

## 临近空间高超声速滑跃式机动目标跟踪的 IMM 算法

李俊杰<sup>1,2</sup>, 王国宏<sup>1</sup>, 张翔宇<sup>1</sup>, 吴巍<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92635 部队, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 临近空间高超声速飞行器运动轨迹未知且运动状态多变, 传统的单模型算法会与之发生失配进而影响目标跟踪精度。针对目标的滑跃式机动, 提出采用基于 CV-CA-正弦波模型的交互式多模型 (IMM) 算法对其进行跟踪, 并与基于 CV-CA-Singer 的 IMM 算法、基于 CV-CA-CA 的 IMM 算法的跟踪效果进行比较。Monte Carlo 仿真实验表明, 基于 CV-CA-正弦波模型的 IMM 算法对临近空间高超声速滑跃式机动目标具有较好的跟踪效果。

**关键词:** 临近空间; 高超声速飞行器; 目标跟踪; 交互式多模型; 正弦波模型

**中图分类号:** TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)09-0015-05

## An IMM Algorithm for Tracking Near-Space Hypersonic Target with Slippage Leap Maneuvering

LI Jun-jie<sup>1,2</sup>, WANG Guo-hong<sup>1</sup>, ZHANG Xiang-yu<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>

(1. Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. No. 92635 Unit of PLA, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** Because the near-space hypersonic vehicle's flight trajectory is unknown and its motion mode is varying during the flight, the traditional single tracking model algorithm may mismatch target's motion and thus decrease its tracking precision. As for the target's slippage leap maneuvering, an Interacting Multiple Model (IMM) algorithm based on CV model, CA model and sine wave model was proposed for tracking vehicles with such kind of maneuvering. The results of Monte Carlo simulation experiments show that: compared with the IMM algorithm based on CV-CA-Singer model and the IMM algorithm based on CV-CA-CA model, the IMM algorithm proposed here has better tracking performance to near space hypersonic target with slippage leap maneuvering.

**Key words:** near space; hypersonic vehicle; target tracking; interacting multiple model; sine wave model

### 0 引言

近年来,在科学技术进步的推动及新军事武器需求的牵引作用下,临近空间<sup>[1-2]</sup>逐渐引起了世界各国的重点关注。为了能在临近空间这一特殊战略空域占有一席之地,以美国为首的军事强国或地区联盟,通过持续投入大量的经费,积极开展对临近空间及临近空间飞行器<sup>[3]</sup>的技术研究。较其他中低速飞行器,临近空间高超声速飞行器具有飞行速度快、突防能力强等优势,因而成为当前研究的重点与热点。

临近空间高超声速飞行器的一个显著特点就是飞行轨迹未知且运动状态多变,而对于机动目标跟踪而言,最大的挑战就是来自对目标运动模式的不确定性,期望使用单模型跟踪算法与目标真实的多变运动状态失配相匹配是不现实的。目前解决目标跟踪模型与目标运动状态失配的最好办法是借助多模型算法,通过设计一个合理的模型集,该模型集里包含可与目标不同运动状态相匹配的模型,以应对因目标运动状态未知且多变引起的模型失配问题。

基于 CV-CA-Singer 的交互式多模型 (IMM) 算法在国内外研究较多<sup>[4-5]</sup>,而且现阶段国内研究临近空间高超声速目标跟踪技术的文献中,都采用了该算法。文献[6]将临近空间高超声速飞行器飞行轨迹分为助推、巡航和攻击阶段后,针对飞行器的直线平飞加速巡航段以及之后的俯冲攻击段,提出了基于 CV-CA-Sing-

收稿日期:2014-10-24

修回日期:2015-06-23

基金项目:国家自然科学基金(61372027,61102165);“泰山学者”建设工程专项经费

作者简介:李俊杰(1985—),男,河南灵宝人,硕士生,工程师,研究方向为机动目标跟踪与信息融合。

er 的 IMM 算法;文献[7]研究了进行滑跃式机动飞行的临近空间高超声速目标的跟踪问题,通过建立临近空间飞行器的运动模型并形成滑跃式的飞行轨迹,也提出了采用基于 CV-CA-Singer 的 IMM 算法对临近空间滑跃式机动目标进行跟踪的方法。上述两个文献所用的 IMM 算法模型集里的 Singer 模型,适用于跟踪直线运动轨迹上突发机动的目标,但是否适用于滑跃式机动目标的跟踪,还需进一步深入研究。

为此,本文引入文献[8]中专门适用于目标滑跃式机动的正弦波模型,将其与 CV 模型、CA 模型组成 IMM 算法,与文献[6-7]中基于 CV-CA-Singer 的 IMM 算法和文献[9]中基于 CV-CA-CA 的 IMM 算法进行比较。选择基于 CV-CA-CA 的 IMM 算法是因为考虑到国外文献中普遍认为该算法能够较好地胜任机动目标跟踪的任务。

为书写方便,将上述 3 种不同模型组成的算法作以下的简记:IMM1 算法为基于 CV-CA 和正弦波模型的 IMM 算法;IMM2 算法为基于 CV-CA-Singer 的 IMM 算法;IMM3 算法为基于 CV-CA-CA 的 IMM 算法。

## 1 跟踪模型

### 1.1 正弦波模型<sup>[8]</sup>

考虑临近空间高超声速飞行器可能进行的周期性滑跃式机动飞行,本文将  $t$  时刻目标加速度  $\mathbf{a}(t)$  的自相关函数建模为正弦波自相关时间函数  $R_\tau$ ,即

$$R_\tau = E[\mathbf{a}(t)\mathbf{a}(t+\tau)] = \sigma_w^2 \cos(\omega_0 \tau) \quad (1)$$

式中: $E(\cdot)$  表示求期望; $\sigma_w^2$  为目标的加速度方差; $\omega_0$  为目标周期机动的角速率; $\tau$  为时间差。

由于该自相关函数不存在双边拉普拉斯变换,故从其功率谱来考虑

$$G_R(\omega) = F[(\cos(\omega_0 t))] = \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] \quad (2)$$

式中, $\omega$  为角速率。由于  $\delta(\omega + \omega_0)$  和  $\delta(\omega - \omega_0)$  均为冲激函数,无法直接按  $G_R(\omega) = |H(\omega)|^2 G_w(\omega)$  设计出一个白化滤波器,其中, $G_w(\omega)$  为白噪声功率谱密度。

若假设  $H(\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]$ ,则  $|H(\omega)|^2 = H(\omega)H^*(\omega) = \pi^2[\delta^2(\omega - \omega_0) + \delta^2(\omega + \omega_0)]$ 。其中, 
$$\begin{cases} \delta^2(\omega - \omega_0) = \begin{cases} \infty & \omega = \omega_0 \\ 0 & \omega \neq \omega_0 \end{cases} \\ \delta^2(\omega + \omega_0) = \begin{cases} \infty & \omega = -\omega_0 \\ 0 & \omega \neq -\omega_0 \end{cases} \end{cases}, \text{那么功率谱}$$

密度为  $N_0/2$  的白噪声通过  $H(\omega)$  后输出的功率谱可表示为

$$G(\omega) = \frac{N_0}{2} \pi^2 [\delta^2(\omega - \omega_0) + \delta^2(\omega + \omega_0)] \quad (3)$$

对比式(2)与式(3)可以看出, $G(\omega)$  并不等于  $G_R(\omega)$ ,但它们具有非常相近的频谱结构,都在  $\omega = \pm \omega_0$  处取值无穷大,而在  $\omega \neq \pm \omega_0$  处为零。

当取  $H(\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]$  作为白化滤波器时,若输入为白噪声便可近似得到与式(2)具有非常相近频谱结构的输出功率谱密度。若设输入白噪声为  $w(t) \sim N(0, \sigma_w^2)$ ,则目标加速度可以用二阶时间相关模型表示为

$$\ddot{\mathbf{a}}(t) = -\omega_0^2 \mathbf{a}(t) + w(t) \quad (4)$$

与 Jerk 模型<sup>[10]</sup>一样,坐标  $x$  的状态向量也是由目标的位置、速度、加速度与加加速度所构成,即

$$\mathbf{X} = (x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad \ddot{\dot{x}})^T \quad (5)$$

由式(4)与式(5)可知

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \ddot{\dot{x}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \ddot{\dot{x}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} w(t) \quad (6)$$

若令  $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ ,则式(6)可表

示为

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}w(t) \quad (7)$$

设采样间隔为  $T$ ,对式(7)进行离散化近似可得

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(T, \omega_0)\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{F}(T, \omega_0) = \begin{pmatrix} 1 & T & p_2 & p_1 \\ 0 & 1 & q_2 & q_1 \\ 0 & 0 & r_2 & r_1 \\ 0 & 0 & s_2 & s_1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

为状态转移矩阵,其中, $p_1 = (\omega_0 T - \sin(\omega_0 T))/\omega_0^3$ ,  $p_2 = (1 - \cos(\omega_0 T))/\omega_0^2$ ,  $q_1 = (1 - \cos(\omega_0 T))/\omega_0^2$ ,  $q_2 = \sin(\omega_0 T)/\omega_0$ ,  $r_1 = \sin(\omega_0 T)/\omega_0$ ,  $r_2 = \cos(\omega_0 T)$ ,  $s_1 = \cos(\omega_0 T)$ ,  $s_2 = -\omega_0 \sin(\omega_0 T)$ ;  $\mathbf{W}(k)$  为离散时间过程噪声序列;

$$\mathbf{Q}(k) = \frac{\sigma_w^2}{\pi} \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ q_{14} & q_{24} & q_{34} & q_{44} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

为过程噪声协方差。其中:

$$q_{11} = \frac{1}{\omega_0^4} \left( \frac{T^3}{3} - \frac{2\sin(\omega_0 T)}{\omega_0^3} + \frac{2T\cos(\omega_0 T)}{\omega_0^2} + \frac{T}{2\omega_0^2} - \right.$$

$$\frac{\sin(2\omega_0 T)}{4\omega_0^3} \Bigg),$$

$$q_{12} = \frac{1}{\omega_0^4} \left( \frac{T^2}{2} - \frac{T \sin(\omega_0 T)}{\omega_0} + \frac{1}{4\omega_0^2} - \frac{\cos(2\omega_0 T)}{4\omega_0^3} \right),$$

$$q_{13} = \frac{1}{\omega_0^4} \left( \frac{\sin(\omega_0 T)}{\omega_0} - T \cos(\omega_0 T) - \frac{T}{2} + \frac{\sin(2\omega_0 T)}{4\omega_0} \right),$$

$$q_{14} = \frac{1}{\omega_0^3} \cdot \left( \frac{\cos(\omega_0 T)}{\omega_0} + T \sin(\omega_0 T) - \frac{5}{4\omega_0} + \frac{\cos(2\omega_0 T)}{4\omega_0} \right),$$

$$q_{23} = \frac{1}{\omega_0^3} \cdot \left( -\frac{\cos(\omega_0 T)}{\omega_0} + \frac{\cos(2\omega_0 T)}{4\omega_0} + \frac{3}{4\omega_0} \right),$$

$$q_{24} = \frac{1}{\omega_0^2} \left( \frac{\sin(\omega_0 T)}{\omega_0} - \frac{T}{2} - \frac{\sin(2\omega_0 T)}{4\omega_0} \right),$$

$$q_{33} = \frac{1}{\omega_0^2} \cdot \left( \frac{T}{2} - \frac{\sin(2\omega_0 T)}{4\omega_0} \right),$$

$$q_{34} = \frac{1}{4\omega_0^2} (1 - \cos(2\omega_0 T)),$$

$$q_{44} = \frac{T}{2} + \frac{\sin(2\omega_0 T)}{4\omega_0}.$$

1.2 IMM 算法

IMM 算法是一个递推算法<sup>[11]</sup>,如图 1 所示。

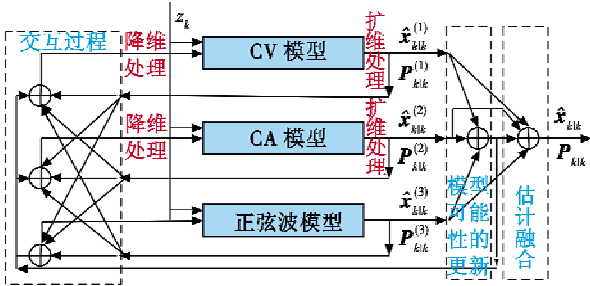


图1 本文所用 IMM 算法的工作流程示意

Fig.1 Working process of IMM used here

具有 3 个模型的 IMM 算法从  $k-1$  时刻到  $k$  时刻的递推过程如下所述。

1) 状态估计的交互式作用。

设从模型  $i$  转移到模型  $j$  的转移概率为  $p_{ij}$ ,则模型

的转移概率矩阵  $p$  可表示为  $p = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}$ ,需要注意

的是,该模型转移概率矩阵通常都是先验给定的,在整个迭代计算的过程不发生变化。令  $\hat{X}_j(k-1|k-1)$  为  $k-1$  时刻滤波器  $j$  的状态估计,  $P_j(k-1|k-1)$  为相应的状态协方差阵,  $\mu_j(k-1)$  为  $k-1$  时刻模型  $j$  的概率,且  $i, j=1,2,3$ ,则交互计算后 3 个滤波器在  $k$  时刻的输入为

$$\hat{X}_{oj}(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 \hat{X}_i(k-1|k-1) \mu_{k-1|k-1}(i|j) \quad (11)$$

式中,  $\mu_{k-1|k-1}(i|j) = \frac{1}{\bar{C}_j} p_{ij} \mu_{k-1}(i)$ ,  $\bar{C}_j = \sum_{i=1}^3 p_{ij} \mu_{k-1}(i)$ 。

$k$  时刻,经交互计算后第  $j$  个滤波器的状态协方差矩阵为

$$P_{oj}(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 \mu_{k-1|k-1}(i|j) \{ P_i(k-1|k-1) + [\hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_{oj}(k-1|k-1)] [\hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_{oj}(k-1|k-1)]^T \} \quad (12)$$

2) 模型的修正。

将  $\hat{X}_{oj}(k-1|k-1)$ ,  $P_{oj}(k-1|k-1)$  作为  $k$  时刻第  $j$  个模型的输入,得到相应的滤波输出为  $\hat{X}_j(k|k)$ ,  $P_j(k|k)$ 。

3) 模型可能性的计算。

设模型  $j$  的滤波残差为  $v_j(k)$ ,相应的协方差为  $S_j(k)$ ,并假定服从高斯分布,那么模型  $j$  的可能性为

$$\Lambda_j(k) = \frac{1}{\sqrt{|2\pi S_j(k)|}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (v_j(k))^T (S_j(k))^{-1} v_j(k) \right] \quad (13)$$

式中,  $v_j(k) = Z(k) - H_j(k) \hat{X}_j(k|k-1)$ ;  $S_j(k) = H_j(k) P_j(k|k-1) H_j^T(k) + R(k)$ 。

4) 模型概率的更新。

模型  $j$  的概率更新为

$$\mu_j(k) = \frac{1}{C} \Lambda_j(k) \bar{C}_j \quad (14)$$

式中,  $C = \sum_{i=1}^3 \Lambda_i(k) \bar{C}_i$ 。

5) 模型输出。

设  $\hat{X}(k|k)$ ,  $P(k|k)$  分别为  $k$  时刻交互式的输出,则有

$$\hat{X}(k|k) = \sum_{i=1}^3 \hat{X}_i(k|k) \mu_i(k) \quad (15)$$

$$P(k|k) = \sum_{i=1}^3 \mu_i(k) \{ P_i(k|k) + [\hat{X}_i(k|k) - \hat{X}(k|k)] [\hat{X}_i(k|k) - \hat{X}(k|k)]^T \} \quad (16)$$

2 仿真分析与结论

2.1 仿真场景与参数设置

参考美国 X-43, X-51A 等高超声速飞行器试验数据,根据文献[10,12-13]中的动力学模型,得到了如图 2、图 3 所示的临近空间高超声速飞行器的两种滑跃式机动轨迹,二者的机动性强弱不同。对于 Singer 模型,选取目标机动频率  $\alpha = 1/20$ 。设目标在各坐标轴上的加速度方差为  $\sigma_\omega^2 = \sigma_a^2 = 4$ ,对于 CV 模型与 CA 模型,分别取过程噪声方差为  $q_{CV}^2 = 1$  和  $q_{CA}^2 = 4$ 。对于 IMM3 算法,第 2 个 CA 模型的过程噪声为  $10q_{CA}^2$ 。

假设3种算法中,各模型初始的概率均为 $\mu = (1/3 \ 1/3 \ 1/3)^T$ ,则模型之间的转移概率矩阵为 $p = \begin{pmatrix} 0.9 & 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.9 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{pmatrix}$ 。

2.2 仿真结果分析

分别对图2、图3中的目标进行卡尔曼滤波,做100次 Monte Carlo 仿真,得到如图4、图5所示的跟踪效果图。

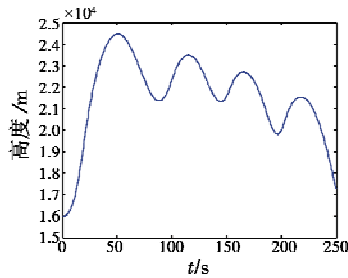


图2 目标的滑跃式机动轨迹1

Fig. 2 Slippage leap maneuvering trajectory 1 of target

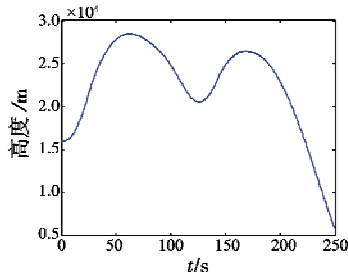


图3 目标的滑跃式机动轨迹2

Fig. 3 Slippage leap maneuvering trajectory 2 of target

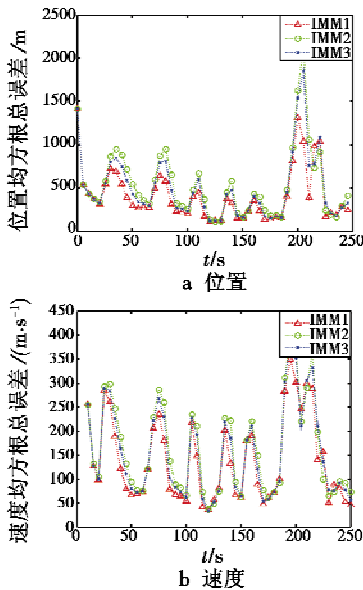


图4 轨迹1的位置和速度均方根总误差

Fig. 4 Total position and velocity RMS of trajectory 1

由图4、图5可以看出,对于两种不同机动强度的滑跃式机动目标,包含正弦波模型的 IMM1 算法对其位置与速度的跟踪估计效果均优于其他两种 IMM 算法的估计效果。IMM3 算法对目标的跟踪估计效果优于 IMM2 算法的估计效果。

对目标的位置误差做统计平均,可得表1中所示的数据。

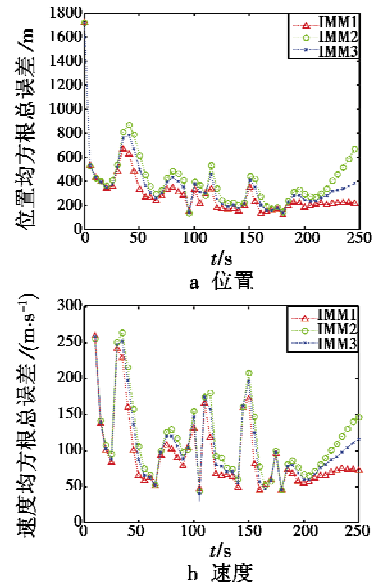


图5 轨迹2的位置和速度均方根总误差

Fig. 5 Total position and velocity RMS of trajectory 2

表1 轨迹1,2的目标位置误差统计平均

Table 1 Position statistical average errors of trajectory 1 and 2

|     |      | trajectory 1 and 2 |     |     | m   |
|-----|------|--------------------|-----|-----|-----|
| 轨迹  | 算法   | X轴                 | Y轴  | Z轴  | 总误差 |
| 轨迹1 | IMM1 | 225                | 268 | 131 | 400 |
|     | IMM2 | 279                | 370 | 161 | 525 |
|     | IMM3 | 261                | 330 | 150 | 477 |
| 轨迹2 | IMM1 | 161                | 163 | 109 | 278 |
|     | IMM2 | 213                | 260 | 141 | 392 |
|     | IMM3 | 186                | 214 | 126 | 337 |

分析表1中的数据可知,对于目标的滑跃式机动:

1) IMM1 算法对目标位置的估计精度最高,这说明包含正弦波模型的 IMM 算法,较包含其他模型的 IMM 算法,更适合于跟踪临近空间高超声速滑跃式机动目标;

2) IMM3 算法对目标的跟踪精度高于 IMM2 算法,说明基于 CV-CA-CA 的 IMM 算法,由于第2个 CA 模型采用了较大的过程噪声方差,使得其能够较好地适应目标的滑跃式机动;

3) 如图2所示,当目标进行轨迹1的较强滑跃式机动时,IMM1 算法较 IMM2 算法的位置估计精度提高了约24%,较 IMM3 算法的位置估计精度提高了约16%;

4) 如图3所示,当目标进行轨迹2的较弱滑跃式机动时,IMM1算法较IMM2算法的位置估计精度提高了约29%,较IMM3算法的位置估计精度提高了约18%。

由仿真结果可知:与文献[6-7]中基于CV-CA-Singer的IMM算法和文献[9]中基于CV-CA-CA的IMM算法相比,本文采用的基于CV-CA-正弦波模型在跟踪临近空间高超声速滑跃式机动目标时,能够实现目标状态更精确的估计,这是由于正弦波模型与目标的滑跃式机动较其他模型具有更好的匹配程度<sup>[8]</sup>。

IMM算法对目标的滤波效果不仅与其包含的子模型数量及类型有关,而且还受到模型转移概率矩阵 $p$ 的影响。由于本文采用了固定不变的 $p$ ,与目标真实运动状态间的转移概率存在一定的失配,因此降低了IMM算法对目标的滤波精度。可以考虑在线实时调整转移概率矩阵 $p$ ,使其更加符合目标各运动状态间的真实转换概率,从而提高对目标的滤波精度。

### 3 结束语

本文所用IMM算法仅包含了3个模型,每个模型也只是代表目标的一种运动状态。临近空间高超声速目标运动轨迹未知且运动状态多变,当模型集里所有的模型都与目标真实运动失配时,将影响跟踪精度。为此,可以采用变结构多模型(VSMM)算法,通过建立包含更多不同模型的模型集来避免模型失配的问题。但是如何快速、准确地更新模型集,是一个需要深入研究的问题。

### 参考文献

- [1] DI X G, YANG Y F. Ascending trajectory optimization of near-space airship based on genetic algorithm[C]//IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013:918-922.
- [2] DOU L Q, ZONG Q, JI Y H. Robust dynamic inversion control for near space vehicle[C]//IEEE Proceedings of 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, 2010:744-749.
- [3] SHEN Q K, JIANG B, COCQUEMPOT V. Fuzzy logic system-based adaptive fault-tolerant control for near-space vehicle attitude dynamics with actuator faults[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(2):289-300.
- [4] BUSCH M, BLACKMAN S. Evaluation of IMM filtering for an air defence system application[C]//Proceedings of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, 1995:435-447.
- [5] BLACKMAN S S, DEMPSTER R J, ROSZKOWSKI S H. IMM/MHT application to radar and IR multitarget tracking[C]//Proceedings of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, 1997:429-439.
- [6] 关欣,赵静,张政超,等.一种可行的高超声速飞行器跟踪算法[J].电讯技术,2011,51(8):80-84. (GUAN X, ZHAO J, ZHANG Z C, et al. A feasible tracking algorithm for hypersonic aircrafts[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(8):80-84.)
- [7] 张远,吴昊.临近空间目标运动建模与跟踪方法研究[J].火控雷达技术,2013,42(4):22-27. (ZHANG Y, WU H. Study on modeling of near-space moving targets and its tracking algorithm[J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(4):22-27.)
- [8] 王国宏,李俊杰,张翔宇,等.临近空间高超声速滑跃式机动目标的跟踪模型[J].航空学报,2014,35:1-11. (WANG G H, LI J J, ZHANG X Y, et al. A tracking model for the near space hypersonic slippage leap maneuvering target[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35:1-11.)
- [9] HOULES A, BAR-SHALOM Y. Multisensor tracking of a maneuvering target in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2):176-189.
- [10] 宗群,田栢苓,窦立谦.基于 Gauss 伪谱法的临近空间飞行器上升段轨迹优化[J].宇航学报,2010,31(7):1775-1781. (ZONG Q, TIAN B L, DOU L Q. Ascent phase trajectory optimization for near space vehicle based on Gauss pseudospectral method[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7):1775-1781.)
- [11] LI X R, BAR-SHALOM Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 1(3):186-194.
- [12] BOLLINO K P. High-fidelity real-time trajectory optimization for reusable launch vehicles[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2006.
- [13] 钱翼稷.空气动力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005:17-21. (QIAN Y J. Aerodynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005:17-21.)