

基于机动频率自适应的目标跟踪算法

任少伟, 王睿, 张平定

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:利用观测新息在目标机动时发生变化的信息,设计了一种自适应的机动目标跟踪算法,通过对目标状态误差的估计,从而自适应的改变机动频率,使跟踪算法与目标的真实状态更接近,该算法具有运算量小、跟踪精度高、易于工程化实现的特点。

关键词:机动目标跟踪;机动频率;自适应

中图分类号:TP13 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)05-0032-04

机动目标跟踪是目标跟踪中的一个难题,主要是由于目标的机动是不可预测的。近年来机动目标的跟踪理论主要有以 singer 模型为代表的全局优化模型、以交互多模型算法 IMM 为代表的多模型算法,周宏仁在 singer 模型基础上提出了机动目标的“当前”统计模型。这些方法各有优劣, singer 模型考虑了目标所有机动变化的可能,适合于各种类型的机动目标,但是针对具体的情况精度不高, IMM 是性能代价比最高的机动目标算法之一,但是跟踪性能不但与所选的模型有关,运算量将随着模型集的增大线性增长,不易于工程实现,“当前”模型在跟踪阶跃机动时存在稳态误差, singer 模型与“当前”模型对于目标机动频率的确定都是事先根据对目标的估计状态而确定,如果目标机动时与估计状态不符,会产生比较大的误差。本文根据目标机动时观测新息会发生变化这一特点,提出一种易于工程化实现的自适应跟踪算法,该算法能够根据空中目标的状态自适应的调整机动频率。

1 模型的假设

由于“当前”模型采用了非零均值和修正瑞利分布表征机动加速度特性,它比较真实的反映了机动目标机动范围和强度的变化,比较切合实际,因此本文采用了“当前”模型,在“当前”模型中目标加速度状态变量的估计值等于状态噪声的均值与目标机动频率 α (加速度时间常数的倒数)倒数的乘积^[1]。所以可以通过调整机动频率 α 来改变对目标加速度的估计值。但是当采用的模型与实际的模型不相符时,会使系统的误差变大,有可能造成目标丢失,在此,通过对目标状态误差的估计而自适应的选择 α ,从而提高估计的精度。估计的模型如图 1 所示。

从图 1 可以看出,机动频率 α 的调整,主要利用了观测新息在目标机动时发生变化这一特点,根据滤波新息的变化,自适应调整机动频率 α ,从而达到调整状态转移矩阵和状态协方差矩阵的目的。

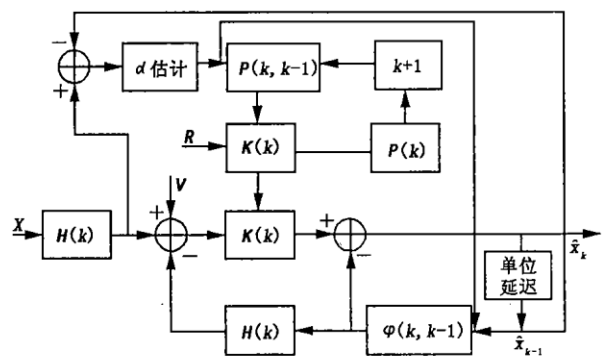


图1 机动频率自适应估计模型

收稿日期:2004-03-19

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:任少伟(1968-),男,河北唐山人,硕士生,主要从事信号信息处理、C³I系统效能评估研究。

2 自适应卡尔曼滤波算法

目标的离散状态方程为^[1-2]

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi(k+1, k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{U}(k)\bar{\mathbf{a}} + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 为目标的状态; $\mathbf{w}(k)$ 为系统状态噪声; $E[\mathbf{w}(k)] = 0$; $\mathbf{Q}(k) = E[\mathbf{w}(k) \cdot \mathbf{w}'(k)]$; α 为目标机动频率。目标状态转移矩阵为

$$\Phi(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha^2}(1 - e^{-\alpha T}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

输入矩阵为

$$\mathbf{U}(K) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2}(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{2}) \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}(k) = E[\mathbf{w}(k) \cdot \mathbf{w}'(k)] = [q_{ij}]_{3 \times 3} \text{ 是对称阵, 其中: } q_{11} = \frac{\sigma_a^2}{\alpha^4} [1 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T + \frac{2\alpha^2 T^3}{3}] - 2\alpha^2 T^2 - 4\alpha T e^{-\alpha T}; q_{12} = \frac{\sigma_a^2}{\alpha^3} [e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T} + 2\alpha T e^{-\alpha T} - 2\alpha T + \alpha^2 T^2]; q_{13} = \frac{\sigma_a^2}{\alpha^2} [1 - e^{-\alpha T} - 2\alpha T e^{-\alpha T}]; q_{22} = \frac{\sigma_a^2}{\alpha^2} [4e^{-\alpha T} - 3 - e^{-\alpha T} + 2\alpha T]; q_{23} = \frac{\sigma_a^2}{\alpha} [e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T}]; q_{33} = \sigma_a^2 [1 - e^{-2\alpha T}].$$

观测方程为

$$\mathbf{Z}(K) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}(k) = [1 \ 0 \ 0]$ 为观测矩阵; $\mathbf{v}(k)$ 为观测噪声, $E[\mathbf{v}(k)] = 0$, $\mathbf{R}(k) = E[\mathbf{v}(k) \cdot \mathbf{v}'(k)]$ 。

则基于式(1)、(2)的 kalman 滤波方程如下^[2]:

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

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \Phi(\alpha, T)\hat{\mathbf{X}}(k|k) + \mathbf{U}(k)\bar{\mathbf{a}}$$

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

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \Phi(\alpha, T)\mathbf{P}(k|k)\Phi(\alpha, T) + \mathbf{Q}(k)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = [I - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{P}(k+1|k)$$

3 目标跟踪机动频率的自适应算法

由于状态转移矩阵 Φ 和噪声矩阵 \mathbf{Q} 都含有机动频率 α 。所以通过改变 α , 达到调整 Φ 和 \mathbf{Q} 的目的, 使其更接近于目标的真实状态。

根据经验, α 的取值范围为: 转弯机动 $\alpha = 1/60$, 逃避机动 $\alpha = 1/20$, 大气扰动 $\alpha = 1$, 通常在进行状态滤波时, 根据经验事先确定 α 的值^[1,3,4]。

目标的新息向量为

$$\mathbf{d}(k) = \mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k|k-1)$$

$\mathbf{d}(k)$ 是均值高斯白噪声过程, 且其协方差矩阵为

$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)$$

定义距离函数为

$$\mathbf{D}(k) = \mathbf{d}^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k)\mathbf{d}(k)$$

由新息序列的统计性质可知, $D(k)$ 服从自由度为 m 的 χ^2 分布。如果目标发生机动, 新息 $d(k)$ 将不是零均值高斯白噪声, $D(k)$ 将会变大, 因而可用下述方法检测机动的发生与消除。取 $D(k)$ 大于某一门限 M 的概率为 P_f , 即:

$$P\{D(k) > M\} = P_f$$

式中, P_f 为允许的虚警概率。此时, α 的自适应选择为^[5-6]:

当 $D(k) > M$ 时, 表明目标机动发生, 增大 α 的取值; 当 $D(k) < M$ 时, 表明目标机动消除, 减小 α 的取值; 在工程中, 为了简化 α 的取值, 我们作简化计算:

$$\alpha = \frac{D(k)}{M} \cdot \alpha$$

在目标跟踪过程中, 可事先取定 α 的经验值为 $1/20$, 进行 α 的调整时, 并不是每步都估计状态的距离函数, 一般是在 $3 \sim 5$ 步才估计状态的距离函数, 进行 α 的调整。

4 仿真实验

假设空中目标, 飞行速度 $V = 300 \text{ m/s}$, 飞行加速度 $a = 10 \text{ m/s}^2$, 在空中作机动飞行。在 $0 \sim 6 \text{ s}$ 时, 目标作匀速飞行; 在 $7 \sim 15 \text{ s}$, 目标作加速度飞行; 在 $16 \sim 36 \text{ s}$, 目标作逆时针方向的转弯机动, 转弯半径 $R = 3000 \text{ m}$, 在 $T = 1 \text{ s}$, 目标作顺时针方向的转弯机动, 转弯半径 $R = 3000 \text{ m}$ 。设雷达的测量周期为 $T = 1 \text{ s}$, 测量方差

$R = 0.12 \text{ km}^2$ 。在两个坐标轴上的初始状态为: $x_0 = 100, y_0 = 300, P_0 = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$ 。并设初始机动频率 $\alpha =$

$1/120$, 分别对机动频率固定和机动频率自适应两种情况进行了仿真分析。

当机动频率固定时, 仿真得到的目标飞行曲线和误差曲线分别如图 2、3 所示。

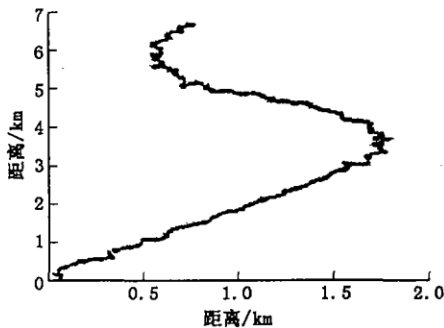


图2 目标飞行曲线

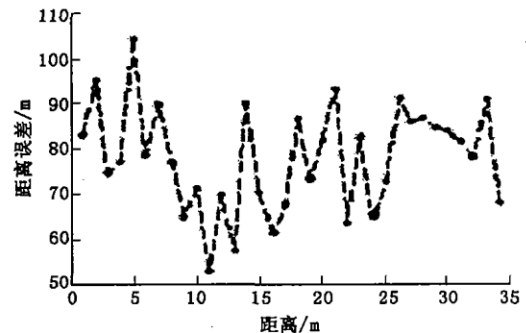


图3 目标距离误差曲线

当机动频率自适应变化时, 仿真条件同上, 得到的目标飞行曲线和误差曲线如图 4 和图 5 所示。

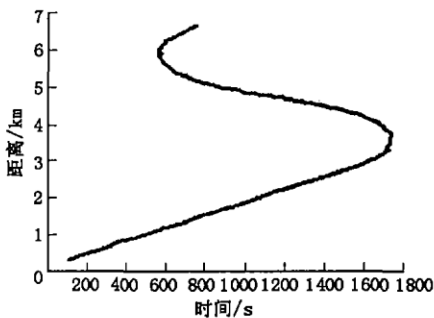


图4 目标飞行曲线

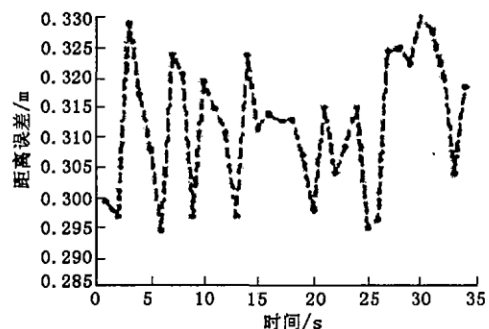


图5 目标距离误差曲线

由图 3 和图 5 的误差曲线可看出: 采用固定频率的目标机动模型跟踪机动目标时, 当目标作匀速运动时, 跟踪误差较小。但当目标作加速运动时, 会引起较大的跟踪误差, 且在跟踪过程中, 跟踪误差始终在作剧烈的震荡, 从仿真结果来看, 距离误差约在 80 m 左右。而采用自适应的机动频率跟踪模型, 在匀速和加速运

动时,跟踪误差都比较小,本文仿真结果距离误差约为0.3 m,且跟踪误差迅速稳定,具有良好的跟踪性能。

5 结论

采用机动频率自适应的机动目标跟踪模型,在算法时间增加不大的情况下,能较好地跟踪机动目标,具有一定的实用性,也比较易于工程化实现。

参考文献:

- [1] 周宏仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
- [2] A. 费利那, F. A. 斯塔德. 雷达数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
- [3] 柏 箬,刘建业,袁 信. 模糊自适应卡尔曼滤波技术研究[J]. 信息与控制,2002,31(3):193-197.
- [4] 何 衍,将静坪,张国宏. 基于新息偏差的自适应机动目标跟踪算法[J]. 信息与控制,2001,30(4):333-336.
- [5] 高 勤,李志强,都学新. 一种新型卡尔曼滤波算法[J]. 现代雷达,2001,(6):29-34.
- [6] 李 彬,王 睿. 基于数据关联性能的跟踪算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(4):56-58.

(编辑:田新华)

An Adaptive Algorithm of Maneuvering Targets Tracking Based on Maneuvering Frequency

REN Shao-wei, WANG Rui, ZHANG Ping-ding

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: When a certain maneuvering target is inputted, the bias information will change, based on this fact, an adaptive algorithm is designed. According to the residuals of target tracking, the maneuvering frequency of the target is adaptively adjusted, so that the maneuvering frequency is close to the true state of the target. Simulation results show that the tracking error of this model is less, and the algorithm is characterized by simple calculation, high tracking precision and easy realization.

Key words: maneuvering target tracking; maneuvering frequency; adaptive