

# 导引模型在 FTC 自适应 IMM-UKF 目标跟踪算法中的应用

付 斌, 丁月宁, 黄 勇, 闫 杰  
(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

**摘要:** 在应用 IMM 算法时, 根据战术导弹这种特殊的应用对象, 以两种常用导引律为例, 推导出导引运动模型作为交互模型集; 使用不敏卡尔曼滤波器(UKF)实现了 IMM-UKF 算法, 并根据导引模型的特点引入了弹道收敛因子(FTC)自适应调节 IMM 算法中的模型转移概率。仿真实验结果表明, 这种基于目标导引运动模型的跟踪算法很好地实现了目标跟踪任务, 并且有效地分辨出了目标机动的运动模型。

**关键词:** 目标跟踪; 导引运动模型; 交互多模型滤波; 弹道收敛因子

**中图分类号:** V271.4; TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)01-0068-05

## Application of Guidance Model in FTC Adaptive IMM-UKF Maneuvering Target Tracking Algorithm

FU Bin, DING Yue-ning, HUANG Yong, YAN Jie  
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** This paper presents a new approach of the Interacting Multiple Model (IMM) algorithm by introducing a non-linear guidance model from the guidance law. Unscented Kalman Filter (UKF) is applied to deal with the non-linear models in the IMM algorithm. Factor of Trajectory Convergence (FTC) is introduced based on the basic characteristic of the missile trajectory to adjust the transition probability online. The simulation results demonstrate that the guidance model based FTC adaptive IMM-UKF algorithm works perfectly in the tracking system.

**Key words:** target tracking; guidance model; interacting multiple model; factor of trajectory convergence

### 0 引言

在以往交互多模型(Interacting Multiple Model, IMM)算法应用中, 如常见的一种用于雷达系统对飞行器进行目标跟踪的问题中<sup>[1-2]</sup>, 研究者们选择几种简单线性运动模型作为模型集, 在滤波过程中频繁地切换模型, 实现对目标运动的逼近<sup>[3-4]</sup>。在这种情况下, 很可能由于模型失真、失配等问题, 影响跟踪效果<sup>[5-6]</sup>。

本文中, 采用基于导引律的非线性目标运动模型、基于 MIMO 雷达的观测器, 代入弹道收敛因子(Factor of Trajectory Convergence, FTC)自适应 IMM 算法中, 完成一种新的目标跟踪算法设计。实验结果表明, 新的跟踪算法不仅实现了更高的跟踪精度, 更重要的是, 跟踪算法在滤波过程中同时确定导弹采用的导引律参数, 为

后端防御系统进行预测制导、拦截奠定了很好的基础。

### 1 导引运动模型的建立、观测器的改进及 FTC 在算法中的应用

在本文中, 将 IMM 算法应用于一个更特殊的运动检测中——来袭战术战略导弹目标检测、跟踪。提出这样的设想主要是基于以下两点考虑。

1) 以往基于 IMM 的目标跟踪算法都是基于简单运动模型的频繁切换拼接达到逼近实际运动轨迹效果的, 这种方法显然可以直接应用于导弹目标的检测<sup>[7]</sup>, 但是从原理上来讲, 这种理论的应用与实际情况不甚相符, 所以在面对新的问题时, 应该尝试从更直接的角度, 寻找出一种新的更适合、更贴切的方法来解决。

2) 导弹这类目标的质心运动模型虽然满足马尔科夫性质以及前时无关性, 但同时, 导弹的运动又是由一个确定的导引律所决定的, 即在弹目相对位置确定的情况下, 根据不同的导引律, 可以基本确定出导弹的运动模型。

收稿日期: 2013-08-05 修回日期: 2013-09-23

基金项目: 航空科学基金(20110153004)

作者简介: 付 斌(1989—), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为导航制导与控制。

### 1.1 导引运动模型的建立

首先以经典比例导引法进行模型的推导,在铅垂面内,经典比例导引律通常描述为

$$\dot{\theta} = K \times \dot{q} \quad (1)$$

则可据此写出导弹运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = V_m \cdot \cos \theta \\ \dot{y} = V_m \cdot \sin \theta \\ \dot{\theta} = N \cdot \dot{q} \end{cases} \quad (2)$$

式中:导弹的位置坐标为 $(x, y)$ ,初始时刻导弹位置为 $(x_0, y_0)$ , $\theta$ 为弹道倾角; $\theta_0$ 为弹道倾角初值; $\dot{\theta}$ 为弹道倾角变化率; $V_m$ 为恒定速度; $N$ 为导航比; $q$ 为视线角; $\dot{q}$ 为视线角速度, $\dot{q}$ 在系统中作为控制输入。

离散化后得到如下非线性状态转移方程

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + T \cdot V_m \cdot \cos \theta_k \\ y_{k+1} = y_k + T \cdot V_m \cdot \sin \theta_k \\ \theta_{k+1} = \theta_k + T \cdot N \cdot \Delta q \end{cases} \quad (3)$$

也可写为

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix}, \mathbf{U}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta q_k \end{bmatrix}, \mathbf{X}_{k+1} = f_{PN}(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k) \quad (4)$$

式中: $f_{PN}(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k)$ 为离散化的非线性状态转移函数,表征非线性模型的状态转移过程; $x_k, y_k, \theta_k$ 为离散化后的状态变量; $\Delta q_k$ 为离散化后的控制变量。

另外,根据实验验证要求,还引入了碰撞角约束下的比例导引律,并建立了基于碰撞角约束下比例导引律的离散化非线性导引运动模型

$$\dot{\theta} = N \times \dot{q} + K_f \times \left( \frac{V_m}{R} \right) \times (N_f - q_f) \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + T \cdot V_m \cdot \cos \theta_k \\ y_{k+1} = y_k + T \cdot V_m \cdot \sin \theta_k \\ \theta_{k+1} = \theta_k + T \cdot [N \cdot \Delta q_k + N_f \cdot (V_m/R_k) \cdot (q_k - q_f)] \end{cases} \quad (6)$$

也可写为

$$\mathbf{X}_{k+1} = f_{IAC}(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k) \\ \mathbf{X}_k = [x_k, y_k, \theta_k]^T, \mathbf{U}_k = [0, 0, \Delta q_k]^T \quad (7)$$

式中: $f_{IAC}(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k)$ 为状态转移方程; $R_k$ 为 $k$ 时刻弹目相对距离; $q_k$ 为 $k$ 时刻的视线角; $q_f$ 为设定的最终落角。

### 1.2 基于 MIMO 雷达的状态观测器设计

结合实际作战环境以及仿真条件设置,考虑设计一种能够对状态进行观测并引入足够新息修正的观测器。

在以往的状态观测器设计中,往往仅考虑被跟踪目标的相对距离 $R$ 和视线角 $q$ 。本文根据 MIMO 雷达体制,另外引入了运动目标的运动速度方向以及运动速度方向的变化量 $Z_k^v$ 和 $Z_k^{\Delta\theta}$ 项。但是在采用导引运动模型

的滤波器的 IMM 算法中,若状态观测器仅对这两个观测值进行观测的话,虽然可以起到对目标状态的修正作用,但是对于几种模型间的区别没有起到引入新信息做出判断的作用,因此,考虑根据 MIMO 雷达体制,可以得到 $Z_k^R$ 和 $Z_k^{\Delta\theta}$ ,其方法可以参照文献[8]。

综上所述,观测方程设计为

$$\begin{cases} Z_k^R = \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \\ Z_k^q = \arctan(y_k/x_k) \\ Z_k^\theta = \theta_k \\ Z_k^{\Delta\theta} = \Delta\theta_k \end{cases} \quad (8)$$

也可写为

$$\mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k), \mathbf{Z}_k = [Z_k^R, Z_k^q, Z_k^\theta, Z_k^{\Delta\theta}]^T \\ \mathbf{X}_k = [x_k, y_k, \theta_k]^T \quad (9)$$

## 2 基于 UKF 的 FTC 自适应 IMM 算法

### 2.1 不敏卡尔曼滤波器(UKF)

参考文献[9]中提出了一种不敏卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filter, UKF)对状态向量进行滤波,由于不需要对非线性系统进行线性化,计算过程相对简单,UKF 算法在非线性系统滤波问题中得到了广泛的应用。

设非线性系统的状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = f(\mathbf{X}(k), \mathbf{U}(k)) + \mathbf{V}(k) \quad (10)$$

观测方程为

$$\mathbf{Z}(k) = h(\mathbf{X}(k)) + \mathbf{W}(k) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{V}(k)$ 、 $\mathbf{W}(k)$ 都是均值为零的白噪声,且假设 $k$ 时刻跟踪系统的状态估计和状态协方差分别为 $\hat{\mathbf{X}}(k/k)$ 和 $P(k/k)$ ,则首先根据参考文献[10-11]来构造新的 $\delta$ 点 $\xi_i(k/k)$ 和其相对应的权值 $W_i$ ,然后将 $k$ 时刻的 $\delta$ 点代入非线性系统的状态转移方程得到一步预测

$$\xi_i(k+1/k) = f(\xi_i(k/k)) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1/k) = \sum_{i=0}^{2n_x} W_i \cdot \xi_i(k+1/k) \quad (13)$$

$$P(k+1/k) = \sum_{i=0}^{2n_x} \left\{ [\xi_i(k+1/k) - \hat{\mathbf{X}}(k+1/k)] \cdot [\xi_i(k+1/k) - \hat{\mathbf{X}}(k+1/k)]^T \right\} \quad (14)$$

利用一步预测 $\delta$ 点以及权值 $W_i$ ,根据式(13)、式(14)可以得到状态预测估计 $\hat{\mathbf{X}}(k+1/k)$ 和状态预测方差 $P(k+1/k)$ ,再根据观测方程式(11)可得到预测点的观测值

$$\zeta_i(k+1/k) = h(\xi_i(k+1/k)) \quad (15)$$

进而求得预测点观测值的均值 $\hat{Z}(k+1/k)$ 和协方差 $P_{zz}$ 。同样,还可以得到测量值和状态向量的交互协方

差  $P_{zz}$ 。

当得到  $k+1$  时刻传感器所提供的测量  $Z(k+1)$ , 新的观测将带来新信息, 用以修正与测量, 则状态更新和状态更新协方差可计算, 由此得到滤波方程为

$$\hat{X}(k+1/k+1) = \hat{X}(k+1/k) + \mathbf{K}(k+1)[Z(k+1) - \hat{Z}(k+1/k)] \quad (16)$$

$$P(k+1/k+1) = P(k+1/k) - \mathbf{K}(k+1)P_{zz}(k+1) \cdot \mathbf{K}^T(k+1) \quad (17)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = P_{zz}P_{zz}^{-1} \quad (18)$$

## 2.2 FTC 自适应 IMM 算法

在 1984-1989 年期间, Blom 和 Bar-Shalom 在广义贝叶斯算法基础上提出一种具有马尔科夫转移概率的结构自适应算法——IMM 算法。

根据算法要求, 首先要给出先验的模型转移概率  $\boldsymbol{\pi}$ , 因为没有目标机动模式的先验信息。因此有

$$\boldsymbol{\pi} = [\pi_{ij}]_{r \times r} = [\pi_{ij}]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

但是, 考虑到目标弹道的收敛特性, 即导弹在按照给定导引律(且此导引律引导导弹直接攻击目标, 即不考虑导弹进行地形规避等带有与目标本身特性无关的特殊机动情况下)进行一定时间的机动后, 其弹道逐渐趋于平直的这一规律, 引入了 FTC 对 IMM 算法中的模型转换概率  $\boldsymbol{\pi}$  进行在线调整, 其原理如下。

首先, 定义 FTC 因子  $\lambda_k$  为

$$\lambda_k = \sqrt[n]{\prod_{k-m}^k \left( \frac{q_k - q_{k-1}}{q_k \cdot \tau} \right)} \quad (20)$$

式中:  $(q_k - q_{k-1})/q_k$  反映的是  $k$  时刻视线角, 即弹道的变化程度;  $\tau$  为时间常数, 取 0.01;  $\lambda_k$  作为近  $m$  次的综合水平;  $n$  为收敛度阈值作用因子。如图 1 所示, 选择不同的  $n$  值可以对因子曲线进行调整, 进而决定了收敛因子阈值的作用范围, 本文选择  $n=4$ 。

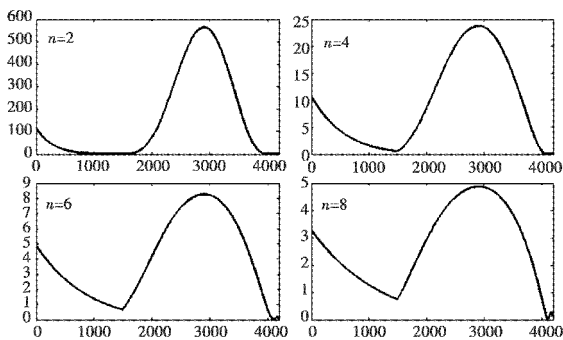


图 1  $\lambda_k$  中  $m=10$  时  $n$  对收敛因子的影响

Fig. 1  $\lambda_k$  vs  $n$  when  $m=10$

然后, 再选定一个合适的阈值  $\lambda_{TH}$ , 当  $\lambda_k < \lambda_{TH}$  时, 认为弹道进入收敛状态, 适当调高当前最高混合概率

模型的先验转移概率, 当没有达到收敛阈值时, 取消修正, 本文选择  $\lambda_{TH}=5$ 。具体修正策略为

$$\begin{cases} \pi_{aa} = \pi_{aa} \left( 1 + \frac{\lambda_{TH} - \lambda_k}{\lambda_k} \cdot c_{adj} \right), & \lambda_k < \lambda_{TH} \\ \pi_{aa} = \pi_{aa}, & \lambda_k \geq \lambda_{TH} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\pi_{aa}$  表示当前混合概率最高的模型的先验转移概率;  $c_{adj}$  为修正幅值。式(21)意义可理解为, 当采用此种模型进行滤波, 且弹道趋于收敛时, 可根据收敛程度对  $\pi_{aa}$  概率进行最大不超过  $c_{adj}$  的修正,  $c_{adj}$  可根据情况选一小值, 本文选取 0.2。

接下来继续 IMM 算法, 令  $\hat{X}(k-1/k-1)$  为  $k-1$  时刻滤波器  $j$  的状态估计,  $\mathbf{P}^j(k-1/k-1)$  为相应的状态协方差阵,  $\mu_{k-1}^j$  为  $k-1$  时刻模型  $j$  的概率, 则交互后第  $j$  个滤波器在  $k-1$  时刻输入为

$$\hat{X}^{oj}(k-1/k-1) = \sum_{i=1}^N \hat{X}^i(k-1/k-1) \mu_{k-1/k-1}^{i \rightarrow j} \quad (22)$$

式中:  $\hat{X}^i(k-1/k-1)$  表示  $k-1$  时刻模型  $i$  的滤波估值;  $\mu_{k-1/k-1}^{i \rightarrow j}$  表示  $k-1$  时刻模型  $i$  转移到模型  $j$  的概率。其算式为

$$\begin{cases} \mu_{k-1/k-1}^{i \rightarrow j} = \frac{1}{\bar{c}_j} \pi_{ij} \mu_{k-1}^i \\ \bar{c}_j = \sum_{i=1}^r \pi_{ij} \mu_{k-1}^i \end{cases} \quad (23)$$

另有  $k-1$  时刻相应的模型交互协方差矩阵  $\mathbf{P}^{oj}(k-1/k-1)$  计算,

$$\mathbf{P}^{oj}(k-1/k-1) = \sum_{i=1}^N [\mathbf{P}^i(k-1/k-1) + \mathbf{Q}^i(k-1/k-1)] \mu_{k-1/k-1}^{i \rightarrow j} \quad (24)$$

$\mathbf{Q}^i(k-1/k-1) = [\hat{X}^i(k-1/k-1) - \hat{X}^{oj}(k-1/k-1)] \cdot [\hat{X}^i(k-1/k-1) - \hat{X}^{oj}(k-1/k-1)]^T$  (25)

式中,  $\mathbf{Q}^i(k-1/k-1)$  为模型  $i$  在  $k-1$  时刻的估计协方差。然后将  $\mathbf{P}^{oj}(k-1/k-1)$  和  $\hat{X}^{oj}(k-1/k-1)$  作为模型的交互输入, 代入到相应不敏滤波器中得到相应的状态滤波值协方差滤波值  $\hat{X}^j(k/k)$  和  $\mathbf{P}^j(k/k)$ 。

设模型滤波器残差为  $v_k^j$ , 相应的协方差为  $S_k^j$ , 并假定服从高斯分布, 则模型  $j$  的可能性  $A_k^j$  可以计算为

$$A_k^j = \frac{1}{\sqrt{|2\pi S_k^j|}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (v_k^j)^T (S_k^j)^{-1} v_k^j \right] \quad (26)$$

式中, 残差  $v_k^j$  和协方差  $S_k^j$  分别为

$$\begin{cases} v_k^j = Z(k) - h \left[ \hat{X}^j \left( \frac{k}{k-1} \right) \right] \\ S_k^j = \sum_{i=0}^{2n_s} W_i \Delta \mathbf{Z}_i \left( \frac{k+1}{k} \right) \Delta \mathbf{Z}_i^T \left( \frac{k+1}{k} \right) + R(k+1) \end{cases} \quad (27)$$

式中,  $S_k^j$  就是上节中提到的观测值协方差  $P_{zz}$ , 模型可能性  $A_k^j$  是一个动态范围非常大的数值。为了更好地使用

这个信息,将其进行归一化处理,其中: $\mu_{k-1}^i$ 表示  $k-1$  时刻模型  $i$  的混合后概率; $\bar{C}_j$ 表示  $k$  时刻由所有  $N$  个模型转移到第  $j$  个模型后的全概率; $\mu_k^j$  实质上就是归一化后的  $\Lambda_k^j$ ,用以表征  $k$  时刻模型  $j$  的修正概率。

$$\begin{cases} \mu_k^j = \frac{1}{C} \Lambda_k^j \bar{C}_j \\ C = \sum_{i=1}^N \Lambda_k^i \bar{C}_i \\ \bar{C}_j = \sum_{i=1}^N \pi^{i-j} \mu_{k-1}^i \end{cases} \quad (28)$$

最后,根据之前计算得到的概率、估值、协方差计算模型混合输出,混合状态滤波值  $\hat{X}(k/k)$  和混合状态方差  $P(k/k)$ ,即

$$\hat{X}(k/k) = \sum_{i=1}^N \hat{X}^i(k/k) \mu_k^i \quad (29)$$

$$P(k/k) = \sum_{i=1}^N \mu_k^i \{ P^i(k/k) + [\hat{X}^i(k/k) - \hat{X}(k/k)] [\hat{X}^i(k/k) - \hat{X}(k/k)]^T \} \quad (30)$$

至此,就完成了基于 FTC-IMM 和 UKF 的多模型混合滤波算法的一步递推,在设定初值后,即可根据以上算法进行滤波估计。

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 仿真条件设置

为了检验算法的有效性,编写了 Matlab 程序对算法进行了验证。

仿真条件设置为:来袭导弹初始位置为  $x$  方向 16000 m,  $y$  方向 12000 m, 初始速度为  $x$  轴负方向上 510 m/s, 前 8 s 以简单的比例导引律进行制导飞行, 8 s 后以碰撞角约束下的比例导引率飞行, 被攻击目标静止于坐标原点。

FTC-IMM 算法中, 选用 IAC 导引模型和 PN 导引模型作为两个 UKF 的模型, 观测器主要是对导弹相对目标的距离、视线角、弹道倾角、弹道倾角变化率进行观测, 并进行修正。考虑到导弹导引律切换的规律并不知道, 所以两个模型相互转换的先验概率均为 0.5。

状态初值设为  $X_0 = [16000, 12000, 0, 0]^T$ ;  $R(0) = [10^2, (0.1/57.3)^2, (0.1/57.3)^2, (0.1/57.3)^2]$ ;  $\mu_0^1 = 0.5, \mu_0^2 = 0.5$ ;  $\pi = [\pi_{ij}]_{r \times r} = [\pi_{ij}]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$ ;  $P^i(0/0) = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.1, 0.1), (i=1, 2)$ 。

以上作为算法的初始条件, 使用 Simulink 根据情景设置, 搭建了切换制导律攻击目标的制导仿真模块, 并且在每一个仿真步长都输出导弹的位置、速度、弹道倾角、弹道倾角变化量、弹目距离等信息供算法使用。按照仿真结果, 可以看到攻击弹道如图 2 所示。

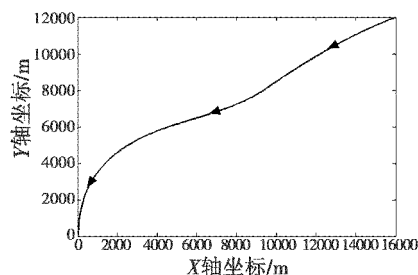


图 2 两种导引律切换得到的弹道

Fig. 2 The trajectory obtained by switching of 2 different guidance laws

#### 3.2 FTC 自适应 IMM 与传统 CV、CA 模型交互滤波仿真结果比较

从仿真结果可以看出, 采用传统的 CV、CA 模型显然可以实现目标的跟踪, 并且跟踪误差稳定在一定范围内。但是, 当采用 FTC 自适应 IMM 算法后, 可以看到, 跟踪误差显著降低, 如图 3、图 4 所示。

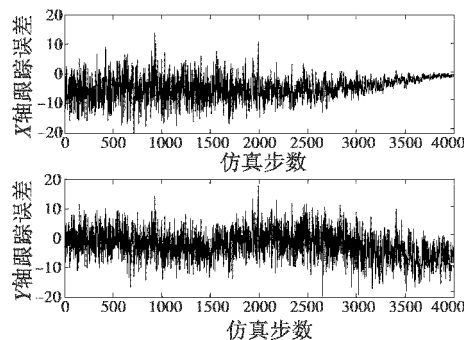


图 3 采用 CV、CA 模型算法的跟踪误差

Fig. 3 The tracking error when using CV and CA model

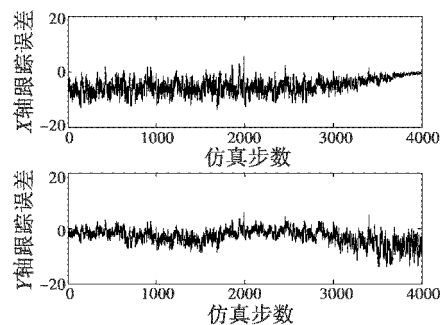


图 4 引入 FTC 的导引模型算法跟踪误差

Fig. 4 Tracking error when using FTC guidance model

这是因为, 导引运动模型与被跟踪目标的运动模型匹配度更高、更相似, 且根据弹道收敛这一实际物理意义, 滤波过程更逼近真实情况, 滤波收敛更好, 因此, 在进行滤波时, FTC-IMM 算法跟踪精度更高。

#### 3.3 新观测器对模型交互、分辨的影响

在采用传统观测器进行仿真的过程中, 通过对结果的分析发现, 两种导引模型在整个滤波过程中的正确概率几乎都是相等的, 没有区分度, 如图 5 所示。

这是因为在计算模型相似度时,根据式(26)、式(27)可知,模型相似度根据观测值  $Z(k)$  与预测值代入观测方程的结果的残差  $v_k^j$  为计算依据,然而根据仿真结果可以发现,传统观测器的观测值对于两种不同模型所带来的残差修正信息几乎相等,在每一次计算中,模型一步预测的差别都不能够保留到下一步,两个模型就始终不能体现出差别。

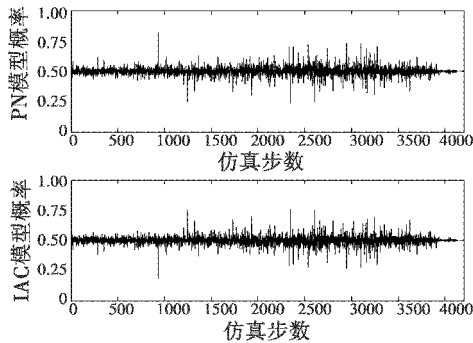


图 5 滤波过程中 PN、IAC 模型的正确概率

Fig. 5 The correct probability of PN and IAC model

而当新型观测方程引入了  $Z_k^o$  和  $Z_k^{\Delta o}$  之后,两个模型在  $Z_k^{\Delta o}$  一项上差别非常明显,这样,引入的观测信息就可以进行差异比较,分辨模型。新观测器下,两个模型的概率就可以看出具有明显的分辨力。如图 6 所示。

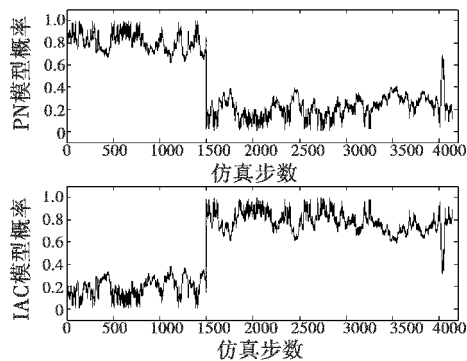


图 6 采用新观测器后 PN、IAC 模型正确概率

Fig. 6 The correct probability of PN and IAC model when using new observer

#### 4 结论

从仿真结果来看,算法可以实现预期的目标跟踪,对目标运动模型的切换也做出了及时的判断,并在算法中体现出了相应的改变,进行了持续稳定的跟踪,算法适应性良好,跟踪效果较以往方法有很大改善。而且,相比于以往对运动目标当前运动参数的滤波,这种结合了导引模型的自适应算法,给出了许多以往跟踪算法没有得到的信息,在实际应用中,这样的滤波结果能够更好地被后端利用。

但是,在验证算法的仿真过程中,本文有条件地简

化许多环节和模型。在以后的研究中,可以进一步对仿真过程细化,从理论分析向实际应用靠拢。

#### 参考文献

- [1] 石晓航,梁青阳,张庆杰,等. DC-IMM 估计方法在多 UAV 协同目标跟踪中的应用[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,(s2):52-57.  
SHI X H, LIANG Q Y, ZHANG Q J, et al. Multi-UAV target tracking using DC-IMM estimate method[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2013 (s2):52-57.
- [2] 姬存慧. 基于交互多模型的机动目标跟踪算法研究及硬件实现[D]. 南京:南京理工大学,2013.  
JI C H. Maneuvering target algorithm based on IMM and the implementation on FPGA[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [3] JILKOV V P, ANGELOVA D S, SEMERDJIEV T A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1):343-350.
- [4] COOPERMAN R L. Tactical ballistic missile tracking using the interacting multiple model algorithm[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion, IEEE, 2002:824-831.
- [5] 张少娜. 基于均值漂移的目标跟踪算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.  
ZHANG S N. Research on mean shift based object tracking algorithms [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [6] 陈里铭. 基于随机有限集的多目标跟踪方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.  
CHEN L M. Research on multi-target tracking based on random finite set [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [7] YUN J, RYOO C K, CHOI K. Anti-ship missile's guidance law estimation filter using IMM estimator [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010, doi: 10.2514/6.2010-8186.
- [8] 曲毅,廖桂生,朱圣棋,等. MIMO 雷达的目标运动方向及速度估计[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版,2008,35(5):781-784.  
QU Y, LIAO G S, ZHU S Q, et al. Estimation of the moving angle and velocity of the target in the MIMO radar[J]. Journal of Xidian University: Natural Science Edition, 2008, 35(5):781-784.
- [9] JULIER S J, UHLMAN J K. New extension of the Kalman filter to nonlinear systems [J]. SPIE, Vol. 3068, 1997, doi:10.1117/12.280797. (下转第 77 页)

## 参考文献

- [1] 王建华,张东来,李小将,等. 美军天基和机载激光反导研究计划及调整分析[J]. 激光与红外,2012,42(4):355-359.  
WANG J H, ZHANG D L, LI X J, et al. Analysis of the research plan and adjustment of American spaceborne and airborne anti-missile laser[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4):355-359.
- [2] 荣健,胡渝,钟晓春. ATP跟瞄精度与最佳信号光发射角的研究[J]. 中国激光,2005,32(2):221-223.  
RONG J, HU Y, ZHONG X C. Study of ATP accuracy and the optimum optical signal transmitting angle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(2):221-223.
- [3] 陈纯毅,杨华民,佟首峰,等. 空间光通信卫星平台振动实时模拟[J]. 系统仿真学报,2007,19(16):3834-3837.  
CHEN C Y, YANG H M, TONG S F, et al. Real-time simulation of satellite-platform vibration of space optical communication [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16):3834-3837.
- [4] 曹阳,艾勇,黎明,等. 空间光通信精跟踪系统地面模拟实验[J]. 光电子·激光,2009,20(1):40-43.  
CAO Y, AI Y, LI M, et al. Ground simulation experiment of fine tracking for spatial optical communication [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(1):40-43.
- [5] BOROSON D M, SCOZZAFAVA J J, MURPHY D V, et al. The Lunar Laser Communications Demonstration (LLCD) [C]//The 3rd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, 2009: 23-28.
- [6] 宋延嵩,佟首峰,姜会林,等. 机载激光通讯系统精跟踪单元变结构控制技术[J]. 红外与激光工程,2010,39(5):934-938.  
SONG Y S, TONG S F, JIANG H L, et al. Variable structure control technology of the fine tracking assembly in airborne laser communication system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5):934-938.
- [7] 张秉华,张守辉. 光电成像跟踪系统[M]. 成都:电子科技大学出版社,2003.  
ZHANG B H, ZHANG S H. Photoelectric imaging tracking system [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2003.
- [8] 白宏. 光电跟踪系统的视轴稳定控制[D]. 成都:电子科技大学,2008.  
BAI H. The opto-electronic tracking system line-of-sight stabilization control [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [9] 王佩,吕梅柏,李言俊,等. 基于HLA的机载激光武器仿真系统设计[J]. 西北工业大学学报,2011,29(2):198-204.  
WANG P, LÜ M B, LI Y J, et al. An Airborne Laser (ABL) weapon simulation system based on HLA [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(2):198-204.
- [10] 陶坤宇,王富,周彦平,等. 卫星光通信高速精确跟踪瞄准实现技术[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(11):1707-1711.  
TAO K Y, WANG F, ZHOU Y P, et al. Hi-speed fine tracing pointing control for IOC [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11):1707-1711.
- [11] 黄海波,左韬,陈晶,等. 复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J]. 红外与激光工程,2012,41(6):1561-1565.  
HUANG H B, ZUO T, CHEN J, et al. Optimum design of servo bandwidth for fine tracking subsystem in compound-axis system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6):1561-1565.
- (上接第72页)
- [10] 崇阳,张科,吕梅柏. 基于“当前”模型的 IMM-UKF 机动目标跟踪融合算法研究[J]. 西北工业大学学报,2011,29(6):919-926.  
CHONG Y, ZHANG K, LU M B. Exploring a better IMM-UKF fusion algorithm based on current statistical model in target tracking [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(6):919-926.
- [11] 孙松斌,宋建梅,张婧. 超低空拦截导弹武器系统的 UKF-IMM 目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(10):2367-2371.  
SUN S B, SONG J M, ZHANG J. Target tracking algorithm of super-low altitude interceptors based on UKF-IMM [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(10):2367-2371.