

基于“当前”统计模型的模糊自适应航迹预测算法

杨霄鹏¹, 欧阳超¹, 杨朝阳¹, 姚昆¹, 倪娟²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 94303 部队, 山东潍坊, 261100)

摘要 基本的“当前”统计模型由于其机动加速度极限值固定不变, 只能描述机动加速度较大的机动目标。因而基本的“当前”统计模型及其自适应滤波算法(CSAF)对机动性较强目标的预测性能较好, 而对机动性较弱目标的预测误差较大。针对这个问题, 新算法中设计了一种新的模糊隶属度函数, 利用机动目标的“当前”加速度来自适应地调整机动加速度极限值, 使“当前”统计模型可以描述具有任意加速度的机动目标。最后, 运用该算法和 CSAF 算法对机动目标进行了航迹预测仿真实验, 仿真实验结果表明, 无论对于机动性较强的目标还是机动性较弱的目标, 新算法的预测性能均优于 CSAF 算法。

关键词 “当前”统计模型; 卡尔曼滤波; 机动目标; 航迹预测

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.001

中图分类号 V271; TN953 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0001-04

A Fuzzy Adaptive Algorithm Based on Current Statistical Model for Track Prediction

YANG Xiao-peng¹, OUYANG Chao¹, YANG Zhao-yang¹, YAO Kun¹, NI Juan²

(1. Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Unit 94303 of PLA, Weifang 261100, Shandong, China)

Abstract: A basic current statistical model can only be applied to maneuvering target with high acceleration because its upper and lower limits of target acceleration is fixed and invariable. So a basic current statistical model and an adaptive filter algorithm has a good performance on maneuvering target with high acceleration but a poor performance on maneuvering target with low acceleration. In order to solve this problem, a novel fuzzy membership function is presented which uses the current acceleration of maneuvering target to adjust the upper and lower limits of target acceleration adaptively. This new algorithm makes sure that the current statistical model can be applied to maneuvering target with any acceleration. Finally, track prediction simulation is did which uses this new algorithm and CSAF algorithm to predict the track of maneuvering target. Simulation results show that, the prediction performance of this new algorithm is much better than CSAF algorithm on maneuvering targets both with low and high acceleration.

Key words: current statistical model; kalman filter; maneuvering target; track prediction

航迹预测是根据机动目标当前的运动状态和已知的位 置信息对机动目标未来可能出现的位置做出

收稿日期: 2013-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202490)

作者简介: 杨霄鹏(1973-), 男, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事宽带无线通信及信号处理研究. E-mail: YXP_2@126.com

引用格式: 杨霄鹏, 欧阳超, 杨朝阳, 等. 基于“当前”统计模型的模糊自适应航迹预测算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(2): 1-4. YANG Xiaopeng, OUYANG Chao, YANG Zhaoyang, et al. A Fuzzy Adaptive Algorithm Based on Current Statistical Model for Track Prediction[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 1-4.

预测。在机动目标的航迹预测中,常采用 Kalman 滤波算法^[1-2],但它必须准确地知道机动目标的运动模型。近年来,学者们通过深入研究提出了一些机动目标运动模型^[3-8],其中以周宏仁提出的“当前”统计模型最具代表性。然而,该模型的一个缺点是机动加速度极限值 $a_{-\max}$ 和 a_{\max} 在预测过程中无法自适应地调整,从而只能预测机动性较强的目标,对机动性较弱目标的预测误差较大。为了解决这个问题,一种可行的办法是在预测过程中自适应地调整 $a_{-\max}$ 和 a_{\max} ^[9-13]。文献[12]采用模糊推理的方法来自适应地调整 $a_{-\max}$ 和 a_{\max} ,提高了收敛速度和预测精度,然而在隶属度等级发生变化时,三角隶属度函数会导致系统噪声估计的突变,预测误差较大。针对这个问题,文献[13]设计了一种无突变的模糊隶属度函数,然而它的应用范围有限,因为它假定机动目标加速度在一个特定的区间内。本文在“当前”统计模型及其自适应滤波算法(Current Statistical Model and Adaptive Filter Algorithm, CSAF)的基础上,设计一种新的模糊隶属度函数,提出了基于“当前”统计模型的机动目标模糊自适应滤波算法(Fuzzy Adaptive CSAF, FACSAF),该算法既不存在突变问题,也没有加速度区间限制。仿真结果表明,在预测精度方面,FACSAF 算法要明显优于 CSAF 算法。

1 “当前”统计模型及其自适应滤波算法

“当前”统计模型^[5]认为,机动目标下一时刻的加速度只能在“当前”加速度的邻域内取值。这种模型其实是非零均值时间相关模型,它用修正的瑞利分布来描述机动加速度的“当前”概率密度。

“当前”统计模型在一维情况下的离散状态方程和量测方程分别为:

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

$$Y(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + V(k) \quad (2)$$

CSAF 算法为:

$$\hat{\mathbf{X}}(k/k) =$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k/k-1) + K(k)[Y(k) - H(k)\hat{\mathbf{X}}(k/k-1)] \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k/k-1) = \Phi(k-1)\hat{\mathbf{X}}(k-1/k-1) + \bar{\mathbf{U}}a(k) \quad (4)$$

$$K(k) = P(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) \cdot [\mathbf{H}(k)P(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (5)$$

$$P(k/k-1) =$$

$$\Phi(k-1)P(k-1/k-1)\Phi^T(k-1) + Q(k-1) \quad (6)$$

$$P(k/k) = [I - K(k)\mathbf{H}(k)]P(k/k-1) \quad (7)$$

$$\bar{a}(k) = \hat{x}(k/k-1) \quad (8)$$

目标加速度方差 σ_a^2 的计算公式为

$$\sigma_a^2 = \begin{cases} \frac{4-\pi}{\pi} [a_{\max} - \hat{x}(k/k)]^2 & \hat{x}(k/k) \geq 0 \\ \frac{4-\pi}{\pi} [a_{-\max} + \hat{x}(k/k)]^2 & \hat{x}(k/k) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

采用修正瑞利密度函数来描述机动目标加速度“当前”概率密度的“当前”统计模型隐含了一个前提条件,即“当前”加速度必须要落在区间 $\left[a_{-\max}, \frac{4-\pi}{4}a_{-\max}\right]$ 或 $\left[\frac{4-\pi}{4}a_{\max}, a_{\max}\right]$ 内^[13-14]。

因此,当 $a_{-\max}$ 和 a_{\max} 固定不变时,CSAF 算法对机动性较强目标的预测性能较好,而对机动性较弱目标的预测误差较大。

2 FACSAF 算法

针对以上问题,本文设计了一个新的模糊隶属度函数,提出了基于“当前”统计模型的机动目标模糊自适应滤波算法(Fuzzy Adaptive CSAF, FACSAF)。

假设调整前的加速度极限值为 a_{\max} 和 $a_{-\max}$,调整后的加速度极限值为 $a_{\max\text{-new}}$ 和 $a_{-\max\text{-new}}$ 。当机动目标的加速度为正时,为了确保“当前”统计模型能够很好的描述机动目标,调整后的加速度极限值应该满足:

$$\frac{4-\pi}{4}a_{\max\text{-new}} \leq a \leq a_{\max\text{-new}} \quad (10)$$

令 $a_{\max\text{-new}} = Ma_{\max}$, 可得出:

$$\frac{4-\pi}{4}Ma_{\max} \leq a \leq Ma_{\max} \quad (11)$$

得出:

$$\frac{a}{a_{\max}} \leq M \leq \frac{4}{4-\pi} \frac{a}{a_{\max}} \quad (12)$$

由于 a_{\max} 是一个已知的常量,不妨将 a/a_{\max} 看做变量,假设 $M = ka/a_{\max}$, 则 k 的取值范围为 $[1, 4/(4-\pi)]$ 。

同理可推出,当机动目标的加速度为负时,假设 $M = ka/a_{-\max}$, k 的取值范围为 $\left[1, \frac{4}{4-\pi}\right]$ 。

模糊隶属度函数表达式为

$$M = \begin{cases} k \frac{a}{a_{\max}} & a \geq 0 \\ k \frac{a}{a_{-\max}} & a < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: a 为机动目标的“当前”加速度 $\hat{x}(k/k)$; k 的取值范围为:

$$1 \leq k \leq 4/(4 - \pi) \quad (14)$$

机动目标加速度极限值的自动调整公式为:

$$\begin{cases} a_{\max\text{-new}} = Ma_{\max} & a \geq 0 \\ a_{\min\text{-new}} = Ma_{\min} & a < 0 \end{cases} \quad (15)$$

对式(10)~(15)进行分析后得出,在 FACSFAF 算法中,加速度极限值根据“当前”加速度自适应地调整,调整以后的加速度极限值 $a_{\min\text{-new}}$ 和 $a_{\max\text{-new}}$ 所定义区间分别为: $\left[a_{\min\text{-new}}, \frac{4-\pi}{4}a_{\min\text{-new}} \right]$ 或者 $\left[\frac{4-\pi}{4}a_{\max\text{-new}}, a_{\max\text{-new}} \right]$ 把“当前”加速度包含在内,使得“当前”统计模型也可以描述机动性较弱的目标,提高了对机动性较弱目标的预测性能。

3 机动目标航迹预测仿真实验及分析

本组仿真实验中用 FACSFAF 算法预测加速度阶跃性变化的变速直线运动目标的航迹,并将仿真结果与 CSAF 算法以及王向华提出的 FACS 算法^[13]进行比较。

在仿真实验中,初始估计误差协方差 $P_0 = \text{diag}([100, 100, 100])$, 初始状态噪声协方差 $Q_0 = \text{diag}([0.1, 0.1, 0.1])$, 观测噪声协方差 $R = 100$, 机动频率 $\alpha = 0.05$ 。FACSFAF 算法的参数为: $a_{\max} = 90 \text{ m/s}^2$, $a_{\min} = -90 \text{ m/s}^2$, $k = 1.8$ 。FACS 算法的参数为: $a_{\text{th}} = 100 \text{ m/s}^2$, $a_{-\text{th}} = -100 \text{ m/s}^2$, $a_{\text{up}} = 90 \text{ m/s}^2$, $a_{-\text{up}} = -90 \text{ m/s}^2$, $k_1 = k_2 = 0.97$ 。CSAF 算法的参数为: $a_{\max} = 90 \text{ m/s}^2$, $a_{\min} = -90 \text{ m/s}^2$ 。仿真时间为 200 s, 采样周期为 1 s。假定机动目标初始加速度为 30 m/s^2 , 初始速度为 100 m/s , 初始位置为 $10\ 000 \text{ m}$ 。机动目标在 1~50 个采样周期内作加速度为 30 m/s^2 的匀加速运动, 在 51~100 个采样周期内作加速度为 20 m/s^2 的匀加速运动, 在 101~150 个采样周期内作加速度为 10 m/s^2 的匀加速运动, 在 151~200 个采样周期内作加速度为 5 m/s^2 的匀加速运动。

在仿真结果的分析中,算法的预测性能用状态预测质量^[15]来评价,而状态预测质量用均方根预测误差 RMSE 来描述,其表达式为:

$$\text{RMSE}(k) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x(k) - \hat{x}(k/k-1))^2 / N} \quad (16)$$

式中: N 为仿真的次数; i 表示第 i 次仿真; $x(k)$ 和 $\hat{x}(k/k-1)$ 分别表示 k 时刻的状态真实值和状态预测值。

运用 Matlab 软件仿真 2 000 次,得到位置均方

根预测误差、速度均方根预测误差和加速度均方根预测误差分别见图 1~3。3 种算法的平均运行时间分别为: CSAF 算法 4.5 ms, FACS 算法 4.6 ms, FACSFAF 算法 4.5 ms。

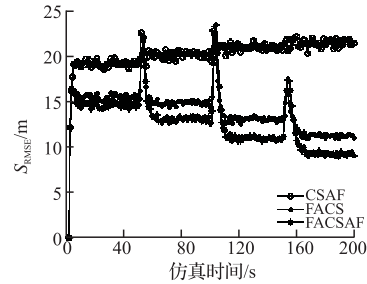


图 1 位置均方根预测误差比较

Fig.1 Comparison of position root-mean-square prediction errors between FACS and STF-FACS algorithms

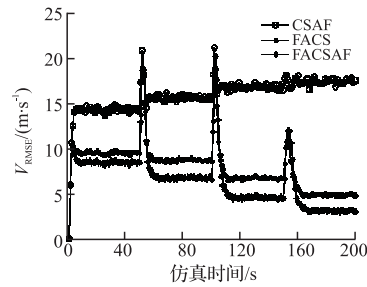


图 2 速度均方根预测误差比较

Fig.2 Comparison of velocity root-mean-square prediction errors between FACS and STF-FACS algorithms

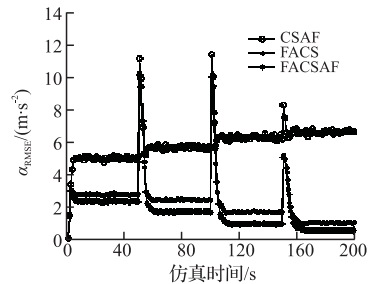


图 3 加速度均方根预测误差比较

Fig.3 Comparison of acceleration root-mean-square prediction errors between FACS and STF-FACS algorithms

从仿真实验结果可以看出, FACSFAF 算法的位置、速度和加速度均方根预测误差都远远小于 CSAF 算法, 而且加速度越小效果越明显。这是因为, CSAF 算法的加速度极限值在预测过程固定不变且与加速度实际值相差较大, 使得算法以较大的状态噪声协方差对机动目标进行预测, 其误差必然较大, 尤其是当机动目标加速度不在“当前”统计模型可描述加速度区间内时, CSAF 算法无法对机动目标进行描述, 其预测误差更大; 而 FACSFAF 算法能够根据“当前”加速度及时调整加速度极限值, 使得“当前”统计模型可以描述任何加速度的机动目标, 其状态噪声协方差一直保持在较小值。同时可

以看出,FACSAF算法的预测精度也好于FACS算法和CSAF算法。

4 结语

针对CSAF算法无法有效预测机动性较弱目标的问题,本文设计了一种新的模糊隶属度函数,根据“当前”加速度实时调整加速度极限值,使得“当前”统计模型可以描述具有任何加速度的机动目标。仿真结果表明,FACSAF算法的预测性能远远好于CSAF算法。

参考文献(References):

- [1] 丁玉美,阔永红,高新波. 数字信号处理—时域离散随机信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.
DING Yumei, KUO Yonghong, GAO Xinbo. Digital Signal Processing-time-domain Discrete Random Signal Processing[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002.(in Chinese)
- [2] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [J]. Transaction of the ASME Journal of Basic Engineering, 1960;35-45.
- [3] Singer R A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Manervering Targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1970; 473-483.
- [4] Zhou H R, Kumar K S P. A Current Statistical Model and Adaptive Algorithm for Estimating Maneuvering Targets[J]. AIAA Journal of Guidance, 1984, 7(5): 596-602.
- [5] 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, 1991.
ZHOU Hongren, JING Zhongliang, WANG Peide. Maneuvering Target Tracking[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991.(in Chinese)
- [6] Mehrotra K, Mahapatra P R. A Jerk Model for Tracking Highly Maneuvering Targets [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(4):1094-1105.
- [7] 雷明,韩崇昭. 多级修正的高机动 Jerk 模型研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(2):138-141.
LEI Ming, HAN Chongzhao. Study on Multilayer Modified Highly Maneuvering Jerk Model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(2):138-141. (in Chinese)
- [8] Li Xiaorong, BarShalom Yaakov. Multiple-Model Estimation with Variable Structure[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(4):478-493.
- [9] Hu Congwei, Chen Wu. Adaptive Kalman Filtering for Vehicle Navigation [J]. Journal of Global Positioning System, 2003, 2(1):227-233.
- [10] 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)
- [11] 李辉,左现刚,曾惟. 基于“当前”统计模型的模糊自适应机动目标跟踪算法[J]. 测控技术, 2007, 26(8):28-45.
LI Hui, ZUO Xiangang, ZENG Wei. Fuzzy Adaptive Target Tracking Algorithm Based on Current Statistical Model[J]. Observation and Control Technology, 2007, 26(8):28-45.(in Chinese)
- [12] 胡洪涛,敬忠良,田宏伟,等. 基于“当前”统计模型的模糊自适应跟踪算法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(2):293-299.
HU Hongtao, JING Zhongliang, TIAN Hongwei, et al. A Fuzzy Adaptive Tracking Algorithm Based on Current Statistical Model[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(2):293-299.(in Chinese)
- [13] 王向华,覃征,杨慧杰,等.基于“当前”统计模型的模糊自适应跟踪算法[J]. 兵工学报, 2009, 30(8):1089-1093.
WANG Xianghua, TAN Zheng, YANG Huijie, et al. A Fuzzy Adaptive Algorithm Based on Current Statistical Model for Maneuvering Target Tracking[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(8):1089-1093.(in Chinese)
- [14] 刁联旺,杨静宇. 一种改进的机动目标“当前”统计模型描述[J]. 兵工学报, 2005, 26(6):825-828.
DIAO Lianwang, YANG Jingyu. AN Improved Description of “Current” Statistical Model for Maneuvering Target [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(6): 825-828.(in Chinese)
- [15] Rong Li X, Zhi Xiaorong, Zhang youmin. Multiple-Model Estimation with Variable Structure Part III: Model - Group Switching Algorithm [M]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 35(1):225-241.

(编辑:徐敏)