

改进的截断正态概率密度模型自适应滤波算法

汪云, 刘昌云, 张纳温, 杨皓云

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 应用当前统计模型跟踪机动目标时,模型参数机动频率和加速度极限值需要根据经验事先设定,在假设不准确的情况下,大大降低了模型的跟踪精度。针对此问题,基于截断正态概率密度模型,提出了一种新的参数自适应跟踪滤波算法。该模型算法通过使用距离函数来表征目标进行机动的强弱状况,采用指数型调整函数自适应调整目标的加速度极限值和机动频率,从而实现了系统状态噪声和滤波增益的自适应调整,提高了机动模型与目标实际机动情况的匹配程度,提升了滤波器的跟踪性能。仿真结果表明:与常规 ACS 和 TGPMKF 算法相比,新算法在跟踪机动目标时,性能更优。

关键词 截断正态概率密度模型;距离函数;调整函数;机动频率;加速度极限值;自适应滤波

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.010

中图分类号 TP202+.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0040-04

An Improved Adaptive Filtering Algorithm Based on Truncation Gauss Probability Model

WANG Yun, LIU Chang-yun, ZHANG Na-wen, YANG Hao-yun

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Using current statistical model for maneuvering target tracking has a good effect. However, maneuvering frequency and ultimate acceleration are defaulted by human's experience. When the given parameters are not accordant with actual situation, the capacity of tracking maneuvering target will decline. In view of the problem that the tracking performance of model is dependent on the prior parameters, this paper puts forward an adaptive tracking algorithm based on truncation gauss probability model for target tracking. In this model, the maneuvering situation of targets is characterized by the distance function, the status yawp and filtering gain of model is adaptively adjusted by using the exponential adjustment function to modulate maneuvering frequency and ultimate acceleration, which can improve the matching degree between maneuvering target model and the actual movement of the target. According to the simulation results, the capacity of tracking maneuvering target is improved, comparing TGPNMKF with ACS and TGPMKF.

Key words: truncation gauss probability model; distance function; adjustment function; maneuvering frequency; ultimate acceleration; adaptive filtering

收稿日期:2012-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102109)

基金项目:汪云(1989-),男,江西上饶人,硕士生,主要从事目标跟踪研究. E-mail:wangyun1989911@163.com

建立与目标运动状态相匹配的机动模型是进行机动目标跟踪研究的关键问题,周宏仁教授在 Singer 模型的基础上提出了当前统计模型滤波算法^[1]。该模型算法采用非零均值和修正瑞利分布来表征机动加速度的特性,是现阶段较为实用的模型之一。然而,模型参数目标机动频率和加速度极限值需要事先根据经验假定,当参数假定值与实际值不符时,模型跟踪性能明显下降。蔡庆宇教授提出一种关于目标加速度的截断正态概率密度模型,该模型假设目标机动加速度的“当前”概率密度函数为截断正态分布密度函数,解决了修正瑞利分布密度模型在跟踪变加速机动目标时存在的跟踪滞后问题^[2],但是该模型的系统参数,机动频率和机动加速度极限值在跟踪过程中也无法实现自适应调整。

基于上述问题,本文提出了一种改进的基于截断正态概率密度模型参数自适应调整的滤波算法。

1 机动目标截断正态概率密度模型及其自适应滤波算法

根据切比雪夫不等式可知,当随机变量服从正态分布时^[3],随机变量与其数学期望的偏差落在3倍均方差范围之外的概率上限为0.003,因此假设:

$$|a_{\max} - \bar{a}| = 3\delta_a, \delta_a^2 = \frac{(a_{\max} - \bar{a})^2}{9} \quad (1)$$

式中: a_{\max} 为目标加速度极限值; δ_a^2 为加速度方差; \bar{a} 为加速度均值。

设采样周期为 T ,一维情况下的正态截断概率密度模型离散状态方程为^[4]:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k+1, k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{U}(k) \bar{a} + \mathbf{W}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad \ddot{x}(k)]^T$; $\mathbf{W}(k)$ 为高斯状态噪声,其均值为零,方差为 $\mathbf{Q}(k)$;

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

$$\mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha}(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha}) \\ T - (1 - e^{-\alpha T})/\alpha \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

观测方程为:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}(k) = [1 \quad 0 \quad 0]$; $\mathbf{V}(k)$ 为高斯观测噪声,其均值为零,方差为 $\mathbf{R}(k)$ 。

采用状态方程(2)和观测方程(4),可得标准卡

尔曼滤波方程,具体步骤见文献[5]。

当把 $\ddot{x}(k/k-1)$ 看作在 k_T 瞬时的当前加速度: $\bar{a}(k) = \ddot{x}(k/k-1)$,则由式(1)和式(3)可得:

$$\delta_a^2 = (a_{\max} - |\ddot{x}(k/k-1)|)^2/9 \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1/k) = \mathbf{F}_1(T) \hat{\mathbf{X}}(k/k)$$

$$\mathbf{F}_1(T) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 基于截断正态概率密度模型改进的自适应滤波算法

由式(3)和式(5)可以看出:状态矩阵 \mathbf{F} 受机动频率 α 的影响,加速度极限值和机动频率作为变量,共同决定系统状态噪声协方差的大小。然而,目标机动频率和加速度极限值,往往都是人为事先假定的^[6]。

针对上述问题,本文通过使用距离函数提出改进的截断正态概率密度模型自适应滤波算法,简记作 TGPNMKF。由新息理论可知新息向量^[7]:

$$\mathbf{d}(k) = \mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}(k) \hat{\mathbf{X}}(k/k-1) \quad (7)$$

其协方差矩阵为:

$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{P}(k/k-1) \mathbf{H}(k)^T + \mathbf{R}(k) \quad (8)$$

定义距离函数:

$$\mathbf{D}(k) = \mathbf{d}^T(k) \mathbf{S}^{-1}(k) \mathbf{d}(k) \quad (9)$$

由新息的统计特性可知, $\mathbf{D}(k)$ 服从自由度为 m 的 χ^2 分布。在目标进行机动时, $\mathbf{d}(k)$ 不再是零均值高斯白噪声过程, $\mathbf{D}(k)$ 也会增大。因此,本文采用 $\mathbf{D}(k)$ 表征目标发生机动的强弱情况,选取指数函数为调整函数^[8]。当目标进行较弱机动时, $\mathbf{D}(k)$ 较小,模型参数较小且变化较缓慢;当目标进行较强机动时, $\mathbf{D}(k)$ 增大,模型参数变化速度随之增大。

使用下述方法检测机动的强弱, $\mathbf{D}(k)$ 服从 χ^2 分布,设 n 为虚警概率,其表示将目标进行弱机动判定为强机动的概率。取较小数值 $n=0.05$,并把函数值 $N=4.6$ 作为机动强弱的临界点。选择 $M = \exp(\mathbf{D}(k)/N-1)$ 作为调整函数^[9]。模型参数自适应调整的表达式为:

$$\begin{cases} \alpha(k) = \alpha_0 \exp(\mathbf{D}(k)/N-1) \\ a_{+\max}(k) = a_{+\max 0} \exp(\mathbf{D}(k)/N-1) \\ a_{-\max}(k) = a_{-\max 0} \exp(\mathbf{D}(k)/N-1) \end{cases} \quad (10)$$

式中: α_0 为目标初始机动频率; $a_{+\max 0}$ 、 $a_{-\max 0}$ 分别为加速度的正负极限值。

据式(1)、式(3)和式(5),得机动频率调整后状态转移矩阵、状态输入矩阵、加速度方差分别为:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & T & \frac{(-1 + \alpha(k)T + e^{-\alpha(k)T})}{\alpha(k)^2} \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\alpha(k)T})/\alpha(k) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha(k)T} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$U(k) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\alpha(k)}(-T + \frac{\alpha(k)T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha(k)T}}{\alpha(k)}) \\ T - (1 - e^{-\alpha(k)T})/\alpha(k) \\ 1 - e^{-\alpha(k)T} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\delta_a^{\pm} = \begin{cases} \frac{(a_{+max}(k) - \dot{x}(k/k-1))^2}{9}, & \dot{x}(k/k-1) \geq 0 \\ \frac{(a_{-max}(k) + \dot{x}(k/k-1))^2}{9}, & \dot{x}(k/k-1) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

在目标机动频率和加速度极限值调整后^[10],可自适应调整系统状态噪声并且确定前一时的一步预测均方误差矩阵,在系统量测噪声协方差矩阵 $R(k)$ 确定后,卡尔曼滤波增益由机动频率和加速度极限值决定。由式(10)分析可得,目标机动较弱时, $M < 0$, 机动频率和加速度极限值减小,进而减小卡尔曼滤波增益;目标机动较强时, $M > 0$, 机动频率和加速度极限值迅速增大,进而增大卡尔曼滤波增益。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

为验证所提算法的有效性,将本文给出的 TGPNMKF 算法与自适应当前统计模型(ACS)和常规的基于截断正态概率密度模型的自适应滤波算法(TGPMKF)进行比较,在直角坐标系下采用蒙特卡罗实验方法检验算法对目标的跟踪性能。目标运动时间过程为 120 s,采样周期为 1 s,目标初始状态为 $X_0 = [60\ 000\ m \quad -400\ m/s \quad 30\ 000\ m \quad 0\ m/s]$,假定初始机动频率 $\alpha_0 = 1/60$, X 轴, Y 轴的量测噪声均值为零,标准差为 100 m 的高斯白噪声,目标机动情况见表 1。

表 1 目标机动情况

Tab. 1 Situation of maneuvering target

加速度/(m·s ⁻²)	机动时刻/s				
	22	37	55	81	96
X	13	-10	8	0	-9
Y	-10	17	-20	31	-10

3.2 评估指标

进行蒙特卡罗仿真实验,可得均方根误差:

$$RMSE(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{ij} - \hat{x}_{ij}^k)^2} \quad (14)$$

平均均方根误差:

$$RMSE_a = \frac{1}{m} \sum_{m_i=1}^m RMSE(k) \quad (15)$$

式中: x_{ij} 为状态向量的第 i 个分量的第 j 次采样值; \hat{x}_{ij}^k 为第 k 次仿真的第 i 个分量的第 j 次采样值; N 为仿真次数。

3.3 仿真结果及分析

共进行了 100 次 Monte-Carlo 仿真。仿真结果见图 1~图 3。

由图 1 可知, TGPNMKF 模型的航迹滤波结果比 ACS 和 TGPMKF 模型更接近真实航迹。

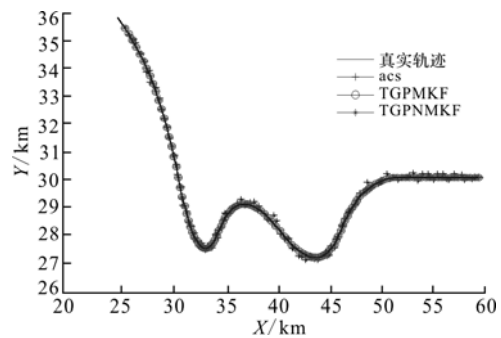
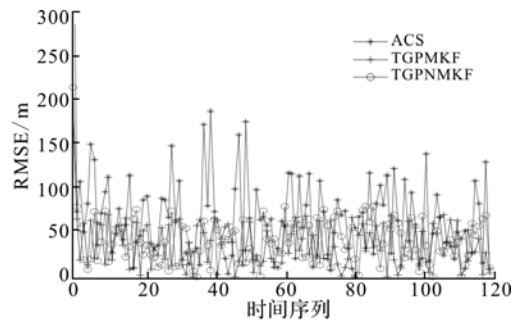


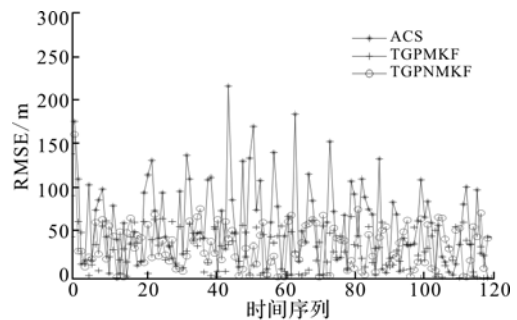
图 1 理想航迹图

Fig. 1 Track of target

仿真实验 1: 假设目标机动加速度极限值为 20 m/s², 仿真结果见图 2。



(a) X轴方向的位移均方根误差



(b) Y轴方向的位移均方根误差

图 2 3种模型航迹跟踪位移均方根误差比较

Fig. 2 Comparison of RMSE in X and Y direction

仿真实验 2: 假设目标机动加速度极限值为 80 m/s² 仿真结果见图 3。

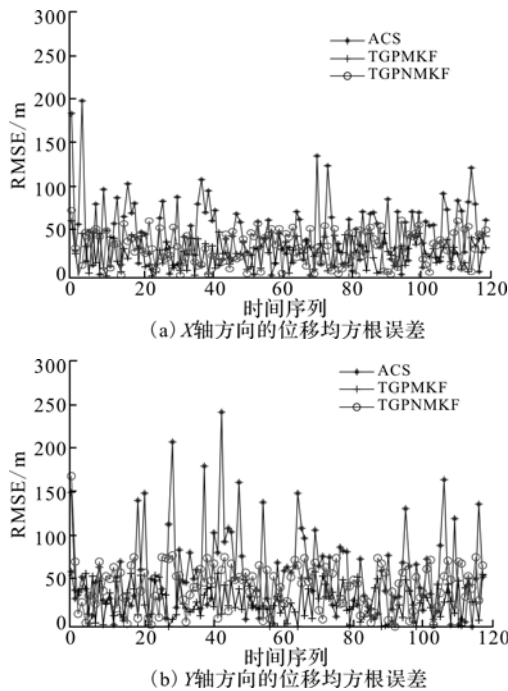


图 3 3 种模型航迹跟踪位移均方根误差比较
Fig.3 Comparison of RMSE in X and Y direction

仿真实验的跟踪误差统计见表 2。

表 2 3 种模型的平均均方根误差

Tab.2 Comparison of RMSE_a

模型	ACS	TGPMKF	TGPNMKF
X 轴 RMSE _a ($a_{max}=20 \text{ m/s}^2$)/m	94.71	79.24	62.25
Y 轴 RMSE _a ($a_{max}=20 \text{ m/s}^2$)/m	103.67	86.69	68.43
X 轴 RMSE _a ($a_{max}=80 \text{ m/s}^2$)/m	76.46	63.89	55.61
Y 轴 RMSE _a ($a_{max}=80 \text{ m/s}^2$)/m	81.58	74.34	61.58

由仿真实验可得 TGPNMKF 模型的位移均方根误差要小于 ACS 和 TGPMKF 模型。由表 2 可知,当目标机动加速度极限值符合实际时,目标跟踪精度提高。2 种加速度极限值假设下,TGPNMKF 模型的平均均方根误差都要小于 ACS 和 TGPMKF 模型,新模型算法的跟踪精度更高。

4 结语

本文基于截断正态概率密度模型改进的参数自适应滤波算法,使用距离函数来表征目标进行机动的强弱状况,采用指数型调整函数自适应调整目标的加速度极限值和机动频率,从而实现了系统状态噪声和滤波增益的自适应调整,提高了机动模型与目标实际机动情况的匹配程度,具有良好的跟踪性能。

参考文献(References):

[1] 钱华明,陈亮,满国晶,等. 基于当前统计模型的机动目标自适应跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(10):2154-2158.
QIAN Huaming, CHEN Liang, MAN Guojing, et al.

Adaptive tracking algorithm of maneuvering targets based on current statistical model[J]. Systems engineering and electronics,2011, 33(10):2154-2158. (in Chinese)

[2] 樊国创,戴亚平,许向阳. 一种“全面”的自适应机动目标跟踪算法[J]. 兵工学报,2009, 30(1):63-68.
FAN Guochuang, DAI Yaping, XU Xiangyang. An overall adaptive filtering algorithm for tracking maneuvering target [J]. Acta armamentaria, 2009, 30(1):63-68. (in Chinese)

[3] Yu H X, Fu C K, Jiang L. A fuzzy adaptive tracking algorithm based on current statistical probabilistic data association[C]//Proc of the 2nd international conference on signal processing system. New York: IEEE press, 2010:757-759.

[4] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking part II: motion models of ballistic and space targets [J]. IEEE trans on aerospace and electronic systems, 2010, 46(1):96-119.

[5] 陈出新,周德云. 一种新的更好的基于当前统计模型的自适应滤波算法[J]. 西北工业大学学报,2011, 48(18):351-355.
CHEN Chuxin, ZHOU Deyun. A new and better adaptive algorithm based on current statistical (CS) model[J]. Journal of northwestern polytechnical university,2011, 48(18):351-355. (in Chinese)

[6] Wang X H, Yang X Y, Qin Z. Hierarchical interacting multiple model algorithm based on improved current model [J]. Journal of systems engineering and electronics,2010,21(6): 961-967.

[7] Karsaz A, Khaloozadeh H. An optimal two-stage algorithm for highly maneuvering targets tracking [J]. Signal processing, 2009,89(4): 532-547.

[8] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking part V: multiple-model methods [J]. IEEE trans on aerospace and electronic systems, 2005, 41(4):1255-1321.

[9] 郑作虎,王首勇,万洋,等. 一种参数自适应调整的机动目标跟踪模型[J]. 空军雷达学院学报, 2011,25(2): 113-116.
ZHENG Zuohu, WANG Shouyong, WANG Yang, et al. Model of maneuvering target track with adaptive parameter adjustment[J]. Journal of air force radar academy,2011,25(2): 113-116. (in Chinese)

[10] 刘望生,李亚安,崔琳. 基于当前统计模型的机动目标自适应跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术,2011, 33(9): 1937-1940.
LIU Wangsheng, LI Yaan, CUI Lin. Adaptive strong tracking algorithm for maneuvering targets based on current statistical model systems engineering and electronics[J]. 2011, 33(9):1937-1940. (in Chinese)

(编辑:田新华)