

文章编号: 1001-893X(2011)08-0080-05

一种可行的高超声速飞行器跟踪算法^{*}

关欣¹, 赵静¹, 张政超², 何友¹

(1. 海军航空工程学院 信息融合技术研究所, 山东 烟台 264001; 2. 解放军 63891 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要:通过分析临近空间高超声速飞行器的运动特性,建立了高超声速飞行器运动模型,并运用交互式多模型(IMM)算法对其进行跟踪,通过 100 次蒙特卡罗实验,获得了误差较小的理想跟踪效果,说明了 IMM 算法用于高超声速目标跟踪中的可行性。

关键词:临近空间;高超声速飞行器;IMM 算法;目标跟踪

中图分类号: TN820.4 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.017

A Feasible Tracking Algorithm for Hypersonic Aircrafts

GUAN Xin¹, ZHAO Jing¹, ZHANG Zheng-chao², HE You¹

(1. Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 63891 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: Through analysing the motion characteristics of near space hypersonic aircrafts, the moving model for aircrafts is built and the interactive multiple model (IMM) algorithm is used in tracking. Through 100 times Monte-Carlo experiment, an ideal tracking effect is obtained, which shows the feasibility of applying IMM algorithm in tracking hypersonic aircrafts.

Key words: near space; hypersonic aircraft; IMM algorithm; target tracking

高超声速目标是跟踪领域新兴的一类目标,对于它的研究还处于不成熟阶段^[1]。因此,本文首先对临近空间高超声速飞行器的飞行特性进行分析,从而将其飞行阶段进行划分,为运动模型的建立打下基础,接着基于高超声速飞行器“高速度”、“高机动”的特性,运用目前普遍认为的对于高速高机动目标跟踪最好的算法——交互式多模型(IMM)算法对其进行跟踪^[2,3]。Monte-Carlo 仿真实验结果表明,IMM 算法具有良好的跟踪效果。

1 高超声速飞行器的飞行特性

高超声速飞行器“高速度”、“高机动”的飞行特点给跟踪技术提出了很高的要求,要完成高精度跟

踪的首要条件就是必须根据已知的飞行阶段,结合实例,研究分析建立合乎实际的临近空间高超声速飞行器各个阶段的运动模型,这样才能为跟踪打下一个良好的基础。

由于临近空间高超声速飞行器所特有的这种飞行特性,因而能够在很短的时间内完成加速,往往在巡航段开始几百秒的时间内速度就可达到 6 ~ 7 Ma^[4],这是十分惊人的。以 X-51 为例,它是由一架 B-52H 轰炸机携带飞至太平洋上空 15.24 km 的高空,然后从吊臂释放,助推级点火工作约 30 s,将飞行器推至 18.29 km 的高空并达 4.5 Ma,在助推级燃料燃尽后,助推级与中间级和巡航级分离,中间级分离后,巡航级在无动力状态下滑翔数秒后,超燃冲压发动机开始进入高超声速试验阶段,巡航级的发

^{*} 收稿日期: 2011-04-07; 修回日期: 2011-05-31

基金项目: 全国优秀博士论文作者专项资金资助项目(200443)

Foundation Item: The National Excellent Ph.D. Disquisition Author Fund (No. 200443)

动机点火后工作300 s,使飞行器爬升到大约24 km的高度,且速度达到了惊人的7 Ma,发动机熄火后,飞行器在500 s的下降阶段内进行机动飞行,最后降落在太平洋^[5]。

因此,根据以上描述,可以粗略地将临近空间高超声速飞行器的运动轨道简化为助推段、巡航段和攻击段 3 个阶段,其中,巡航段又包括爬升段、平飞加速段和等速巡航段。

2 运动模型的选择

在选取运动模型时,根据模型自身及飞行器运动特点,本文选取了匀速模型(CV)、匀加速模型(CA)和 Singer 模型,通过交互式多模型算法(IMM)完成模型间的相互作用,用数学的方式表现飞行特性。

2.1 匀加速模型

匀加速模型^[6]是假设加速度的一阶导数是白噪声的过程,即:

$$\dot{a}(t) = \omega(t) \tag{1}$$

式中, $\omega(t)$ 是均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声。则单维的离散形式的状态方程为

$$\mathbf{X}_1(k) = \mathbf{F}(k) \mathbf{X}_1(k-1) + \omega(k) \tag{2}$$

其中:

$$\mathbf{F}(k) = \begin{pmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

对应的三维扩展模型为

$$\mathbf{X}(k) = \text{diag}\{\mathbf{F}(k), \mathbf{F}(k), \mathbf{F}(k)\} \mathbf{X}(k-1) + \omega(k) \tag{4}$$

式中, $\mathbf{X}(k) = (x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z})^T$ 。

2.2 Singer 模型

Singer 模型法^[7]之所以得到了广泛的应用,是因为它将机动模型看作是相关噪声模型,而不是通常假定的白噪声模型,而对目标加速度 $a(t)$ 作为具有指数自相关的零均值随机过程建模,即:

$$R(\tau) = E[a(t)a(t+\tau)] = \sigma_m^2 e^{-\alpha|\tau|} \tag{5}$$

式中, σ_m^2 、 α 是在区间 $[t, t+\tau]$ 内决定目标机动特性的待定参数, α 为子相关时间常数,即机动频率,其经验取值范围为:目标机动形式是飞机慢速转弯, $\frac{1}{\alpha}$ 的取值为60 s,对于逃避机动是20 s,大气扰动是

1 s,它的确切值要通过实时测量才能确定; σ_m^2 为机动加速度方差。

对时间相关函数 $R(\tau)$ 进行白化处理后,可用输入为白噪声的一阶时间相关模型表示为(该动态模型是一阶马尔可夫过程):

$$\dot{a}(t) = -\alpha a(t) + \omega(t) \tag{6}$$

式中, $\omega(t)$ 是均值为0、方差为 $2\alpha\sigma_m^2$ 的高斯白噪声。于是可知,单维离散的 Singer 模型为

$$\mathbf{X}_1(k) = \mathbf{F}(k) \mathbf{X}_1(k-1) + \omega(k) \tag{7}$$

其中:

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & (\alpha T - 1 + e^{-\alpha T})/\alpha^2 \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\alpha T})/\alpha \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \tag{8}$$

所以,三维情况的离散形式为

$$\mathbf{X}(k) = \text{diag}\{\mathbf{F}(k), \mathbf{F}(k), \mathbf{F}(k)\} \mathbf{X}(k-1) + \omega(k) \tag{9}$$

3 交互式多模型算法(IMM)

具有 N 个模型的 IMM 算法从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的递推过程如下^[8]。

(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 $\mathbf{P}_{t_{ij}}$,则:

$$\mathbf{P}_{t_{ij}} = \begin{bmatrix} P_{t_{i1}} & P_{t_{i2}} & \cdots & P_{t_{iN}} \\ P_{t_{21}} & P_{t_{22}} & \cdots & P_{t_{2N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{t_{r1}} & P_{t_{r2}} & \cdots & P_{t_{rN}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

需要注意的是,该模型转移概率通常都是先验给定的,与模式 i 的驻留时间无关。令 $\hat{X}^i(k-1/k-1)$ 为 $k-1$ 时刻滤波器 j 的状态估计, $\mathbf{P}^i(k-1/k-1)$ 为相应的状态协方差阵, $u_{k-1}(j)$ 为 $k-1$ 时刻模型 j 的概率,且 $i, j = 1, 2, \dots, N$,则交互计算后 r 个滤波器在 k 时刻的输入如下:

$$\hat{X}^{oj}(k-1/k-1) = \sum_{i=1}^N \hat{X}^i(k-1/k-1) u_{k-1/k-1}(i/j) \tag{11}$$

其中:

$$\begin{cases} u_{k-1/k-1}(i/j) = \frac{1}{\bar{C}_j} P_{t_{ij}} u_{k-1}(i) \\ \bar{C}_j = \sum_{i=1}^N P_{t_{ij}} u_{k-1}(i) \end{cases} \tag{12}$$

$$P^{oj}(k-1/k-1) = \sum_{i=1}^N \{ P^i(k-1/k-1) + [\hat{X}^i(k-1/k-1) - \hat{X}^{oj}(k-1/k-1)] [\hat{X}^i(k-1/k-1) - \hat{X}^{oj}(k-1/k-1)]' \} u_{k-1/k-1}(i/j) \tag{13}$$

(2)模型修正

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)模型可能性计算

若模型 j 滤波残差为 v_k^j , 相应的协方差为 S_k^j , 并假定服从高斯分布, 那么模型 j 的可能性为

$$\Delta_k^j = \frac{1}{\sqrt{|2\pi S_k^j|}} \exp \left[-\frac{1}{2} (v_k^j)' (S_k^j)^{-1} v_k^j \right] \tag{14}$$

其中:

$$\begin{cases} v_k^j = Z(k) - H^j(k) \hat{X}^j(k/k-1) \\ S_k^j = H^j(k) P^j(k/k-1) H^{j'}(k) + R(k) \end{cases} \tag{15}$$

(4)模型概率更新

模型 j 的概率更新为

$$u_k(j) = \frac{1}{C} \Delta_k^j \bar{C}_j \tag{16}$$

其中:

$$C = \sum_{i=1}^N \Delta_k^i \bar{C}_i \tag{17}$$

(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:

$$\hat{X}(k/k) = \sum_{i=1}^N \hat{X}^i(k/k) u_k(i) \tag{18}$$

$$P(k/k) = \sum_{i=1}^N u_k^i \{ P^i(k/k) + [\hat{X}^i(k/k) - \hat{X}(k/k)] [\hat{X}^i(k/k) - \hat{X}(k/k)]' \} \tag{19}$$

整个 IMM 算法就是利用这一递推过程而完成的。

4 基于 IMM 算法的高超声速飞行器跟踪仿真分析

4.1 仿真情景

设目标通过前期搭载、助推, 在中间级与巡航级分离后, 经过数秒的滑翔, 超燃冲压发动机点火开始进入高超声速试验阶段; 巡航级的发动机点火后工作 300 s, 使飞行器进入临近空间的高度 40 km, 接着又在 40 m/s² 的加速度下再次加速运动, 直至速度达到 6.5 Ma; 发动机熄火后, 飞行器在 300 s 的下降阶段进行机动飞行, 完成俯冲攻击。

4.2 仿真结果分析

仿真时设观测噪声标准差为 100, 采样时间为 2 s, 进行 100 次蒙特卡罗实验, 模型间的转移概率为

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 0.9 & 0.05 & 0.05 \\ 0.05 & 0.9 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.9 \end{pmatrix}$$

通过实验仿真可得基于 IMM 算法的高超声速飞行器跟踪效果, 如图 1 所示。

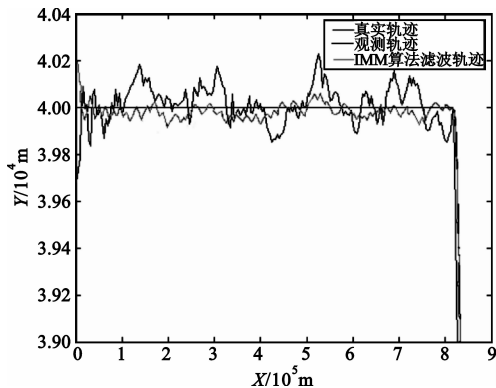


图 1 基于 IMM 算法高超声速飞行器跟踪效果图
Fig.1 Tracking simulation of hypersonic aircraft based on IMM algorithm

通过图 1 可以清楚地看到:

(1) IMM 算法能够完成高超声速飞行器跟踪的任务, 验证了该方法在高超声速飞行器跟踪应用上的可能性;

(2) 利用 IMM 算法进行滤波后所得到的目标跟踪轨迹要明显优于通过观测数据所得到的跟踪轨迹。

将经过 IMM 算法所得到的跟踪轨迹与真实轨迹比较可得 X 方向及 Y 方向的位置误差均值图, 如图 2 和图 3 所示。

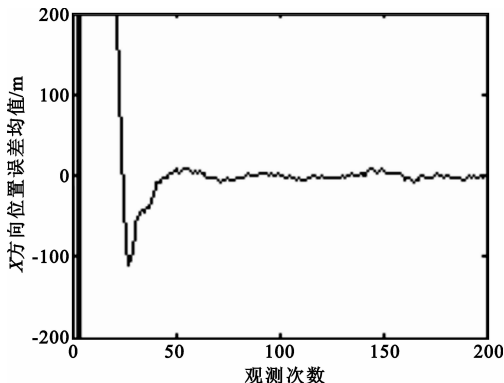


图 2 X 方向滤波误差均值图
Fig.2 Filtering error mean in X direction

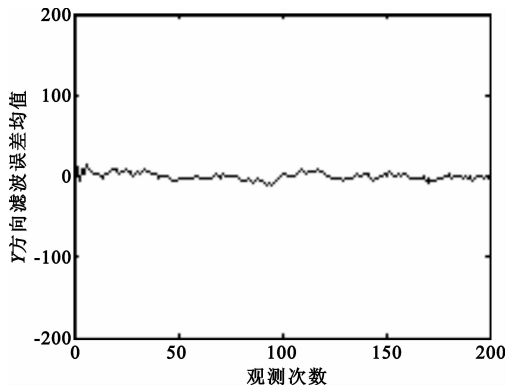


图 3 Y 方向滤波误差均值图
Fig.3 Filtering error mean in Y direction

通过观察图 2 和图 3,我们可以得到跟踪轨迹在 X 方向和 Y 方向上的位置误差:在 X 方向上,起始时误差较大,但随着观测次数的增多误差趋于稳定且误差值变小;而在 Y 方向上,误差值始终比较平稳,没有太大波动。

同理,经过 IMM 算法所得到的跟踪轨迹与真实轨迹比较可得 X 方向及 Y 方向的速度误差均值图,如图 4 和图 5 所示。

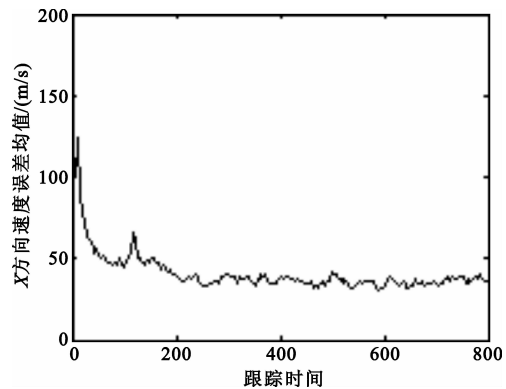


图 4 X 方向速度误差均值
Fig.4 Velocity error mean in X direction

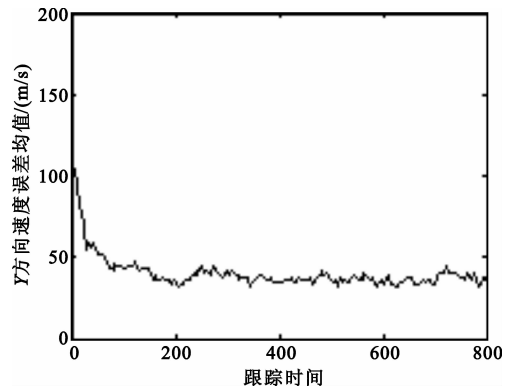


图 5 Y 方向速度误差均值图
Fig.5 Velocity error mean in Y direction

通过观察图 4 和图 5,我们可以得到跟踪时在 X 方向及 Y 方向上的速度误差,且在 X 方向和 Y 方向上起始时刻的误差都比较大,但随着跟踪时间的增长,误差明显减少,基本趋于稳定。

5 结束语

本文对高超声速飞行器进行特性分析和建模,并运用 IMM 算法对其进行跟踪,仿真结果表明,IMM 算法可以应用在高超声速飞行器跟踪技术中并能获得较好的跟踪效果,但仍然存在很多不足,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,这些都值得进一步研究。但是 IMM 算法总的来说给我们提供了一种高超声速飞行器跟踪的思路,这对以后的深入研究将有很大的帮助作用,具有积极的现实意义。

参考文献:

- [1] 李怡勇, 李智. 临近空间飞行器发展与应用分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2): 61 – 65.
LI Yi – yong, LI Zhi. Development and Application Analysis of Near Space Hypersonic Aircraft [J]. Arming Command Technology College Paper, 2008, 19(2): 61 – 65. (in Chinese)
- [2] Mazor E, Aveebuch A, Bar-Shalom Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking: a survey [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 103 – 122.
- [3] Munir A, Atherton D P. Adaptive interacting multiple model algorithm for tracking a maneuvering target[J]. IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 1995, 124(1): 11 – 17.
- [4] Anthony Colozza, James Dolce. Initial feasibility Assessment of a High Altitude Long Endurance Airship[R]//NASA CR – 2003 – 212724. Columbia, USA: NASA, 2003.
- [5] 段锋. 临近空间飞行器现状与发展[J]. 航空科学技术, 2007, 88(6): 22 – 25.
DUAN Feng. Status and Development of Near Space Vehicles [J]. Aeronautical Science and Technology, 2007, 88(6): 22 – 25. (in Chinese)
- [6] 何友, 王国宏, 陆大金, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
HE You, WANG Guo – hong, LU Da – jin, et al. Multisensor Information Fusion With Applications [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2007. (in Chinese)
- [7] 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 Jian – juan, ZHANG Jing – wei, et al. Radar Data Processing With Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2009. (in Chinese)

[8] 何友,王国宏,关欣. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社,2010.
HE You, WANG Guo-hong, GUAN Xin. Information Fusion Theory and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2010. (in Chinese)

作者简介:

关欣(1978—),女,辽宁锦州人,2006年获博士学位,现为副教授、硕士生导师,主要研究方向为多传感器信息融合、目标跟踪;
GUAN Xin was born in Jinzhou, Liaoning Province, in 1978. She received the Ph.D. degree in 2006. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students. Her research concerns multisensor information fusion and target tracking.
赵静(1986—),女,山东龙口人,硕士研究生,主要研究方向为高超声速飞行器跟踪技术;

ZHAO Jing was born in Longkou, Shandong Province, in 1986. She is now a graduate student. Her research concerns tracking technology of hypersonic aircraft.
Email: tt86725@163.com
张政超(1981—),男,湖北武穴人,2010年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为信息融合、雷达数据处理;
ZHANG Zheng-chao was born in Wuxue, Hubei Province, in 1981. He received the M.S. degree in 2010. He is now an engineer. His research concerns information fusion and radar data processing.
何友(1956—),男,吉林磐石人,1996年获博士学位,现为教授,博士生导师,主要研究方向为信息融合、目标识别及跟踪等。
HE You was born in Panshi, Jilin Province, in 1956. He received the Ph.D. degree in 1996. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research concerns information fusion, target recognition and tracking.

《电讯技术》征稿启事

《电讯技术》(月刊)创刊于1958年,由中国西南电子技术研究所主办,系国内外公开发行的、理论与应用相结合的综合性电子专业科技刊物,为中文核心期刊。目前,已被英国 IEE《科学文摘(SA)》INSPEC、美国《剑桥科学文摘(CSA)》、波兰《哥白尼索引(IC)》等国外知名数据和国内多个中文数据库收录。

本刊主要刊登涉及下列应用方向和技术领域的述评、论文、新概念新技术新产品介绍:

- 电子系统工程 • 通信 • 导航 • 识别
- 飞行器测控 • 卫星应用 • 雷达 • 信息战
- 共性技术(包括天线、射频电路、信号处理、信息处理、监视与控制、时间与频率、先进制造、电磁兼容等)。

本刊栏目有:系统总体技术、信号与信息处理技术、计算机、网络及其应用技术、信道技术、先进制造技术、基础技术、述评与展望。

欢迎业内学者、专家及科技人员踊跃投稿。

来稿要求及注意事项:

- (1)文稿务必主题明确,论述合理,逻辑严谨,数据可靠,叙述清楚,文字精炼。内容应保守国家机密,并提供所在单位的保密审查证明,引用他人作品应给出来源。
- (2)文稿一般不应超过 6 000 字,综述稿不超过 8 000 字。稿件应附英文题名、作者名、单位名、摘要和关键词,基金项目应注明项目编号。中文题名一般不超过 20 个汉字,必要时可加副标题。
- (3)摘要应包括目的、方法、结果和结论四要素,即用简洁的语言说明文章要解决的问题,主要工作过程及所采用的技术手段和方法,研究所获得的实验数据、结果及其意义。篇幅以 200~300 字为宜。
- (4)关键词以 3~8 个为宜。为便于文献检索,应尽可能根据《中国图书馆分类法(第四版)》提供中图分类号。
- (5)文中涉及的物理量和计量单位应符合国家有关标准。计量单位请用 GB3100-3102-93《量和单位》规定的法定计量单位。注意区分各物理量符号的文种、大、小写、正斜体(矢量和矩阵用黑斜体)、上、下角标等。
- (6)插图和表格只给出必要的,且应有图题和表题。插图最好采用计算机制作。照片以黑白为佳,也可采用扫描的电子文档(精度高于 400 dpi, tif, jpg, psd 等格式均可)。
- (7)文稿中引用他人的成果,务请注明原作者姓名、题名、来源,一并在参考文献中给出,并在正文中相应位置进行标示,否则责任由来稿人自负。参考文献只择主要的,未公开发表的文献请勿列入参考文献。书写格式请参见 GB/T 7714-2005 文后参考文献著录规则。
- (8)投稿邮箱: dianxunjishu@china.com, 并尽量同时提供 Word 和 pdf 文档, 无需另寄打印稿。来稿请注明作者详细通信地址、联系电话和有效电子邮箱,并注明拟投栏目。
- (9)本刊编辑部将在 3 个月之内对来稿作出取舍,如逾期未收到处理意见或刊用通知,作者有权对稿件另行处理。稿件一经刊用,本刊将酌情从优支付稿酬并赠送当期样刊,本刊支付的稿酬中已包含作者著作权使用费。请勿一稿多投,否则后果自负。