

# 一种改进的高超声速目标跟踪算法

李昌玺<sup>1</sup>, 毕红葵<sup>2</sup>, 张 兵<sup>2</sup>, 肖 松<sup>1</sup>

(1. 空军预警学院研究生管理大队, 湖北武汉, 430019; 2. 空军预警学院陆基预警监视装备系, 湖北武汉, 430019)

**摘要** 根据临近空间高超声速目标运动特点,建立了临近空间高超声速目标运动模型;针对机动目标跟踪问题,在“当前”统计(Current Statistical Model, CS)模型基础上,引入一种利用位置估计值与加速度之间的函数关系自适应调整加速度方差的方法(Adaptive of Distance Estimate Algorithm, ADE),并运用交互多模型算法,提出了 ADE-IMM(Adaptive of Distance Estimate Algorithm-Interacting Multiple Model Algorithm)算法,提高了算法对临近空间高超声速目标的跟踪精度。仿真结果表明:该算法兼顾了 Singer-IMM 算法和 CS-IMM 算法在跟踪临近空间高超声速目标方面的优点,有更好的跟踪精度。

**关键词** 临近空间;高超声速目标;交互多模型算法;改进算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.011

**中图分类号** TN957 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0050-05

在机动目标跟踪中,建立符合实际的目标运动模型一直是人们关注的重点,在过去的研究中,各种关于机动运动的数学模型已经被提出来<sup>[1]</sup>。临近空间高超声速目标跟踪是跟踪领域的一个热点,也是一个难点,对它的研究还处于起步阶段。文献[2]提出了一种可行的高超声速飞行器跟踪算法,其主要思想是运用 Singer 模型进行交互运算,而 Singer 模型认为加速度的均值为零,因此该算法在目标为非机动或弱机动时精度较高,但对于临近空间高超声速目标来说,目标机动性强,因此, SINGER-IMM 算法存在一定的缺陷。

本文首先在文献[1]的基础上,采用 CS 模型进行交互,仿真精度较 Singer-IMM 算法有所提高,但 CS 模型中,目标机动加速度的极值是人为设定的,对于强机动目标,特别是临近空间高超声速目标来说,目标机动加速度的极大值与极小值是很难确定的。文献[3]提出了一种利用位置估计值与加速度之间的函数关系自适应调整加速度方差的方法(ADE),该方法能够自适应的调整加速度方差,克服了 CS 模型中因人为设定极值造成的误差。本文在 CS-IMM 算法的基础上,结合 ADE 模型,提出了 ADE-IMM 算法,并通过计算机仿真,证明了该算法在跟踪临近空间高超声速目标时,有更好的跟踪精度。

## 1 临近空间高超声速目标飞行模型

临近空间高超声速目标的巡航速度大于  $5 Ma$ ,飞行高度在  $20-100 km$  之间<sup>[4]</sup>,具有飞行高度高,飞行速度快,机动强等特点,其运动轨道简化为 3 个阶段<sup>[5]</sup>:助推段、巡航段和攻击段,其中,巡航段又包括爬升段、平飞段和等速巡航段。

假设火箭助推器推力  $P = 3.5 g$ ,目标攻击角  $\alpha = 0^\circ$ ,目标总参考面积为  $8.5 m^2$ ,火箭助推器参考面积为  $6 m^2$ ,目标本身参考面积为  $2.5 m^2$ ,地球半径  $R = 6371.004 km$ ,巡航高度  $H = 29 km$ ,目标初始速度  $V = 0.8 Ma$ ,目标初始高度  $H = 12 km$ ,目标总质量  $3510 kg$ ,火箭助推器燃料质量  $1785 kg$ ,爬升段目标轨道倾角  $\theta =$

收稿日期:2012-05-29

作者简介:李昌玺(1986-),男,湖北监利人,硕士生,主要从事临近空间高超声速目标跟踪方法研究。

E-mail:lcx555@freemail.mtn

60°,火箭助推器脱落后目标质量 1 320 kg,超燃冲压发动机比冲  $G_T = 4\ 000\ \text{N} \cdot \text{s}/\text{kg}$ ,目标最大速度  $V = 7\ \text{kg}$ ,超燃冲压发动机燃料质量 760 kg。据文献[6],通过仿真,得到临近空间高超声速目标轨迹图 1 与加速度变化图 2。

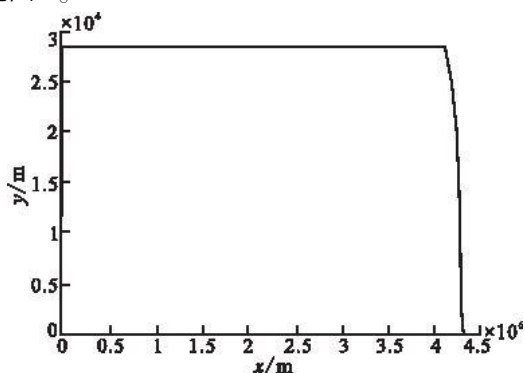


图 1 目标轨迹图

Fig. 1 Track of target

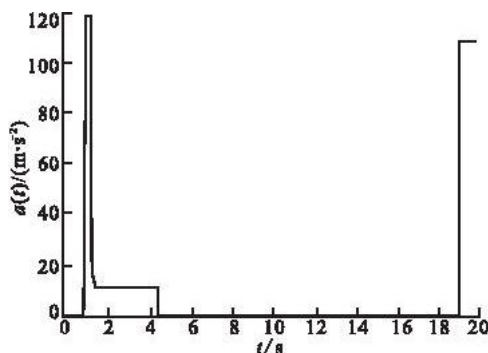


图 2 加速度变化图

Fig. 2 Diversification of acceleration

## 2 模型的选择

### 2.1 Singer 模型和“当前”(CS)统计模型

Singer 模型<sup>[7]</sup>是 R. A. Singer 在 1969 年提出了机动目标的零均值、一阶时间相关机动加速度模型,其假定机动加速度  $\alpha(t)$  为零均值平稳随机过程,其基本过程见文献[8]。

机动目标“当前”统计模型<sup>[9]</sup>是我国学者周宏仁提出。该模型的本质是非零均值时间相关模型,加速度的“当前”概率密度用修正的瑞利分布来描述,均值为“当前”加速度预测值,随机加速度在时间轴上符合一阶时间相关过程,由于该模型采用非零均值和修正瑞利分布来表示机动加速度特性,因而更加符合实际。与传统的 Singer 模型相比,它能够更为真实地反映目标机动范围强度的变化,其基本过程见文献[8]。

### 2.2 改进的“当前”统计模型(ADE)

基于距离自适应模型算法(ADE)是在“当前”统计模型的基础上,利用机动加速度与相邻采样时刻位置估计量之间的函数关系实现对过程噪声方差进行自适应调整,进而在线检测目标机动状况的一种算法,其基本过程与 CS 模型的机动目标跟踪算法一致,不同之处在于对机动加速度协方差  $\alpha_a^2(k)$  的改进,避免了因为人为设定机动加速度区间范围而造成误差。

令  $\hat{x}(k/k)$  表示  $k$  时刻位置分量的测量值, $\hat{x}(k/k-1)$  表示  $k$  时刻位置分量的估计值,则  $\Delta d = |\hat{x}(k/k) - \hat{x}(k/k-1)|$ ,其中  $\Delta d$  表示在一个采样周期内由于机动而引起的机动目标位置变化量。

令  $\Delta a$  表示加速度扰动增量,即  $k$  时刻到  $k-1$  时刻加速度的变化量的绝对值。在一个采样周期  $T$  内,由于机动加速度方差与机动扰动增量的绝对值成线性关系,而加速度增量与位置增量之间也存在线性关系,即  $\alpha_a^2(k) = C_1 \Delta a$ ,  $\Delta d = C_2 \Delta a$ ,故有: $\alpha_a^2(k) = C \Delta d$ ,即  $\alpha_a^2(k) = C |\hat{x}(k/k) - \hat{x}(k/k-1)|$ 。  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C$  都是常数,取  $C = 2/T^2$ ,则:

$$\alpha_a^2(k) = 2/T^2 |\hat{x}(k/k) - \hat{x}(k/k-1)| \quad (1)$$

$$Q(k) = 2\alpha\alpha_a^2(k)q \quad (2)$$

从式(1)可以看出,目标没有发生机动时, $\Delta d$  相对较小,即  $\alpha_a^2(k)$  较小;当目标发生机动时, $\Delta d$  急剧增大, $\alpha_a^2(k)$  也随之变大,这种关系符合  $\alpha_a^2(k)$  实际的物理含义。另外,由式(2)可知,噪声方差求取的实质是利用前两时刻加速度的变化预测下一时刻目标的机动状况来完成噪声方差  $Q(k)$  自适应估计。这种自适应关系正是建立在该模型的基本假设条件基础上:机动目标正以某一种加速度机动时,下一时刻加速度的取值是有限的,因此,它能够较好的反映出目标出现机动和非机动的状况。

## 3 交互多模型算法(IMM)

交互多模型算法(IMM)<sup>[10-12]</sup>是在广义伪贝叶斯基础上提出的一种具有马尔可夫转移矩阵的结构自适

应算法,它假设不同模型之间的转移服从已知转移概率的有限态马尔可夫链,考虑多个模型的交互作用,以此得出目标的状态估计,这种算法是目前公认的比较实用的机动目标跟踪算法之一,其主要算法过程见文献[8]。

## 4 仿真分析

仿真使用的目标假设在二维平面内运动,采用3个模型进行交互,仿真以建立的临近空间高超声速目标轨迹为基础,取820个采样点,采用相扫,采样周期为0.2 s, Monte Carlo 仿真次数为100次。由于 $x$ 、 $y$ 方向上均方根误差趋势相同,选取跟踪目标 $x$ 方向上的均方根误差 RMSE 作为仿真的评估指标,即:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}(i) - X(i))^2} \quad (3)$$

### 4.1 基于 Singer - IMM 算法的临近空间高超声速目标跟踪仿真分析

仿真采用一个 CV 模型和 2 个 Singer 模型进行交互,2 种 Singer 模型量测噪声都为  $\sigma = 150 \text{ m}$ ,方位角测量误差分别为  $\sigma_{\theta 1} = 0.5^\circ$ 、 $\sigma_{\theta 2} = 0.1^\circ$ ,机动加速度方差  $\sigma_a^2 = 0.5$ ,机动频率分别为  $\alpha_1 = 1/20$ 、 $\alpha_2 = 1/60$ ,模型转

移概率矩阵  $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix}$ 。仿真结果见图 3-4。

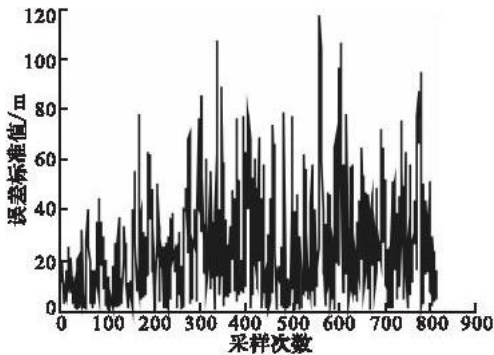


图3 X方向距离均方根误差图

Fig. 3 RMSE of distance in X direction

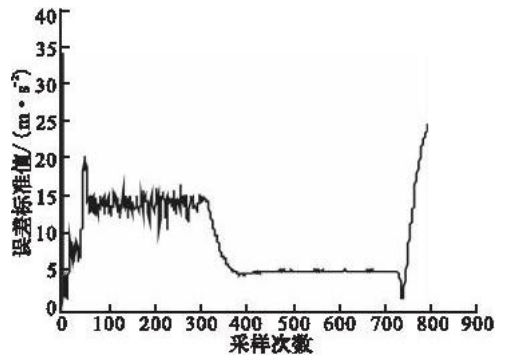


图4 X方向加速度均方根误差图

Fig. 4 RMSE of distance in X acceleration

### 4.2 基于 CS - IMM 算法的临近空间高超声速目标跟踪仿真分析

仿真采用一个 CV 模型和 2 个 CS 模型进行交互,仿真过程中,假设目标机动加速度可能出现的极大值和极小值分别为  $100 \text{ m/s}^2$ 、 $-100 \text{ m/s}^2$ ,其余参数设置与 Singer - IMM 算法相同。仿真结果见图 5-6。

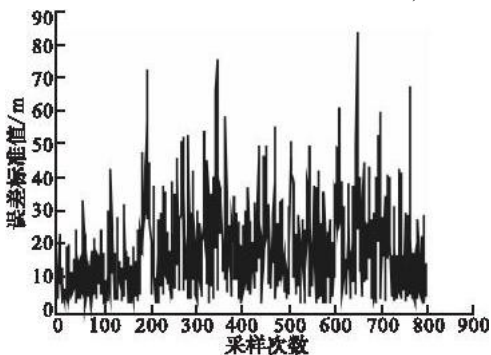


图5 X方向距离均方根误差图

Fig. 5 RMSE of distance in X direction

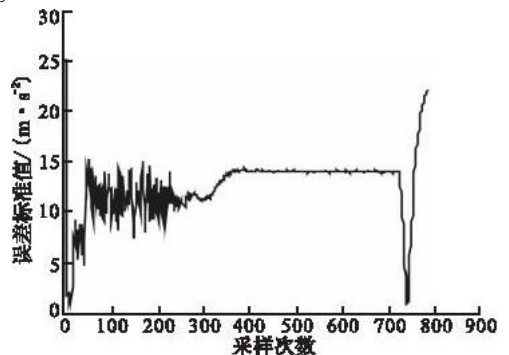


图6 X方向加速度均方根误差图

Fig. 6 RMSE of distance in X acceleration

### 4.3 基于 ADE - IMM 算法的临近空间高超声速目标跟踪仿真分析

仿真采用一个 CV 模型和 2 个 ADE 模型进行交互,所需参数设置与 CS - IMM 模型参数设置相同。仿真结果见图 7-8。

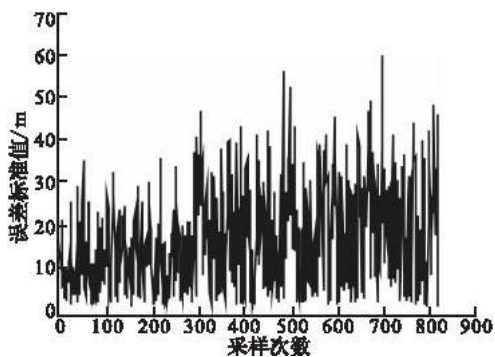


图 7 X 方向距离均方根误差图

Fig. 7 RMSE of distance in X direction

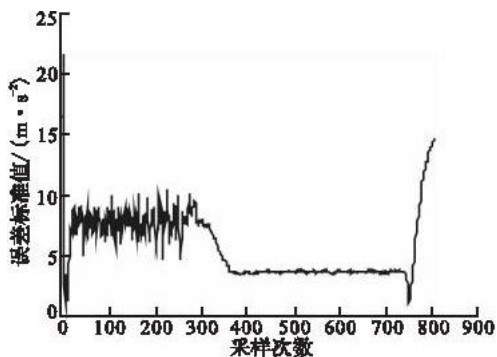


图 8 X 方向加速度均方根误差图

Fig. 8 RMSE of distance in X acceleration

表 1 是 3 种算法 X 方向均方根误差对比表。

表 1 3 种算法 X 方向均方根误差对比

Tab. 1 Comparison of RMSE in X direction

	距离均方根 误差/m	加速度均方根误差/( $m \cdot s^{-2}$ )			
		起始值	爬升段	巡航段	攻击段
Singer - IMM	118	36	20	4.8	25
CS - IMM	85	25	15	14	22
ADE - IMM	60	22	8	2	15

表 2 是各模型 100 次 MonteCarlo 仿真次数所耗时间对比表。

表 2 消耗时间对比

Tab. 2 Comparison of time consumption

模型	仿真时间/s
Singer - IMM	10.348 6
CS - IMM	11.056 7
ADE - IMM	16.468 5

通过仿真可知,3 种算法在跟踪临近空间高超声速目标时,都能够取得良好的效果。从距离均方根误差来看,ADE - IMM 算法误差最小,CS - IMM 其次;从加速度均方根误差来看,不管目标机动与否,ADE - IMM 算法误差总是最小的;CS - IMM 算法与 Singer - IMM 算法相比,当目标发生机动时,CS - IMM 算法具有更好的跟踪精度,当目标没有发生机动或机动很小时,Singer - IMM 算法的跟踪效果比 CS - IMM 算法效果更佳,这是因为,相对于 Singer 模型,CS 模型采用非零均值和修正的瑞利分布表征机动加速度的特征,能更真实地反映目标机动范围和强度的变化,具有响应快、跟踪精度高的优点,适合强机动,特别是临近空间高超声速目标的跟踪场合,但是对于非机动或者机动比较弱的目标,则跟踪精度相对较低。

由以上分析可知,ADE - IMM 算法兼顾 Singer - IMM 算法和 CS - IMM 算法的优点,当目标在爬升段和攻击段机动时,ADE - IMM 算法跟踪精度比 CS - IMM 算法要高,当目标在巡航段处于弱机动或非机动时,ADE - IMM 算法跟踪精度比 Singer - IMM 算法要高,从算法所需时间上看,这种精度的提高是以消耗更多的计算时间为代价的。

## 5 结束语

本文在文献[2]的基础上,对基本参数进行了更切合实际的设置,比较了 Singer - IMM 算法、CS - IMM 算法的优缺点,提出了 ADE - IMM 算法,仿真结果表明,改进的算法具有更精确的跟踪精度,但算法仍然存在很多不足,需要进一步改进,如:由于迭代运算过多而导致跟踪时算法的运行时间稍长,运行过程中某些变量没有及时更新而带来种种跟踪误差等,这些都将是下一步研究的重点。

### 参考文献(References):

[1] Li X R, Jilkov V R. Survey of maneuvering target tracking part I :dynamic models[J]. IEEE trans on aerospace and electron-

- ic system, 2003, 39(4): 1334 - 1364.
- [2] 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, 8(8): 80 - 84.  
GUAN Xin, ZHAO Jing, ZHANG Zhengchao, et al. A feasible tracking algorithm for hypersonic aircrafts[J]. Telecommunication engineering, 2011, 8(8): 80 - 84. (in Chinese)
- [3] 隋红波, 房晓颖, 吴瑛. 改进的当前统计模型及自适应跟踪算法[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(3): 202 - 205.  
SUI Hongbo, FANG Xiaoying, WU Ying. A modified adaptive tracking algorithm based on current statistic model[J]. Radar science and technology, 2008, 6(3): 202 - 205. (in Chinese)
- [4] Kurt D Hall. Near space should air force space command take control of its shore[R]. Alabama: air war college, 2006.
- [5] 关欣, 赵静, 何友. 临近空间高超声速飞行器跟踪技术[J]. 四川兵工学报, 2011, 8(8): 4 - 6.  
GUAN Xin, ZHAO Jing, HE You. Track technology of hypersonic aircraft in near space[J]. Sichuan ordnance journal, 2011, 8(8): 4 - 6. (in Chinese)
- [6] 黄铭媛. 高超巡航飞行器组合导航系统研究与算法验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
HUANG Mingyuan. Research on integrated navigation system of HCV and experiment using unscented kalman filter[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong university, 2008. (in Chinese)
- [7] Bar Y, Shalom, Fortmann T E. Tracking and data association[M]. California: Academic press, 1988.
- [8] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.  
HE You, XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei, et al. Radar data processing with applications[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2009. (in Chinese)
- [9] 周宏仁, 敬忠良. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.  
ZHOU Hongren, JING Zhongliang. Tracking of maneuvering targets[M]. Beijing: National defence industry press, 1991. (in Chinese)
- [10] Chang K C, Bar Shalom Y. Distributed adaptive estimation with PDA[J]. Automatics, 1989, 25(3): 359 - 369.
- [11] Efe M, Atherton D P. Maneuvering target tracking using adaptive turn rate models in the interacting multiple model algorithm [C]//Proceeding of the 35th conference on decision and control. Kobe, Japan: [s. n. ], 1996: 298 - 310.
- [12] Li X R, Bar Shalom Y. Multiple - model estimation with variable structure[J]. IEEE trans on automatic control, 1996, 41(4): 478 - 493.

(编辑: 田新华)

## An Improved Tracking Algorithm for Hypersonic Targets

LI Chang - xi<sup>1</sup>, BI Hong - kui<sup>2</sup>, ZHANG Bing<sup>2</sup>, XIAO Song<sup>1</sup>

(1. Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. Department of Land - based Early Warning Surveillance Equipment, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Based on the motion characteristics of near space hypersonic targets, a moving model for the near space hypersonic targets is built. According to the current statistical model, using the function relationship of range and acceleration, a new adaptive maneuvering target tracking algorithm, called ADE - IMM is presented. The use of this algorithm can improve the tracking accuracy of tracking the hypersonic targets in near space. Simulation shows that this algorithm simultaneously has the advantages of both Singer - IMM and CS - IMM algorithms in tracking the hypersonic targets in near space.

**Key words:** near space; hypersonic targets; IMM algorithm; improved algorithm