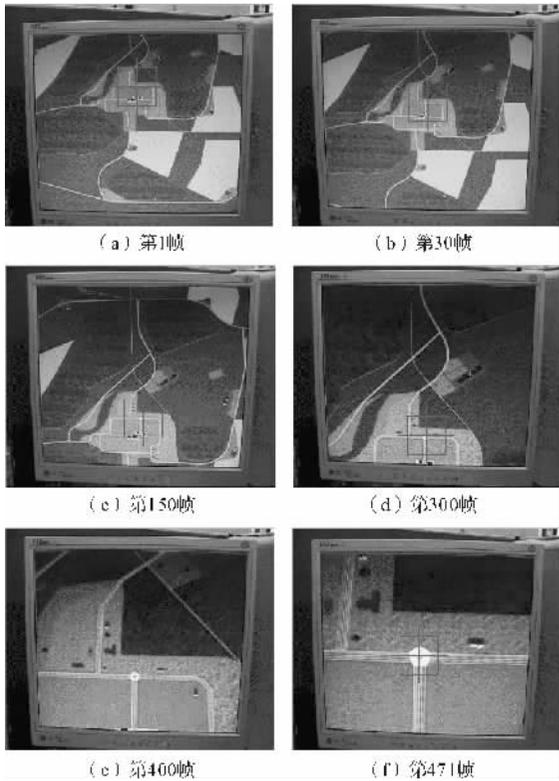


图 2 文中算法的图像跟踪过程

参考文献:

[1] Gianluca Marsiglia, Luca Fortunato, Aurora Ondini, et al. Template matching techniques for automatic IR target recognition in real and simulated scenarios: tests and evaluations[C]// Proceedings of SPIE 2003, Vol. 5094:159-169.

[2] 牛轶峰,伯晓晨,沈林成. 基于可变模板的前视目标跟踪算法[J]. 国防科技大学学报, 2003 (5): 81-86.

[3] 阎青, 张桂林, 张鹏. 基于 DSP 的实时图像目标搜索与跟踪系统设计[J]. 微计算机信息, 2005 (21): 90-92.

[4] 段德军, 向建勇, 孙勃. 基于 FPGA 的实时图像跟踪系统[J]. 红外技术, 2004, 26(5): 58-61.

[5] 沈胜宏, 韩月秋. 基于多 DSP 和 FPGA 的高速并行互相关图像跟踪技术[J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(1): 98-101.

(上接第 57 页)

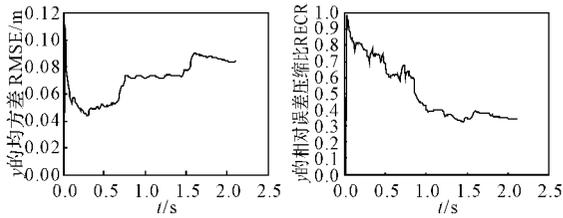


图 5 y 的均方差曲线 图 6 y 的相对误差压缩比曲线

4 结论

文中针对反舰导弹的弹道特点,从分析导弹受力情况和运动状态的关系着手,提出了一种基于弹道模型的机动目标跟踪算法,该算法的预置模型可以很好地适应导弹的机动运动。最后针对跃升俯冲运动,对该算法分别与基于 CV、CA 模型的目标跟踪算法作了性能比较。仿真结果表明,该算法在原理上是正确可行的,可在相同的反应时间下,显著提高对高速强机动目标的跟踪性能。

参考文献:

[1] 高文春,张岩,龙腾,等. 舰载反导跟踪算法与模型分析[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(8): 48-51.

[2] 李新国,方群. 有翼导弹飞行动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2004.

[3] X Rong Li, Vesselin P Jilkov. A survey of maneuvering target tracking part I: Dynamic models[J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1333-1363.

[4] X. Rong Li, Vesselin P Jilkov. A survey of maneuvering target tracking part II: Ballistic target models[C]// Proc. 2001 SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets, San Diego, CA, USA, 2001, 4473: 559-581.

[5] 潘平俊,冯新喜,赵晓明. 机动目标模型研究与发展综述[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(3): 112-115.

[6] 巫春玲,韩崇昭. 用于弹道目标跟踪的有限差分扩展卡尔曼滤波算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 143-146.