

文章编号:1004-9037(2012)02-0230-06

FB-CS 模型的两层嵌套机动目标跟踪算法

黄伟平¹ 徐 毓¹ 甘少武²

(1. 空军雷达学院科研部, 武汉, 430019; 2. 空军雷达学院训练部, 武汉, 430019)

摘要:针对转弯机动目标,提出了一种两层模型嵌套的跟踪算法。算法的内层模型由基于函数的“当前”统计(Function based current statistic, FB-CS)模型构成,该模型在“当前”统计(Current statistic, CS)模型的基础上,通过加权一个以新息方差之迹为参数的活化函数,对加速度方差和机动频率进行自适应处理,再针对目标的速度方向角进行滤波,将获得的角速度估计值作为外层的输入;外层模型由曲线模型构成,其方向角度、角速度和角加速度由内层模型提供。由于既准确估计目标的角速度,又设计了合理的运动模型,算法显著提高了转弯机动目标的跟踪精度。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词:机动目标跟踪;角速度;两层模型;活化函数;曲线模型

中图分类号:TN 911.72

文献标识码:A

Double-Layer Maneuver Tracking Algorithm of Function Based Current Statistic (FB-CS) Model

Huang Weiping¹, Xu Yu¹, Gan Shaowu²

(1. Department for Scientific Research, Air-Force Radar Academy, Wuhan, 430019, China;

2. Department for Training, Air-Force Radar Academy, Wuhan, 430019, China)

Abstract: A novel double-layer tracking algorithm for turning maneuver target is proposed. It contains the inner layer and the outer layer. The inner layer is composed of function based current statistical (FB-CS) model. In the model, an activate function are introduced, whose argument is the innovation variance's trace. Then, the activate function is used to dispose the error covariance of the acceleration and the frequency of the maneuver. The filter is to attain the direction angular as the input of the outer layer. The outer counter part is composed by curvilinear model. In the model, the direction angular, the angular velocity and the tangential acceleration are calculated based on the angular output of the inner. Because of the reasonable design of the models, the tracking precision for turn maneuver is significantly improved. Experiment demonstrates the efficiency of the proposed algorithm.

Key words: maneuvering target tracking; angular velocity; double-layer model; activate function; curvilinear model

引 言

转弯机动是空中目标运动的一种重要形式,此过程中一方面要基于运动学特性描述目标轨迹,另外一方面要对目标运动中涉及到的两类角加速度:切向加速度和法向加速度进行描述。

曲线模型^[1-2]是一种基于圆周运动的转弯模

型,比较符合转弯运动状态实际,用于本文转弯机动目标的状态估计。在曲线模型中,目标状态估计 $[x(t), \dot{x}(t), y(t), \dot{y}(t)]^T$ 是线量的输入、输出,而需要的运动参数是角度、角加速度以及切向加速度。在转弯过程中,目标的速度方向角度 ϕ 、角速度 ω 和角加速度 β 之间满足导数关系,因而,可以对目标的速度方向角建立状态转移方程和观测方程,在此过程中的加速角度描述采用适当的模型,

就可同时获得目标较精确的方向角、角速度、角加速度。另外,目标的速度方向角度 ϕ 可以通过目标的线量速度获得,即可由曲线模型的状态估计给出;同时,目标方向角的滤波结果正好也是曲线模型的输入参数;目标运动状态和角度滤波结果之间有一种嵌套的关系。

参照文献[3]两层模型设计及文献[4]角度滤波的思路,把目标方向角的滤波结果引入到曲线模型方法当中,构造出两层嵌套的转弯机动目标跟踪算法:内层模型利用基于函数的“当前”统计(Function based current statistical, FB-CS)模型,即以活化函数对机动频率 α 和机动加速度方差 σ_a^2 进行处理,使得机动频率 α 和最大、最小机动加速度 β_{\max} , β_{\min} 关于模型的不确定性保持了较好的鲁棒性;活化函数[5]是以新息方差之迹为参数的,强迫目标速度方向角度 ϕ 的滤波新息序列时刻保持相互正交,从而使改进算法获得自适应地校正估计偏差和迅速跟踪状态变化的能力[6-7],进而得到目标的方向角度 ϕ ,角速度 ω ,并结合目标转弯运动中的几何关系得到目标的切向加速度 a_t ;外层采用曲线模型,在内层状态估计所得目标角度的基本信息基础上进行滤波,就能得到精度高、实时性强的转弯机动跟踪结果。

1 目标转弯运动的几何关系

设目标在 k 时刻转弯,如图1所示。其状态矢量中包括位置 x 与 y , x 和 y 方向的速度、加速度分量 (\dot{x}, \dot{y}) , (\ddot{x}, \ddot{y}) ,及曲线的切向速度 v ,速度 v 的方向角度 ϕ (北极顺时针方向),向心加速度 a_n ,切向加速度 a_t 。

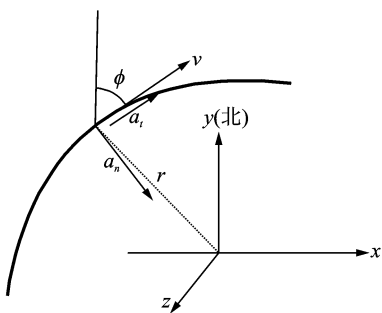


图1 目标运动模型

1.1 线量与角量

设 r 为转弯半径, ω 为角速度, β 为角加速度。则在采样时刻 k ,质点作圆周运动的线量与角量之间的关系如下

$$v(k) = r\omega(k) \quad (1)$$

$$a_t = \left. \frac{dv(t)}{dt} \right|_{t=k} = r\beta \quad (2)$$

$$a_n = r\omega(k)^2 = v(k)\omega(k) \quad (3)$$

目标在直角坐标系中各速度分量为

$$\dot{x}(k) = v(k)\sin(\phi(k)) \quad (4)$$

$$\dot{y}(k) = v(k)\cos(\phi(k)) \quad (5)$$

由式(3~5)经过代换后,可得

$$\omega(k) = \frac{a_n(k)}{\sqrt{\dot{x}(k)^2 + \dot{y}(k)^2}} \quad (6)$$

$$\phi(k) = \arctan\left(\frac{\dot{x}(k)}{\dot{y}(k)}\right) \quad (7)$$

1.2 速度方向角度取值

依据图1,设定目标的速度方向角度在 $0 \sim 2\pi$ 范围内连续取值,由目标在各个坐标轴上的速度,设计速度方向角度取值规则如下

$$\phi(k) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\dot{x}(k)}{\dot{y}(k)}\right) & \dot{x} > 0, \dot{y} > 0 \\ \arctan\left(\frac{\dot{x}(k)}{\dot{y}(k)}\right) + \pi & \dot{x} > 0, \dot{y} < 0 \\ \arctan\left(\frac{\dot{x}(k)}{\dot{y}(k)}\right) + \pi & \dot{x} < 0, \dot{y} < 0 \\ \arctan\left(\frac{\dot{x}(k)}{\dot{y}(k)}\right) + 2\pi & \dot{x} < 0, \dot{y} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

当目标在某一时刻转弯,可由式(8)计算获得其速度方向角度 $\phi(k)$,式(8)也是转弯机动状态和角度之间的纽带。目标速度方向角度 $\phi(k)$ 、角速度 $\beta(k)$ 和角加速度 $\omega(k)$ 之间依次满足导数关系。把 $\phi(k)$, $\beta(k)$ 和 $\omega(k)$ 为状态变量可以建立相应的状态方程,而把由式(8)计算获得的目标方向角度 $\phi(k)$ 当作观测值,可以建立观测方程,从而针对 $\phi(k)$ 进行滤波,可以同时获得目标的方向角速度 $\omega(k)$ 和角加速度 $\beta(k)$ 。

2 FB-CS模型的角度滤波

当目标以某一角加速度机动时,根据当前统计模型的思想[8],可以认为目标的角度加速度 $\beta(k)$ 会在一个有限的范围内,而且目标下一时刻的角加速度只能在当前角加速度的邻域内。但是,在当前统计模型中,目标最大、最小机动加速度 β_{\max} , β_{\min} 和机动频率 α 的选值一般是预先设定的,对于机动加速度大范围变动或突变的目标,其跟踪的快速性和精度的协调较差。同时考虑到目标的加速运动会影响目标的新息,那么,反过来可以利用新息修正预先给定的机动频率 α 与最大、最小机动加速度 β_{\max} ,

$\beta_{-\max}$ 。故本文将以活化函数^[5]对机动频率和机动加速度方差进行处理,提出FB-CS模型准确地估计出目标的角加速度,则既能够得到包含目标可能的运动参数,又能够获得较高的跟踪精度。

2.1 活化函数

建立基于目标方向角度的当前统计模型状态方程为

$$\Omega(k+1) = \mathbf{A}(k)\Omega(k) + \mathbf{B}(k)\bar{\beta}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (9)$$

以目标方向角度 $\phi(k)$ 、角速度为 $\omega(k)$ 量测值,令建立的量测方程为

$$\phi(k) = [1 \ 0 \ 0]\Omega(k) + \mathbf{V}(k) \quad (10)$$

式中,状态向量 $\Omega(k) = [\phi(k), \omega(k), \beta(k)]^T$; $\mathbf{A}(k)$, $\mathbf{B}(k)$ 状态转移矩阵和扰动传输矩阵; $\bar{\beta}(k)$ 为前一时刻的角加速度估计值。 $\mathbf{W}(k)$ 是均值为零,方差为 $\mathbf{Q}(k)$ 的白噪声, $\mathbf{V}(k)$ 是均值为零,方差为 $\mathbf{R}(k)$ 的随机误差。

角度滤波器的残差为 $\mathbf{Y}_k = \phi(k) - \hat{\phi}\left(\frac{k}{k-1}\right)$,是 $\phi(k)$ 和 $\hat{\phi}\left(\frac{k}{k-1}\right)$ 线性组合,其残差序列保持正交性。当机动未发生时,残差 \mathbf{Y}_k 是零均值高斯白噪声,设其方差为 σ_k 。当未发生机动时, \mathbf{Y}_k 服从 $N(0, \sigma_k)$ 分布;当发生机动时,服从 $N(\mu, \sigma_k)$ 分布,其均值不再是零,而是偏差 μ 。因此通过检验残差的均值,就可以确定系统是否发生了机动。但是,直接通过新息的这种多维分布来确定检验条件是十分复杂的,因此,需要找到一个标量的检验条件,使判别过程简化。

新息 \mathbf{Y}_k 为高斯随机向量,故新息方差服从自由度为 m (观测向量维数)的 χ^2 分布,即 $\mathbf{Y}_k^T \mathbf{Y}_k \sim \chi^2(m)$,本文采用 σ_k 的迹($\text{tr}[\sigma_k]$)作为检验标准,因为 $\text{tr}[\sigma_k]$ 和新息序列具有相同的统计特征,而新息序列的统计特性又可以反映出测量值的统计特性。于是,可由下列步骤得到活化函数 f_k :

(1) 根据极大似然比检验原理,得到检测函数

$$\text{Tr}[\sigma_k] \sim \chi^2(m) \quad (11)$$

(2) 由 $P_{fa} = P[\text{tr}(\sigma_k) \geq \epsilon | H_0] = \lambda$,求门限值 ϵ ,具体如下:

根据NP准则,在给定显著水平 λ 下, $P_{fa} = \lambda$ 时,由 $P_{fa} = P[\text{tr}[\sigma_k] \geq \epsilon | H_0] = \lambda$,取显著水平 $\lambda = 0.01$,查 χ^2 分布表解出门限值 $\epsilon = 11.345$, ϵ 可使漏警率 $P_m = P[\text{tr}[\sigma_k] < \epsilon | H_1]$ 达到最小。

(3) 构造统计标量

$$d = \mathbf{Y}_k^T \sigma_k^{-1} \mathbf{Y}_k \quad (12)$$

(4) 活化函数^[8]的作用在于对所观测目标机动做出迅速反应,并对模型参数及新息进行调节,以保证新息的特性不变,即保证观测量的统计特性不变。当取活化函数 f_k 为如下形式时,新息的统计特性保持不变

$$f_k = \begin{cases} 1/d & \text{tr}[\sigma_k] > \epsilon \\ 1 & \text{tr}[\sigma_k] \leq \epsilon \end{cases} \quad (13)$$

2.2 改进的机动频率和机动加速度

根据活化函数 f_k ,就可以对机动频率和机动加速度方差进行处理。设机动频率为 α , $\alpha_0 = 1/\tau$, τ 为目标机动时间常数,定义平均加速度计算式为

$$\bar{\beta}_p = \frac{1}{l} \sum_{i=k-l}^{k-1} \bar{\beta}(i) \quad (14)$$

式中, $\bar{\beta}(i)$ 为截止“当前”时刻的前 l 点的平均值,为提高“当前”加速度估计鲁棒性,特设置步长 l ,综合“当前”时刻最近的几个时刻的加速度,利用 $k-l \sim k-1$ 平均值估计“当前”加速度均值, l 根据具体情况取值,一般取3~10之间的整数,在前 l 点 $\bar{\beta}_p$ 为一给定值。得到机动加速度方差更新式

$$\sigma_{\beta}^2 = E[(\hat{\beta} - \bar{\beta}_p)^2 | \phi(k)] \quad (15)$$

给出机动频率计算式

$$\alpha = f_k \alpha_0 \quad (16)$$

根据式(13-16)计算“当前”统计模型的 $\mathbf{A}(k)$, $\mathbf{B}(k)$ 和 σ_{β}^2 值,就能得到FB-CS模型。

2.3 改进的“当前”统计模型

状态转移矩阵 $\mathbf{A}(k)$ 、扰动传输矩阵 $\mathbf{B}(k)$ 和噪声方差 $\mathbf{Q}(k)$ 分别为

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{B}(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} \left(-T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \right) \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{Q}(k) = 2\alpha\sigma_{\beta}^2 \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

设 β_{\max} , $\beta_{-\max}$ 为最大、最小机动加速度,则

$$\sigma_{\beta}^2 = \begin{cases} \frac{4-\pi}{\pi} [f_k \beta_{\max} - \bar{\beta}_p]^2 & \bar{\beta}_p > 0 \\ \frac{4-\pi}{\pi} [f_k \beta_{-\max} + \bar{\beta}_p]^2 & \bar{\beta}_p < 0 \end{cases} \quad (20)$$

在“当前”统计模型中, $\beta_{\max}, \beta_{-\max}$ 直接影响模型中“当前”加速度的方差 σ_{β}^2 , 而 σ_{β}^2 的大小又直接影响过程噪声的方差, 从而影响机动目标跟踪的性能。FB-CS 模型通过引入时变的活化函数, 使得滤波器关于模型的不确定性保持了较好的鲁棒性, 在跟踪弱机动目标时, 输出新息方差较小, 活化函数相应较小, 目标发生突发机动时, 活化函数相应增大, 从而自适应地调整加速度方差及机动频率, 提高机动目标跟踪性能。故采用该模型滤波来可得到方向角度 $\phi(k)$ 、角速度 $\omega(k)$ 和角加速度 $\beta(k)$ 更精确地实时估计。

3 基于曲线模型的转弯状态跟踪

设目标在某一时刻转弯如图1所示, 在直角坐标系上, 目标的速度分量如(4,5)所示。则可得二阶连续形式的目标状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(k) & \ddot{x}(k) & \dot{y}(k) & \ddot{y}(k) \end{bmatrix}^T = \mathbf{F}(k) \begin{bmatrix} x(k) & \dot{x}(k) & y(k) & \dot{y}(k) \end{bmatrix}^T + \mathbf{G}(k) \begin{bmatrix} a_t & a_n \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

式中

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \sin(\phi(k)) & \cos(\phi(k)) \\ 0 & 0 \\ \cos(\phi(k)) & \sin(\phi(k)) \end{bmatrix}$$

针对飞机或舰船, 在雷达处于正常扫描率情况下, 一般满足式(22,23)两个条件^[9]

$$\left| \frac{\dot{a}_n(k)}{a_n(k)} \right| \ll \left| \frac{a_t(k)}{v(k)} \right| \quad (22)$$

$$\left| \frac{a_t(k)}{v(k)} \right| \ll \frac{2}{T} \quad (23)$$

式中 T 为采样周期。

在式(22,23)条件限定下, 据式(3-5), 对式(20)积分, 并离散化可得

$$\begin{bmatrix} x(k+1) & \dot{x}(k+1) & y(k+1) & \dot{y}(k+1) \end{bmatrix}^T = \mathbf{\Psi}(k) \begin{bmatrix} x(k) & \dot{x}(k) & y(k) & \dot{y}(k) \end{bmatrix}^T + \mathbf{\Gamma}(k) \begin{bmatrix} a_t \\ a_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中, 矩阵 $\mathbf{\Psi}(k), \mathbf{\Gamma}(k)$ 的取值见文献[2,3]。

假设仅有距离测量, 则测量方程为

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ y(k) \\ \dot{y}(k) \end{bmatrix} \quad (25)$$

对式(24)进行讨论, 不难发现:

(1) 当 $a_t(k)=0, a_n(k)=0$ 时, 式(24)退化成匀速直线运动模型。

(2) 当 $a_t(k) \neq 0, a_n(k)=0$ 时, 式(24)中的第2项系数变为 $[0.5T^2 \sin\phi(k) T \sin\phi(k) 0.5T^2 \cdot \cos\phi(k) T \cos\phi(k)]^T$, 表示目标做匀加速直线运动。

(3) 当 $a_t(k)=0, a_n(k) \neq 0$ 时, 式(24)表示目标做匀速圆周运动, 此时正好是常速转弯(Constant turn, CT)模型。因此, CT模型只是该曲线模型的一种特殊情况。

因此, 曲线模型具有较好的适应性和精确性, 只要实时估计出目标的方向角度 $\phi(k)$, 切向加速度 $a_t(k)$ 和目标的角速度 $\omega(k)$, 就可以由式(24,25)通过递推滤波来跟踪目标。

4 两层嵌套的机动目标跟踪算法

据式(3-5), 可有下列关系

$$a_t^2(k) = \ddot{x}^2(k) + \ddot{y}^2(k) - a_n^2(k) = \ddot{x}^2(k) + \ddot{y}^2(k) - v^2(k)\omega^2(k) \quad (26)$$

$$\ddot{x} = \frac{\dot{x}(k) - \dot{x}(k-1)}{T}, \ddot{y} = \frac{\dot{y}(k) - \dot{y}(k-1)}{T}$$

因而, 只要通过改进“CS”模型的“目标角速度估计方法”实时估计出目标的转弯角速度 $\omega(k)$, 就可以由式(26)获得目标的切向加速度 $a_t(k)$ 估计值, 最后针对式(25)进行递推滤波, 可以实现转弯机动目标的实时跟踪。具体跟踪步骤如下:

(1) 假定目标初始段是匀速直线运动。可由最初连续二点获得目标的速度方向角度 $\phi(0)$, 并假定目标的加速度 $a_t(0) \approx 0$, 角速度 $\omega(0)$ 为某一极小值, 获得曲线模型初始输入参数序列 $[\phi(0), \omega(0), a_t(0)]^T$ 。

(2) 当 k 时刻的测量值 $\mathbf{Z}(k) = (x, y)$ 到达时, 依据式(24,25)进行卡尔曼滤波, 获得目标状态滤波更新值 $[x(k), \dot{x}(k), y(k), \dot{y}(k)]^T$ 。

(3) 依据式(8)计算 $\phi(k)$, 利用FB-CS模型, 依据式(9-10)和式(17-19)进行卡尔曼滤波, 获得目标的角速度 $\omega(k)$, 再依据式(26)计算 $a_t(k)$ 。

(4) 根据已经获得的目标方向角度 $\phi(k)$, 角速度 $\omega(k)$ 和切向加速度 $a_t(k)$, 针对式(24,25)进行递推滤波, 从而可实现转弯机动目标的实时跟踪。

5 仿真实验

本文的目标跟踪算法针对飞机或舰船类目标,在雷达处于正常扫描率情况下展开的,这里,依据文献[10]仿真条件验证目标在连续高机动环境下的跟踪性能。假设目标做大机动的连续转弯运动,转弯速度及相应时间如表1所示。

表1 目标转弯时间及速度分布

开始时刻 t/s	持续时间/s	转弯速度/ $(^\circ) \cdot s^{-1}$
0	7	10
7	10	-25
17	6	35
23	6	10
29	10	-25
39	6	35
45	5	0

为了证明算法的有效性和实用性,取200个测量值,从正确跟踪概率和转弯速率估计两方面,步长 l 通过实验选取,其他基本参数设置同上,将本文基于FB-CS的两层嵌套机动目标跟踪算法,记为DL(FB-CS)和DL(CS)以及CS,交互多模型(Interactive multiple model, IMM)(根据场景特征选择CA/CV两模型)进行对比实验,并在仿真实验中找出该场景下 l 的最佳值。

通过图2-4可以看出,由实验结果可知:在目标连续高机动情况下,FB-CS模型的两层嵌套机动目标跟踪算法是实现转弯机动跟踪的较好算法,无论是正确跟踪概率还是对高机动转弯速率的估计,均取得较好效果。

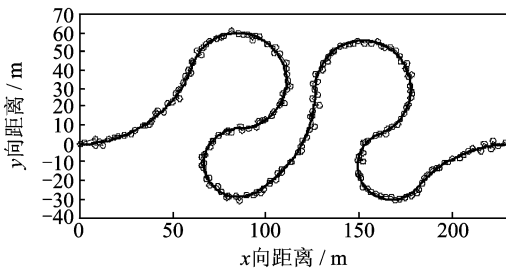


图2 目标转弯运动轨迹

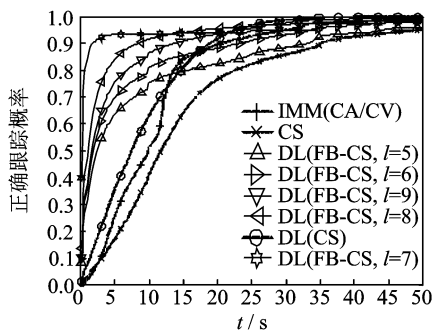
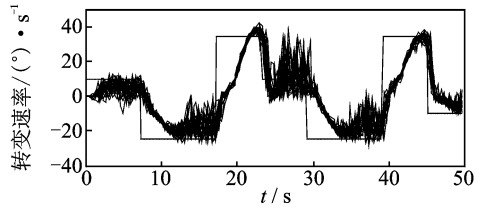
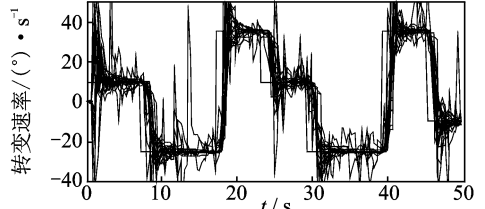


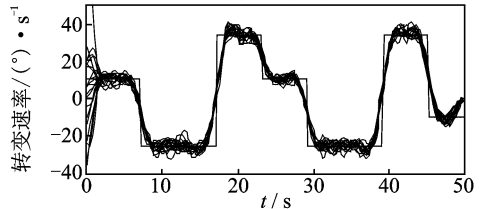
图3 各机动算法正确跟踪概率



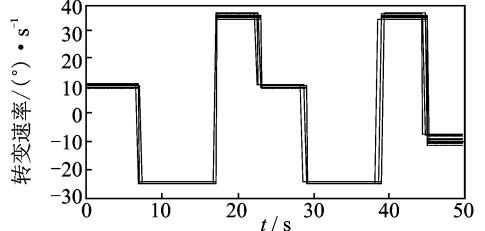
(a) IMM(CA/CV)



(b) DL(CS)



(c) DL(FB-CS), $l=6$



(d) DL(FB-CS), $l=7$

图4 各跟踪算法转弯速率估计

本文提出的FB-CS模型的两层嵌套算法,在跟踪步长 $l=7$ 时,达到最优跟踪效果。两层嵌套的机动目标跟踪算法由于既设计了合理的模型,又得到了精确的角度滤波值,对于连续高机动的转弯目标具备较好跟踪能力。同时,两层模型嵌套的结构设计,避开了基于多模型方法的复杂切换问题,计算时间适中,能很好地兼顾实时性和精确性。所以,两层嵌套的转弯机动目标跟踪算法不管在跟踪效果还是计算复杂度上都能得到较好的平衡,仿真实验验证了算法的有效性。

6 结束语

本文分析了目标转弯运动采用曲线模型进行目标跟踪需要的几个角度参数,结合目标的速度方向角度、角速度和角加速度之间的导数关系,通过使用FB-CS模型方法对目标的方向角度进行滤波,获得了准确的角速度估值,同时依据得到的方向角度、角加速度,进一步计算出切向加速度,这些值作为曲线模型的输入,通过曲线模型的跟踪滤波

对转弯机动目标的状态进行实时跟踪。仿真实验表明,本文提出的两层嵌套的转弯机动目标跟踪算法不仅能实时跟踪目标,还能得到精确的速度跟踪效果,也避免了多模型切换方法的复杂计算问题,算法适用度高。

参考文献:

- [1] 李涛,王宝树,乔向东. 曲线模型的半自适应交互多模型跟踪方法[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 332-335.
Li Tao, Wang Baoshu, Qiao Xiangdong. Half adaptive interactive multiple model tracking algorithm of curvilinear model [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2): 332-335.
- [2] Best R A, Limited G M, Avenue E. A new model and efficient tracker for a target with curvilinear motion [J]. IEEE Trans AES, 1997, 33(3): 1030-1037.
- [3] Li X R. Multiple-model estimation with variable structure—part II: model-set adaptation [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(11): 2047-2060.
- [4] Munir A, Mirza J A. Parameter adjustment in the turn rate models in the interacting multiple model algorithm to tracking a maneuvering target [C]//Multi Topic Conference. [S.l.]: IEEE, 2001.
- [5] 卢迪,姚郁,贺风华. 一种抗野值的Kalman滤波器[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 1027-1029.
Lu Di, Yao Yu, He Fenghua. Kalman filter restraining outliers [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(5): 1027-1029.
- [6] 范小军,刘峰,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, 2006, 34(6): 981-984.
- Fan Xiaojun, Liu Feng, Qin Yong, et al. Current statistic model and adaptive tracking algorithm based on strong tracking filter [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 981-984.
- [7] 孙福明,吴秀清,祁凯. 基于当前统计模型的自适应跟踪算法[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 & Processing, 2008, 23(2): 191-195.
- [8] 周宏仁. 机动目标“当前”统计模型与自适应跟踪算法[J]. 航空学报, 1983, 4(1): 73-86.
Zhou Hongren. A "current" statistical model and adaptive tracking algorithm for maneuvering targets [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1983, 4(1): 73-86.
- [9] 孙福明. 机动目标跟踪状态估计与数据关联技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
Sun Fuming. Research on state estimation and data association of motion targets [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [10] Emil S, Mihaylova L, Li X R. Variable- and fixed-structure augmented IMM algorithms using coordinated turn model [C]//Fusion 2000. Paris, France: [s.n.], 2000: 186-194.

作者简介:黄伟平(1982-),女,博士,研究方向:目标跟踪、信息融合等,E-mail:kjld_hwp@163.com;徐毓(1957-),男,教授,博士生导师,研究方向:信息融合、数据处理等;甘少武(1967-),男,副教授,硕士生导师,研究方向:作战运筹、控制决策等。