

一种新的机动目标跟踪的多模型算法

巴宏欣 赵宗贵* 杨飞 刘海燕

(解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)

*(中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210014)

摘要: 设计了一种仅仅使用两个模型实现对机动目标精确跟踪的多模型算法, 采用了含有法向和切向加速度的加速度均值自适应的当前统计模型和扩展后的常速模型进行交互。该算法不受目标转弯率大小和变化的限制, 对目标运动模式的未知参数变化的适应性较强。仿真结果表明, 该算法对目标的跟踪精度明显优于传统的使用3个以上模型交互的IMM-CV/CT算法。由于本算法能够估计出目标的法向和切向加速度, 进行适当的模型集设计后, 可以实现对复杂、快速机动目标的全过程跟踪, 具有可扩展性的应用前景。

关键词: 多模型, 目标跟踪, 模型集设计, 自适应估计

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)01-0013-04

A New IMM Method for Tracking Maneuvering Target

Ba Hong-xin Zhao Zong-gui* Yang fei Liu Hai-yan

(Institute of Command Automation, PLA Univ. of Sci & Tech., Nanjing 210007, China)

*(28th Institute of CETC, Nanjing 210014, China)

Abstract A new IMM algorithm for tracking maneuvering target is proposed, which only uses two models that consist of a CS model and an augmented CV model for interaction. The CS model which uses the state variable with normal acceleration and tangent acceleration is fit for the accurate tracking of coordinated turn movement. This method is not subjected to the limit of the magnitude and change of turn rate, and has more flexibility to uncertain parameters. The simulation shows that this algorithm is superior to the conventional IMM-CV/CT algorithm which uses more than three models for interaction in terms of the accuracy of tracking and adaptation. Because this algorithm can estimate the normal and tangent acceleration, it may be used to implement the tracking for the complexly and highly maneuvering target after appropriate model-set design.

Key words Interacting multiple models, Target tracking, Model-set design, Adaptive estimation

1 引言

多模型算法因强大的功能和结构化、稳健性等特点, 在目标跟踪、故障检测和隔离、信号处理、过程控制^[1-3]等诸多领域有着广泛的应用。早期的多模型估计^[4]是静态的, 未考虑系统模式的转移, 模型之间是没有交互的, 因此当系统模式发生变化时, 会发生漏警现象。近年来发展起来的伪贝叶斯 (Generalized Pseudo Bayes, GPB) 算法和交互多模型 (Interacting Multiple Model, IMM) 算法^[5]均假设模型之间可以发生转移, 使用 Markov 或半 Markov 来实现模型间的转换。其中 IMM 算法因其在计算复杂度和性能上取得比较好的折中, 并且具有模块化和可递推实现以及周期计算量固定等优

点, 在目标跟踪中被广泛使用。

在使用 IMM 算法进行目标转弯运动跟踪时, 经常使用的模型集合是坐标转弯运动 (Coordinated Turn, CT) 和恒速 (Constant Velocity, CV) 运动模型的交互^[3,6], 例如采用两个标准 CT 模型和一个 CV 模型适用于空中交通管制中对目标的精确跟踪, 但是该方法不适合歼击航空兵截击作战中转弯率快速变化的目标。随着现代航空器的机动能力越来越强, 用少数几个模型是难以匹配真实目标的运动模式的。如果增加模型个数, 能够增加目标运动模式与模型的匹配程度, 但是运算量也会随着增加, 而且在同一时刻模型之间会产生竞争, 而使跟踪性能下降。因此, 如何进行模型集设计, 使用较少的模型数达到既能够适应目标运动参数的变化, 又能满

足较高的跟踪精度, 是一个值得深入研究的问题。

本文提出了使用一个含有法向和切向加速度的均值自适应的当前统计模型(略称CS模型)^[7]和一个常速(CV)模型组成模型集(简称IMM-CV/CS算法), 实现对转弯运动的精确跟踪。因为含有法向和切加速度的CS模型对转弯运动模式跟踪精度高, 但是对于目标的常速运动模式的跟踪精度相对较低。CV模型对于目标的常速运动模式是精确匹配的, 跟踪精度较高; 而对于转弯运动模式, 由于模型的不匹配, 导致跟踪精度相对较低。把这两个模型进行交互, 则可以取长补短, 对机动转弯目标实现较高精度的跟踪, 仿真实验证明了这一算法的有效性。与传统的IMM-CT/CV算法(1个CV和2/4个CT组成的模型集)结果相对比, 本算法具有较优越的性能: 减少了使用的模型数目, 提高了跟踪精度, 对目标运动模式的未知参数变化的适应性增强。

2 算法描述

2.1 使用CV/CS模型的IMM算法

2.1.1 使用法向和切向加速度的CS模型 选择状态变量

$X = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ a_t \ a_n]$, 则线性系统的状态方程:

$$\dot{X}(t) = F \cdot X(t) + U(t) + w(t) \quad (1)$$

其中 $U(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \alpha_t \bar{a}_t \ \alpha_n \bar{a}_n]^T$ 为状态方程的控制项。这里, α_t 和 α_n 分别为切向和法向加速度的机动时间常数, \bar{a}_t 和 \bar{a}_n 为切向和法向加速度的当前均值。

$w(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ w_t(t) \ w_n(t)]^T$ 输入噪声向量。

这里

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{11} & c_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{21} & c_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_n \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} c_{11} &= \cos \beta \\ c_{12} &= -\sin \beta \\ c_{21} &= \sin \beta \\ c_{22} &= \cos \beta \end{aligned} \right\}, \quad \beta = \arctg(\dot{y}/\dot{x})$$

系统离散化后的状态方程为

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + U(k-1) + W(k-1) \quad (2)$$

因为仅有含噪声的位置数据, 所以量测方程为

$$H(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

推广的卡尔曼滤波方程如下:

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k/k-1) + K(k)(Y(k) - H(k)\hat{X}(k/k-1)) \quad (4)$$

$$\hat{X}(k/k-1) = \Phi(k, k-1)X(k-1/k-1) + U(k) \quad (5)$$

$$K(k) = P(k/k-1)H^T(k)(H(k)P(k/k-1)H^T(k) + R(k))^{-1} \quad (6)$$

$$P(k/k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1/k-1)\Phi^T(k, k-1) + Q(k-1) \quad (7)$$

$$P(k/k) = [I - K(k)]H(k)P(k/k-1) \quad (8)$$

当采用加速度均值自适应算法时, 可令

$$\bar{a}_t(k) = \hat{a}_t(k/k-1), \quad \bar{a}_n(k) = \hat{a}_n(k/k-1)$$

则状态预测的计算可以简化。式(5)变为

$$\hat{X}(k/k-1) = \Phi(k, k-1)X(k-1/k-1) \quad (9)$$

其中

$$\Phi(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & c_{11}\xi_{13} & c_{12}\xi_{23} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & c_{11}\xi_{12} & c_{12}\xi_{22} \\ 0 & 0 & 1 & T & c_{21}\xi_{13} & c_{22}\xi_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & c_{21}\xi_{12} & c_{22}\xi_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \xi_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \xi_{21} \end{bmatrix}$$

$$\Phi(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & c_{11}\frac{T^2}{2} & c_{12}\frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & c_{11}T & c_{12}T \\ 0 & 0 & 1 & T & c_{21}\frac{T^2}{2} & c_{22}\frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & c_{21}T & c_{22}T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ξ_{ij} 为 α_t , α_n 的函数。

2.1.2 扩展后的CV模型 为了常速运动与使用法向和切向加速度的CS模型的状态变量一致, 需要对恒速运动的状态变量进行扩展, 即对目标估计的状态变量增加切向加速度 a_t 和法向加速度 a_n 这两个分量。扩展后的常速运动的状态方程为

$$X(k) = F_{CV}^a X(k-1) + G_{CV}^a W(k-1) \quad (10)$$

其中

$$F_{CV}^a = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{CV}^a = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$W(k-1)$ 为零均值的随机扰动噪声。

2.2 使用 CV/CT 模型的 IMM 算法

2.2.1 扩展后的 CT 模型 坐标转弯 (CT)^[8]模型能精确地表达具有已知转弯率 ω 的水平飞行目标的转弯运动模式, 但是对实际的目标运动进行估计时, 不可能精确知道目标的转弯率 ω , 需要实时估计 ω , 因此要在标准的 CT 模型上进行扩展, 在状态向量上增加一个 ω 元素。扩展后的 CT 的状态方程为

$$X(k) = F_{CT}^a X(k-1) + G_{CT}^a W(k-1) \quad (11)$$

其中

$$F_{CT}^a(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \omega T}{\omega} & 0 & \frac{1 - \cos \omega T}{\omega} & 0 \\ 0 & \cos \omega T & 0 & -\sin \omega T & 0 \\ 0 & \frac{1 - \cos \omega T}{\omega} & 1 & \frac{\sin \omega T}{\omega} & 0 \\ 0 & \sin \omega T & 0 & \cos \omega T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{CT}^a = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.2 扩展后的 CV 模型 为了使恒速运动与转弯运动模型的状态变量一致, 需要对恒速运动的状态变量进行扩展, 扩展的方法同对 CT 模型的处理。扩展后的常速运动状态方程为

$$X(k) = F_{CV}^a X(k-1) + G_{CV}^a \cdot W(k-1) \quad (12)$$

其中

$$F_{CV}^a = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{CV}^a = G_{CT}^a$$

$W(k-1)$ 为零均值的随机扰动噪声。

这样, 扩展后的状态方程, 就可以分别在统一的、扩展后的状态变量上进行交互了。

3 仿真结果

3.1 仿真场景设计

本仿真算例的设计参考了文献[3,8]。包括几个 CV 运动和几个 CT 运动。扫描周期 $T=1s$ 。初始速度为 300m/s。进入角度为 300° 。在扫描周期[61,105]和[151,195]内的转弯率

分别为 $3.74^\circ/s$ 和 $-3.74^\circ/s$ 。其他周期做恒速飞行。对笛卡儿坐标系内的每个方向的位置量测标准偏差为 $\sigma=100m$, 假设 x 轴和 y 轴的量测是不相关的。

本算法的模型集合由两个模型组成: 一个使用法向和切向加速度的 CS 模型和一个 CV 模型进行交互。与本算法相对比的传统的 IMM-CV/CT 算法所采用的模型集合由 3 个模型组成, 包括一个 CV 模型和两个 CT 模型 (分别代表逆时针和顺时针转弯运动), 其中 CT 模型的最大转弯率分别为 $4^\circ/s$ 和 $-4^\circ/s$ 。本算法和 IMM-CT/CV 算法使用的马尔可夫转移概率矩阵分别为

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}, \quad P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 \end{bmatrix}$$

3.2 仿真结果分析

通过 100 次 Monte Carlo 仿真来验证本算法的有效性, 同时给出与 IMM-CV/CT 算法的比较, 结果见图 1~图 4。本文给出的结果为位置均方根误差(RMSE(m))和速度均方根误差(RMSE(m/s))。通过对图中 IMM-CV/CS 及 IMM-CV/CT 算法的对飞机转弯运动的跟踪结果的分析比较, 可以看出: IMM-CV/CS 相对于 IMM-CV/CT 对机动目标具有更高的跟踪精度。而且 IMM-CV/CS 仅使用两个模型进行交互, 优于 IMM-CV/CT 的 3 个模型的交互。IMM-CV/CT 需要预先设定最大转弯率等先验值, 而 IMM-CV/CS 不需要这种先验的设定和限制, 对任何未知转弯率目标或者转弯率快速变化的目标均有较好的跟踪效果。

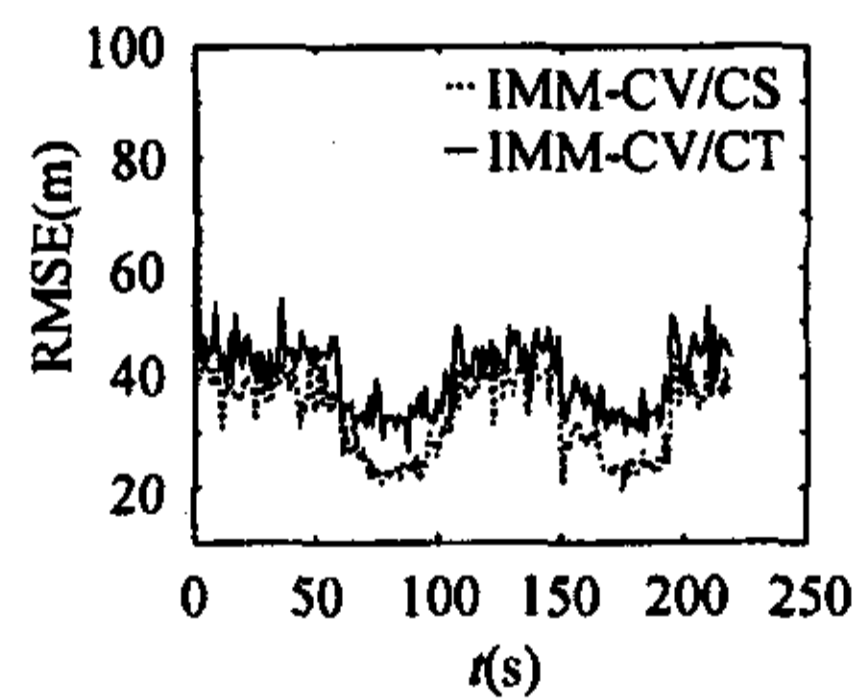


图 1 x 方向位置均方根误差

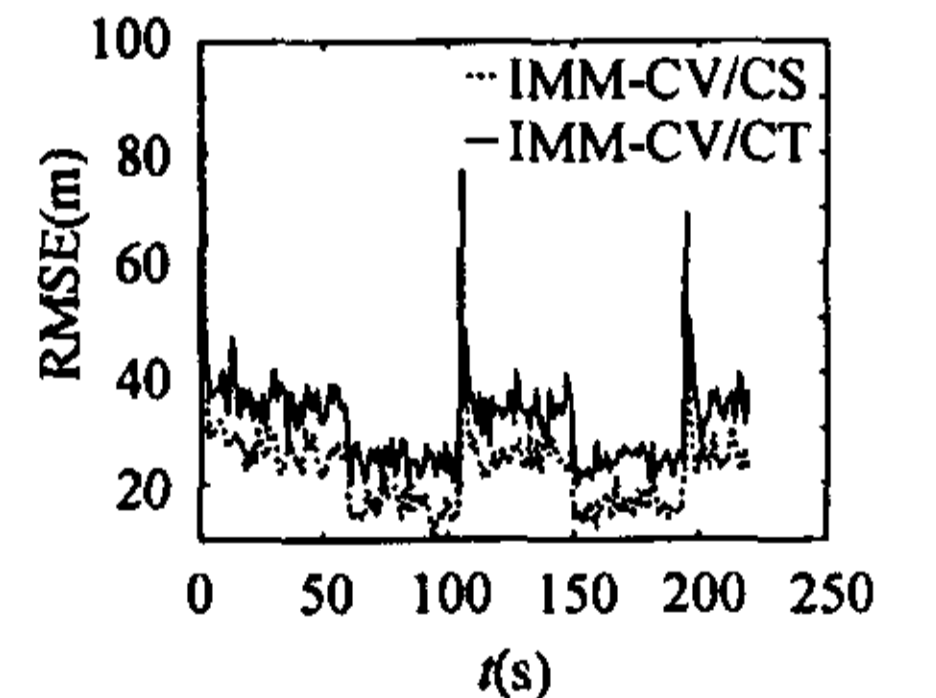


图 2 y 方向位置均方根误差

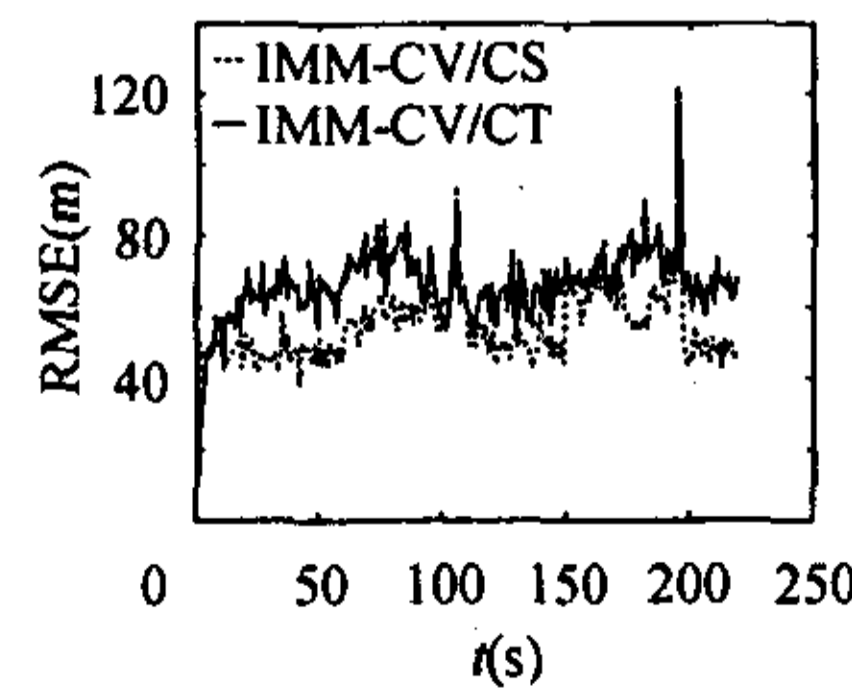


图 3 x 方向速度均方根误差

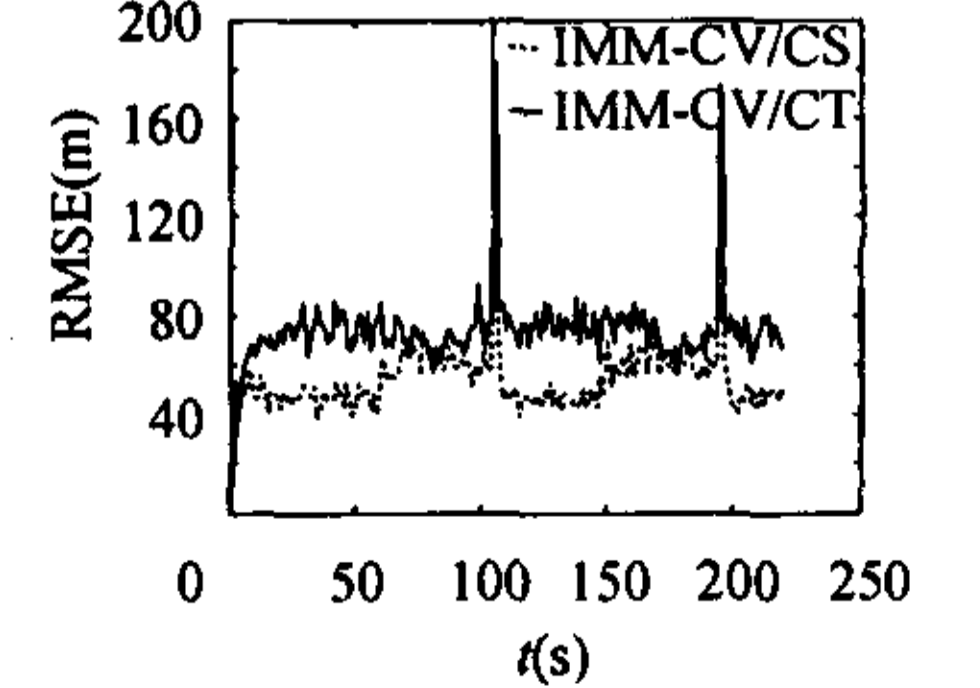


图 4 y 方向速度均方根误差

4 结论

本文基于对多模型算法对机动目标跟踪的研究基础上, 提出了一种仅仅使用两个模型实现对机动目标精确跟踪的多模型算法, 采用了含有法向和切向加速度的加速度均值自

适应的当前统计模型和扩展后的恒速模型进行交互。文献[1]指出,在满足跟踪精度的前提下,使用越少的模型进行模型集设计越好。仿真结果表明,本算法对目标的跟踪精度明显优于传统的使用 3 个以上模型交互的 IMM-CV/CT 算法。

传统的 IMM-CV/CT 算法一般都有目标最大转弯率的先验限制,如果增大目标的转弯率的变化适应范围同时还要满足跟踪精度,则需要增加模型的数目或采用变结构的多模型算法。而本算法不受目标转弯率大小和变化的限制,因此对目标运动模式的未知参数变化的适应性强。由于本算法能够估计出目标的法向和切向加速度,进行适当的模型集设计后,可以实现对复杂、快速机动目标的全过程跟踪,具有可扩展性的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Li X R. Multiple-model estimation with variable structure—Part II: Model-set adaptation. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2000, 45(11): 2047 – 2060.
- [2] Li X R. Hybrid estimation techniques, Leondes C T. ed. *Control and Dynamic System: Advances in Theory and Applications*. New York: Academic, 1996, 76: 213 – 287.
- [3] Li X R, Bar-Shalom Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, 1993, 1(3): 186 – 194.
- [4] Magill D. Optimal adaptive estimation of sampled stochastic processes. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1965, 10(4): 434 – 439.
- [5] Blom H A P, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1988, 33(8): 780 – 783.
- [6] Li X R, Zhao Zhanlue, Zhang Peng, He Chen. Model-set design for multiple-model method. II. Examples. in Proc. The Fifth International Conference on Information Fusion, Washington DC, USA, 2002, 2: 1347 – 1354.
- [7] 周宏仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪. 北京:国防工业出版社, 1991, 第 8~10 章.
- [8] Jilkov V P, Angelova D S, Semerdjiev T A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 343 – 350.
- 巴宏欣: 女, 1972 年生, 博士生, 主要研究领域为数据融合、目标跟踪和识别、态势估计等.
- 赵宗贵: 男, 1943 年生, 高级研究员, 博士生导师, 现任中国电子科技集团公司第二十八研究所副总工程师。主要研究领域为数据融合、多目标跟踪等.
- 杨 飞: 女, 1973 年生, 讲师, 主要研究领域为自然语言处理、决策支持和计算机仿真.
- 刘海燕: 女, 1978 年生, 博士生, 主要研究领域为数据融合、目标跟踪与识别、态势估计等.