

文章编号:1004-9037(2014)04-0597-06

# 一种参数自适应的“当前”统计 Jerk 模型

刘玉磊<sup>1</sup> 冯新喜<sup>1</sup> 鹿传国<sup>1</sup> 扈瑜龙<sup>1</sup> 叶 杨<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院,西安,710077; 2. 解放军 94865 部队,杭州,310021)

**摘要:**针对高度机动目标跟踪问题,通过理论分析指出了 Jerk 模型及其一些改进模型的不足,并借鉴“当前”统计的思想,提出了一种参数自适应的 Jerk 模型(Adaptive parameter current statistic jerk model, APCS-Jerk)。该模型通过新息向量的范数定义调整因子,以此来对模型中的各参数进行自适应调整,增强了系统对突发机动的自适应跟踪能力,并对加速度均值进行了修正,使之适合于一般运动形式。最后对本算法进行了仿真,结果表明,参数自适应的“当前”统计 Jerk 模型较经典 Jerk 模型、“当前”统计 Jerk 模型及改进的“当前”统计 Jerk 模型对强机动目标的跟踪精度有较大程度的提高。

**关键词:**机动目标跟踪;Jerk 模型;调整因子;自适应调整

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A

## Current Statistic Jerk Model of Adaptive Parameter

Liu Yulei<sup>1</sup>, Feng Xinxi<sup>1</sup>, Lu Chuanguo<sup>1</sup>, Hu Yulong<sup>1</sup>, Ye Yang<sup>2</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077, China;  
2. PLA 94865 Troops, Hangzhou, 310021, China)

**Abstract:** By analyzing the defects of Jerk model and some modified models for tracking strong maneuvering targets, and using the current statistics ideas, an adaptive parameter current statistical(APCS) Jerk model is proposed. The adjustment factor based on the innovation vectors is used to adjust the model parameters and filtering gain, improving the matching degree of maneuvering model with movement of target and enhancing the system's adaptive tracking ability for sudden maneuver. Furthermore, the mean value of maneuvering acceleration is modified to fit for the general models of motion. The simulation results also show that the tracking performance of APCS-Jerk model is superior to Jerk model, CS-Jerk model and MCS-Jerk model for tracking highly maneuvering targets.

**Key words:** maneuvering target tracking; Jerk model; adjustment factor; adaptive adjustment

## 引 言

机动目标跟踪问题是雷达数据处理领域研究热点之一,国内外有很多学者、专家关注此问题,并且从目标运动模型的构建和滤波算法的改进等多个方面探索着各种有效的解决途径。目前,已建立了多种多样的运动模型来描述目标机动过程,如一阶时间相关模型、半马尔科夫模型、Noval 统计模型以及“当前”统计模型<sup>[1-3]</sup>,然而对于高阶的强机动上述运动模型都没有很好的体现,因此对目标运

动不确定性描述的准确与否已成为机动目标跟踪的关键。Kishore Mehrotra 提出了一种高阶机动目标模型 Jerk 模型<sup>[4]</sup>,该模型在加速度模型的基础上又增加了一维,即引入的加加速度,并对其进行估计,认为其服从零均值的一阶时间相关过程。文献[5]借鉴“当前”统计思想,提出了一种“当前”统计 Jerk 模型(Current statistic jerk model, CS-Jerk)。

本文通过对 Jerk 模型的分析研究,借鉴“当前”统计思想,在 Jerk 基础之上,提出了参数自适应 Jerk 模型(Adaptive parameter current statistic

jerk model, APCS-Jerk), 该模型假设其为非零均值的白噪声, 并对机动频率进行建模, 利用目标的机动频率与新息的自适应关系来对模型中的机动频率进行实时调整。理论分析和仿真实验表明该模型克服了 Jerk 模型原有的不足, 较 CS-Jerk 模型及其相关改进模型减少了模型误差, 提高了目标的跟踪精度。

## 1 Jerk 模型分析

### 1.1 Jerk 模型

Jerk 模型的一维离散状态方程和量测方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k+1) + \mathbf{V}(k+1) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{X}(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad \ddot{x}(k) \quad \dddot{x}(k)]$ ,  $\mathbf{F}(k)$  和  $\mathbf{H}$  分别为状态转移矩阵和量测矩阵, 且

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} & p \\ 0 & 1 & T & q \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

其中:  $p = (2 - 2\alpha T + \alpha^2 T^2 - 2e^{-\alpha T}) / (2\alpha^3)$ ;  $q = (e^{-\alpha T} - 1 + \alpha T) / \alpha^2$ ;  $r = (1 - e^{-\alpha T}) / \alpha$ ;  $s = e^{-\alpha T}$ 。

式中:  $\mathbf{W}$  为离散高斯白噪声, 其均值为零、方差为  $\mathbf{Q}(k) = 2\alpha\sigma_j^2\mathbf{Q}_j$ ,  $\sigma_j^2$  为加加速度方差, 即 Jerk 方差;  $\mathbf{Q}_j$  为与  $\alpha$  和  $T$  有关的  $4 \times 4$  阶常数矩阵;  $\mathbf{V}$  为量测噪声, 其均值为零、方差为  $R$ ;  $T$  为采样周期;  $\alpha$  为 Jerk 机动频率, 即 Jerk 自相关时间常数的倒数。

### 1.2 CS-Jerk 模型

目标的强机动就必然会带来加加速度的变化, 这样 Jerk 模型中关于目标加加速度为零均值的假设就与实际不符。为此文献[5]借鉴“当前”统计的思想, 提出基于“当前”统计的 Jerk 模型 (CS-Jerk), 认为机动目标在下一时刻的加加速度取值范围是有限的, 而且只能在“当前”加加速度的邻域内。CS-Jerk 模型目标的离散状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{U}\bar{J} + \mathbf{W}(k) \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{X}(k)$  为状态向量;  $\mathbf{F}(k)$  为状态转移矩阵;  $\mathbf{U}$  为输入控制矩阵;  $\bar{J}$  为加加速度的均值, 且

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

CS-Jerk 模型将“当前”加速度变化率  $\bar{J}(k)$  等于加速度变化率的一步预测  $\hat{\dot{x}}(k/k-1)$ , 利用  $\bar{J}(k)$  对机动目标机动的预测、估计状态进行实时调整。

## 2 Jerk 模型问题分析

### 2.1 Jerk 模型的缺陷

文献[5]在连续时间域内, 通过拉普拉斯变换推导出稳态时卡尔曼滤波的误差为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{X}}(s) &= \mathbf{X}(s) - \hat{\mathbf{X}}(s) = \\ & [I - (sI - \mathbf{F} + \mathbf{K}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{K}\mathbf{H}]\mathbf{X}(s) + \\ & (sI - \mathbf{F} + \mathbf{K}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{K}\mathbf{V}(s) = \tilde{\mathbf{X}}_d(s) + \tilde{\mathbf{X}}_r(s) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\tilde{\mathbf{X}}_d(s)$  为系统的动态误差;  $\tilde{\mathbf{X}}_r(s)$  为系统的随机误差。当系统达到稳态时,  $\mathbf{F}, \mathbf{K}$  分别为常数矩阵。

将矩阵  $\mathbf{F}$  和  $\mathbf{H}$  代入式(4), 化简整理得

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{X}}_d(s) &= \\ & \begin{bmatrix} \frac{s^3(s+\alpha)}{s^4 + (\alpha+k_1)s^3 + (ak_1+k_2)s^2 + (ak_2+k_3)s + ak_3+k_4} x(s) \\ \frac{s^2[s^2 + (\alpha+k_1)s + (ak_1+k_2)s + ak_2]}{s^4 + (\alpha+k_1)s^3 + (ak_1+k_2)s^2 + (ak_2+k_3)s + ak_3+k_4} \dot{x}(s) \\ \frac{s[s^3 + (\alpha+k_1)s^2 + (ak_1+k_2)s + ak_2]}{s^4 + (\alpha+k_1)s^3 + (ak_1+k_2)s^2 + (ak_2+k_3)s + ak_3+k_4} \ddot{x}(s) \\ \frac{s[s^3 + (\alpha+k_1)s^2 + (ak_1+k_2)s + ak_2 + k_3] + ak_3}{s^4 + (\alpha+k_1)s^3 + (ak_1+k_2)s^2 + (ak_2+k_3)s + ak_3+k_4} \dddot{x}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3$  和  $k_4$  为系统增益矩阵中的各元素。

从式(5)可以看出, 在单位常加加速度运动情况下, 有  $\ddot{x}(s) = \frac{1}{s}$ ,  $\ddot{x}(s) = \frac{1}{s^2}$ ,  $\dot{x}(s) = \frac{1}{s^3}$ ,  $x(s) =$

$\frac{1}{s^4}$ , 则

$$\tilde{x}_d(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \lim_{s \rightarrow \infty} \cdot$$

$$\frac{s^3(s+\alpha)}{s^4 + (\alpha+k_1)s^3 + (ak_1+k_2)s^2 + (ak_2+k_3)s + ak_3+k_4} \cdot \frac{1}{s^4} = \frac{\alpha}{ak_3+k_4}$$

$$\text{同理 } \tilde{\dot{x}}_d(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{\alpha k_1}{ak_3+k_4}, \quad \tilde{\ddot{x}}_d(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{\alpha k_2}{ak_3+k_4},$$

$$\tilde{\ddot{x}}_d(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{\alpha k_3}{ak_3+k_4}。$$

显然, 若  $\alpha$  不为零, 则  $\tilde{\mathbf{X}}_d(s)$  将不为零。由以上理论分析可知, 当目标发生高度机动, 此时模型的动态误差误差不为零, 因此使用 Jerk 模型将很难对目标运动状态进行精确的估计。

## 2.2 “当前”统计 Jerk 模型的缺陷

文献[6]引入“当前”统计思想来改善 Jerk 模型,并通过  $Z$  变换证明了 CS-Jerk 模型的稳态时动态误差为零,从而提高了系统的跟踪性能。但是“当前”统计一个重要的思想为:当目标正在进行机动时,它在下一时刻的机动范围是有限的,即机动加加速度是非零均值的时间相关过程<sup>[6]</sup>。由此加加速度  $J$  的概率密度由修正的瑞利分布描述为

$$P(J) = \begin{cases} \frac{J_{\max} - J}{\mu^2} \exp\left(-\frac{(J_{\max} - J)^2}{2\mu^2}\right) & 0 < J < J_{\max} \\ \frac{J - J_{-\max}}{\mu^2} \exp\left(-\frac{(J - J_{-\max})^2}{2\mu^2}\right) & 0 > J > J_{-\max} \\ \delta(J) & J = 0 \\ 0 & J \geq J_{\max}, J \leq J_{-\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $J_{\max}, J_{-\max}$  为机动加加速度的最大值。

其均值,方差为

$$E(J) = \begin{cases} J_{\max} - \sqrt{\frac{\pi}{2}}\mu & J < 0 \\ J_{-\max} + \sqrt{\frac{\pi}{2}}\mu & J \geq 0 \end{cases}, D(J) = \frac{4 - \pi}{2}\mu^2$$

当  $J > 0$  时,由加加速度的概率密度函数得

$$\int_0^{J_{\max}} J^2 P(J) dJ = E^2(J) + D(J) \leq \int_0^{J_{\max}} J P(J) dJ = J_{\max} E(J) \quad (7)$$

将  $E(J), D(J)$  代入式(7),化简可得到  $\mu$  的取值范围为

$$0 \leq \mu \leq \frac{J_{\max}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (8)$$

将  $\mu$  的范围代入  $E(J)$  得

$$\left(\frac{4 - \pi}{4}\right)J_{\max} \leq E(J) \leq J_{\max} \quad (9)$$

同理,可得到目标的“当前”加速度为负时其均值的范围

$$J_{-\max} \leq E(J) \leq \left(\frac{4 - \pi}{4}\right)J_{-\max} \quad (10)$$

由式(9,10)可以看出,CS-Jerk 模型只能描述加加速度在  $\left[\left(\frac{4 - \pi}{4}\right)J_{\max}, J_{\max}\right]$  和  $\left[J_{-\max}, \left(\frac{4 - \pi}{4}\right)J_{-\max}\right]$  范围内的目标机动。除此之外,CS-Jerk 模型中各个参数的合理选取也比较困难:首先是将  $\sigma_j^2$  设定为常数。实际上当目标发生强机动时,由于机动加加速度迅速变化使得系统的过程噪声协方差也随之迅速增大,因而将目标加加速度的方差

$\sigma_j^2$  设定为常数不太合理。其次是加加速度最大值的设定,即  $J_{\max}$  和  $J_{-\max}$  的设定。在实际情况中,由于对目标的属性信息难以获取,使得其加加速度的范围很难具体设定,不合理的设定固然会影响跟踪效果。

## 2.3 相关改进模型的缺陷

基于乔向东等借鉴“当前”统计模型思想提出的 CS-Jerk 模型,近些年来学者对此进行了很多改进。文献[6]提出的 MCS-Jerk 模型将目标机动加加速度的“当前”概率密度用截断正态分布来描述,得出加加速度的方差  $\sigma_j^2$  与均值  $\bar{J}$  的关系  $\sigma_j^2 = (J_{\max} - |\bar{J}|)^2/9$ ,对目标的机动加加速度的方差调整如下: $\sigma_j^2(k+1) = [J_{\max} - |\hat{x}(k|k)|]^2/9$ 。该算法虽然使机动加速度变化率的方差  $\sigma_j^2$  自适应调整起来,但是没有解决如何对加速度最大值进行合理的设定。文献[7]提出的多级修正的高机动 Jerk 模型,通过 Taylor 级数展开引入了包含加加速度的修正项来对系统各状态分量进行调整,从而对 Jerk 模型进行多级修正。该算法虽然提高了机动目标的跟踪精度,但是加速度变化率  $J$  的方差  $\sigma_j^2$  需要自己根据实际情况给定,若选取不合理将导致跟踪误差明显增大。

## 3 参数自适应的 CS-Jerk 模型

由上节分析可知机动频率  $\alpha$  不仅影响过程噪声协方差矩阵  $Q(k)$ ,而且还对系统的动态误差  $\tilde{X}_d(s)$  有影响,加加速度方差  $\sigma_j^2$  也对过程噪声协方差矩阵  $Q(k)$  有影响。针对强机动目标,即加加速度超出根据先验信息设置的区间时,本文利用“当前”统计的思想,在 Jerk 模型的基础上对机动频率进行建模,利用目标的机动频率与新息的自适应关系引入调整因子,对模型中的各参数进行自适应调整<sup>[8]</sup>。

### 3.1 调整因子的定义

自适应的构造大多基于新息向量,定义新息向量为

$$\mathbf{v}(k+1) = \mathbf{Z}(k+1) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) \quad (11)$$

从式(11)可以看出,当目标发生高阶机动时,目标状态估计值与量测值相差较大,从而导致新息向量取值增大,所以新息向量  $\mathbf{v}(k+1)$  更能反映系统的扰动情况。新息协方差矩阵为

$$\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{H}\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}(k+1) \quad (12)$$

计算新息的范数

$$g(k+1) = \mathbf{v}^T(k+1)\mathbf{S}^{-1}(k+1)\mathbf{v}(k+1) \quad (13)$$

当目标运动形式突变时,  $g(k+1)$  增大, 因此, 可以用前后两个时刻新息范数的差异, 即  $g(k)$  与  $g(k+1)$  的差异大小来表示目标机动的强弱。当目标机动较弱时, 前后两个时刻的新息范数差异较小, 模型参数也应较小并且变化较缓慢; 当目标机动越强时, 前后两个时刻的新息范数差异越大, 模型中的各参数也应随之迅速增大以满足对强机动目标的精确跟踪, 因此基于新息范数的调整因子的值和其变化率应越大, 从而可以快速调整模型参数和系统增益, 提高机动模型与实际运动形式的匹配程度。由于指数函数在其定义域内严格单调递增, 并且其变化率在函数值较小时数值比较小, 随着函数值增大, 变化率的数值迅速增大, 因此更适合利用指数函数将新息变换为调整因子。综合考虑上述各个特点调整因子具体选择为

$$\lambda(k+1) = \exp(g(k+1)/g(k)) \quad (14)$$

### 3.2 参数的自适应调整

假设目标当前时刻的机动频率为  $\alpha(k)$ , 加加速度的正负极限值分别为  $J_{\max}(k)$ ,  $J_{-\max}(k)$ , 随着运动目标的机动, 模型中的各参数进行如下自适应调整

$$\alpha(k+1) = \lambda(k+1)\alpha(k) \quad (15)$$

$$J_{\max}(k+1) = \lambda(k+1)J_{\max}(k) \quad (16)$$

$$J_{-\max}(k+1) = \lambda(k+1)J_{-\max}(k) \quad (17)$$

CS-Jerk 模型中假设加速度变化率均值为前一时刻加加速度的估计值, 而实际情况当前加加速度均值不仅与当前的  $\hat{x}(k|k)$  有关, 还与前一时刻的  $\bar{J}(k)$  有关<sup>[9]</sup>, 即

$$\bar{J}(k+1) = E[J(k+1) | Z(k)] = e^{-\alpha(k+1)T}\bar{J}(k|k) + (1 - e^{-\alpha(k+1)T})\bar{J}(k) \quad (18)$$

参数调整好的加速度变化率的方差为

$$\sigma_j^2(k+1) = \begin{cases} [J_{\max} - \bar{J}(k+1)]^2/9 & \bar{J}(k+1) > 0 \\ [J_{-\max} + \bar{J}(k+1)]^2/9 & \bar{J}(k+1) < 0 \end{cases} \quad (19)$$

在进行目标跟踪时, 当目标发生强机动, 即加加速度超过预先设定的最值  $J_{\max}$  时, 系统需要迅速增大增益以实现快速调整, 当目标机动较弱, 即加加速度在预先设定的区间内时, 系统需要较小的增益来进行调整。当系统中量测噪声协方差矩阵和前一时刻的状态预测协方差矩阵确定后, 那么系统增益只取决于机动频率和加加速度的极限值。由调整后的模型参数表达式分析可知, 目标发生机动

时,  $\lambda(k+1) > 1$ , 尤其是当目标发生强机动时,  $\lambda(k+1) \geq 1$ , 这样通过调整因子可以迅速增大机动频率和加加速度的极限值, 进而增大系统增益, 增强了对强机动的反应能力, 提高了对机动目标的跟踪性能。

## 4 实验仿真

为了验证本文提出的 APCJ 模型的有效性, 对强机动目标运动进行了实验仿真, 并与经典的 Jerk 模型, CS-Jerk 模型 (CJ) 和改进的 CS-Jerk 模型 (MCJ) 进行了比较。利用下述均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 来比较不同算法的性能。

$$\text{RMSE}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i(k|k) - \hat{x}_i(k|k))^2}$$

式中:  $i$  表示第  $i$  次仿真,  $x_i(k|k)$ ,  $\hat{x}_i(k|k)$  表示第  $i$  次运行时  $k$  时刻目标状态的真值及估计值, Monte Carlo 仿真次数  $N$  取 500。

仿真条件: 目标运动历时 100 s, 采样周期  $T = 1$  s, 初始状态:  $\mathbf{x}(0) = [12\ 000\ \text{m} \quad -200\ \text{m/s} \quad 0\ \text{m/s}^2 \quad 0\ \text{m/s}^3]^T$ , 量测噪声假定为均值为零、标准差为 100 m 的高斯白噪声,  $\sigma_j = 5\ \text{m/s}^2$ , 初始机动频率  $\alpha_0 = 1/20$ ,  $J_{\max} = \pm 10\ \text{m/s}^3$ 。目标做阶段性恒加速度变化率运动, 具体的机动情况如表 1 所示。为了验证 APCJ 模型的有效性, 对 3 种模型的跟踪性能进行仿真比较分析, 它们的位置、速度与加速度的 RMSE 如图 1~3 所示。

从仿真结果可以看出, 当目标弱 Jerk 机动时 (处于 27~30 s 和 36~39 s), 此时加速度变化率

表 1 目标机动情况

Table 1 The movement of target

机动时间/s	加速度变化率/(m·s <sup>-2</sup> )
0~26	0
27~30	8
31~35	0
36~39	4
40~43	0
44~48	12
49~60	0
61~66	25
67~80	0
81~85	18
86~100	0

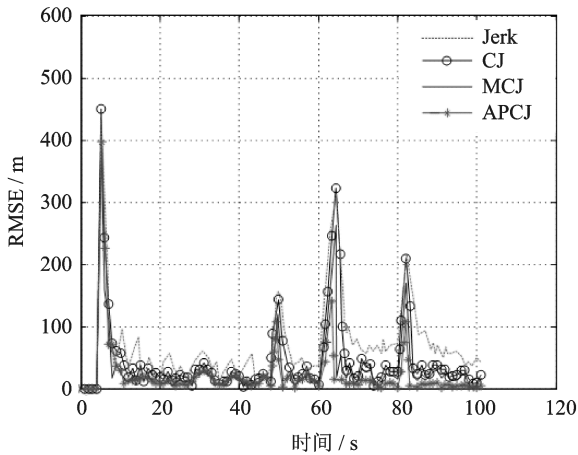


图1 目标位置均方根误差

Fig.1 RMSE of position

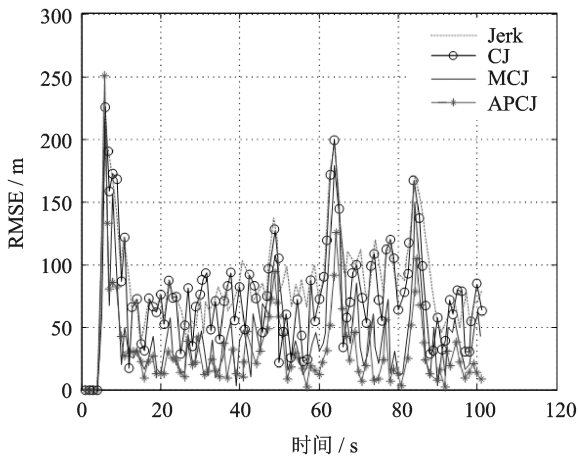


图2 目标速度均方根误差

Fig.2 RMSE of velocity

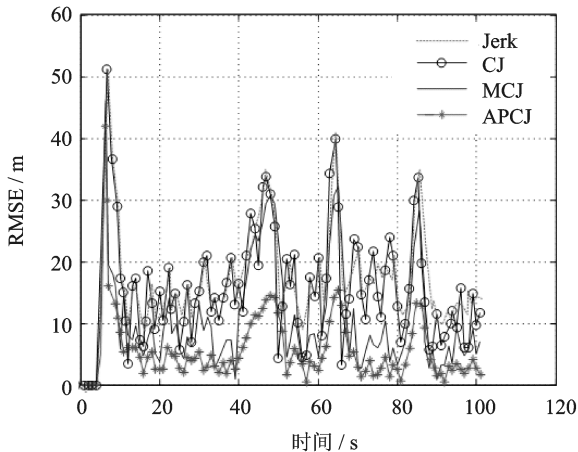


图3 目标加速度均方根误差

Fig.3 RMSE of acceleration

小于 CJ 模型和 MCJ 模型,这是由于机动频率  $\alpha$  是由调整因子实时计算的,使得滤波收敛也较快;而当目标做强 Jerk 机动时(处于 44~48 s, 61~66 s 和 81~85 s),此时加速度变化率已经超出了预先设定的加速度变化率的最大值,APCJ 模型的跟踪性能要明显好于 CJ 模型和 MCJ 模型,这是由于此时 CJ 模型和 MCJ 模型已经与实际机动情况不符,但 APCJ 模型通过对加速度变化率  $J_{\max}$  的自适应调整,使得模型不断保持与实际机动相符。虽然 APCJ 的跟踪性能较 CJ 模型、MCJ 有所改善,但在加速度变化率突变的时刻(即 Jerk 的跳变时刻),APCJ 模型对目标“急动”估计误差仍然较大,这是更进一步需要解决的问题。

表2 3种模型的平均跟踪均方根误差和运行时间比较

Table 2 Comparison of 3 models' mean RMSE and running time

模型	RMSE <sub>av</sub>			$T_{av}$
	位置/m	速度 /(m·s <sup>-1</sup> )	加速度 /(m·s <sup>-2</sup> )	时间/s
Jerk	88.75	77.61	22.95	0.072 83
CJ	73.67	63.31	19.19	0.083 15
MCJ	59.63	53.11	15.44	0.084 30
APCJ	50.83	44.53	8.83	0.178 5

## 5 结束语

为使机动目标模型适应于复杂多变的机动形式,本文在“当前”统计 Jerk 模型的基础上提出了一种参数自适应调整的“当前”统计 Jerk 模型,该模型通过相邻时刻的新息范数的比值大小来反映目标机动的强弱,利用指数形式的定义了调整因子来对模型中的参数自适应的调整,以此来实现参数的合理设置,进而调整系统噪声协方差和系统增益。此外,对加速度均值做了修正,使之适用于一般的运动形式,提高了对机动目标的跟踪性能。最后针对所提出的 APCJ 模型与经典的 CJ 模型和 MCJ 模型在机动目标跟踪的仿真实验中做了分析比较。仿真结果表明,APCJ 模型明显提高了对机动目标的跟踪性能。

### 参考文献:

- [1] Singer R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 1970,6(4):473-483.

均小于其预先设定的加速度变化率最大值,APCJ 模型的位置均方根误差与 CJ 模型、MCJ 模型基本相当,APCJ 模型的速度与加速度均方根误差要略

- [2] 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 targets tracking[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991.
- [3] Zhou H, 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.
- [4] Mehrotra K, Mahapatra P R. A Jerk model for tracking highly maneuvering targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997,35(4):1094-1105.
- [5] 乔向东,王宝树,李涛,等. 一种高度机动目标的“当前”统计 Jerk 模型[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(6):53-56.  
Qiao Xiangdong, Wang Baoshu, Li Tao, et al. A CS-Jerk model for tracking maneuvering targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002,24(6): 53-56.
- [6] 潘平俊,冯新喜,刘佳,等. 高度机动目标改进 CS-Jerk 模型[J]. 电光与控制,2008,15(6):38-40.  
Pan Pingjun, Feng Xinxi, Liu Jia, et al. A modified current statistical Jerk model for tracking highly maneuvering targets[J]. Electronics Optics & Control, 2008,15(6):37-40.
- [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.
- [8] 范小军,刘锋,秦勇,等. 基于 STF 的“当前”统计模型及自适应跟踪算法[J]. 电子学报,2009,34(6):981-984.  
Fan Xiaojun, Liu Feng, Qin Yong, et al. Current statistical model and adaptive tracking algorithm based on strong tracking filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2009,34(6):981-984.
- [9] 孙福明,吴秀清,祁凯. 基于当前统计模型的自适应强跟踪算法[J]. 数据采集与处理,2008,23(2):191-195.  
Sun Fuming, Wu Xiuqing, Qi Kai. Adaptive strong tracking algorithm based on Current Statistical Model [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2008,23(2):191-195.

**作者简介:**刘玉磊(1990-),男,硕士研究生,研究方向:目标跟踪,E-mail:huapofeixue@sina.com;冯新喜(1962-),男,教授,研究方向:信息融合;鹿传国(1986-),男,博士,研究方向:数据关联;扈瑜龙(1989-),男,本科,研究方向:指挥自动化;叶杨(1989-),男,本科,研究方向:计算机应用。

