

高超声速飞行器交互式多模型跟踪算法仿真

郝杰,任静

(西安航空学院,陕西 西安 710077)

摘要:针对临近空间高超声速飞行器的运动状态多变,目前单一跟踪模型已经很难描述出目标的特性,根据多变的运动特点,将交互式多模型(IMM)算法应用于高超声速飞行器跟踪领域。该算法可以有效地根据各个模型的概率进行准确的调整,特别是对于机动目标的跟踪。文中根据 IMM 算法在临近空间环境下对高超声速飞行器进行了跟踪仿真。通过 Monte-Carlo 仿真,结果表明该算法在临近空间中具有较好的跟踪精度,同时可以提高高速飞行目标的跟踪精度。

关键词:高超声速飞行器;交互式多模型;自适应;目标跟踪

中图分类号:TN957.51

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)02-0204-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.02.046

Tracking Algorithm Simulation of Interactive Multiple Model for Hypersonic Flight Vehicle

HAO Jie, REN Jing

(Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In view of the features that motion state of near space hypersonic vehicle is variable, the single track model has been very difficult to describe the characteristic of target, according to the changeable motion characteristics, the Interacting Multiple Model (IMM) algorithm is applied to the hypersonic vehicle tracking field. The algorithm can be effective for accurate adjustment according to the probability of each model, especially for maneuvering target tracking. According to the IMM algorithm, the tracking simulation is carried out under the hypersonic vehicle in near space environment in this paper. Through Monte-Carlo simulation, the result shows that the algorithm has better tracking precision in near space, and can improve the high-speed flight target tracking accuracy.

Key words: hypersonic aircraft; interactive multiple model; adaptive; target tracking

0 引言

目前,目标跟踪在日常生活和军事斗争领域有着越来越广泛的应用,对目标进行有效的、实时的打击和捕捉需要根据目标具有的耗时小、操作简便、精确度高等特点。随着时代的发展,目标跟踪技术也在不断的发展和壮大,其中跟踪环境和被跟踪的目标也同时发生了很大的变化。对于目标跟踪,尤其是机动目标跟踪越来越困难,目前机动目标已经发展到超高速运动。主要表现在高速目标状态的不确定性引起的数学模型不匹配和滤波算法的不稳定。当前认为,对于高速机动目标跟踪的算法中,最为实用的是交互式多模型(IMM)算法,因为 IMM 算法具有很强的模块化特性,针对不同目标运动模型进行自适应调整^[1]。

近年来,随着世界各国利益战略的不断发展,各国

开始加紧了对临时空间的开发和研究。临近空间作为一个新兴的领域,它将航空和航天概念统一到一起,在未来的军事应用中有一定的应用价值,对保证我国的国际利益有重要意义。

临近空间(near space)是指距地面 20 ~ 100 公里的空域,它首先由美军提出,一般是处于现有飞机的最高飞行高度和卫星的最低轨道高度之间,也可称为“近空间”、“亚轨道”或“空天过渡区”,大致包括大气平流层区域、中间大气层区域和部分电离层区域。从不同的大气分层情况来看,临近空间跨越大气平流层区域、中间层区域和部分增温层区域;跨电离层和非电离层,绝大部分处于均质层中。由于其重要的开发应用价值而在国际上引起广泛关注。

临近空间飞行器是指只在或能在近空间作长期、

持续飞行的飞行器,或亚轨道飞行器,或在临近空间飞行的高超声速巡航飞行器,可以包括临近空间飞艇、充氦气的高空自由浮动气球、平流层高空长航时无人机、远距离遥控滑翔飞行器等多种形式。一个临近空间飞行器主要由三部分组成:

- (1)携带特定任务载荷的临近空间飞行器(包括气囊、辅助气囊、吊舱、推进装备、尾翼、方向舵、升降舵、电源系统等);
- (2)地面支持系统;
- (3)业务应用系统。

具有航空、航天飞行器所不具有的作用,特别是在通信保障、情报收集、电子压制、预警等方面极具发展潜力^[2]。目前我国对临近空间高超声速飞行器的跟踪研究处于起步阶段,其研究具有重要的意义。

1 交互式多模型(IMM)算法

现代空战环境非常恶劣,为了在空战中占据优先,需要要求载机的雷达反射面必须特别低,而且要求载机减少主动传感器使用时间,单传感器由于对目标的状态估计效果很差,已经满足不了实际空战的需要。因此,多融合传感器技术被提出,与单传感器相比,多融合传感器有较高的精度和时空覆盖范围以及分辨率。目前国内外学者对机动目标跟踪算法进行了大量的研究,已经取得了很多卓越的研究成果,并且一些已经应用于实际的工程领域。其中对目标跟踪精度和滤波算法一直是研究的关键问题。对信息融合处理跟踪问题所用到的滤波算法主要有交互式多模型(IMM)算法。由于机动目标运动特性多种多样,单一固定运动已经难以准确描述运动目标状态,所以用多运动描述机动目标运动状态。Blom 等人在广义伪贝叶斯算法的基础上提出了 IMM 滤波器,其中多个运动状态可以同时工作。IMM 具有无穷大的机动目标覆盖范围。在设计方面,目前采用较多的是匀速直线运动模型(CV)、匀加速直线运动模型(CA)以及匀速圆周运动模型(CT)及其改进型。文中研究了基本的 IMM 算法,对其算法推导,数学公式的描述,设计算法各项参数,以及应用范围做了讨论。目前多模型算法和单模型算法相互比较,多模型算法有更宽的带宽,所以更适应高速机动情况。文中针对高速机动目标情况,改进了模型集的选取,选用了符合高速机动模型的平飞运动和转弯运动两种方法。通过算法仿真,分析了各项参数对跟踪效果带来的影响,得出了当前运动模式的 IMM 对各种机动均有良好跟踪效果。文中基于当前的 IMM 算法,根据卡尔曼滤波检测方法检测机动目标,实现当前运动的改进。

IMM 算法具有典型的自适应特点,通过调整各个

模型的概率,使得其适用于对机动目标的定位跟踪。该算法包含了若干个滤波器,其中有相应的模计器,交互式作用器和估计混合器,多模型跟踪一个目标的机动运动是通过交互作用,模型的转移矩阵由马尔可夫转移矩阵确定。其中在多机无源被动跟踪问题中,研究的目标多是固定或者匀速直线运动,目前很多针对机动目标的文献非常少。在实际中,考虑到多种因素,目标常常是机动的,所以寻找机动目标算法很必要。在机动目标跟踪中,一个模型不能描述,只有采用多个模型,在不同的运动段采用不同的模型才能很好地描述目标的运动。由于无源定位的特点是静默,辐射源目标不可能经常处于剧烈机动中,因此在模型的选择上,采用目标匀速的状态模型为主,配以纵向的加速或转弯机动的模型为辅。在多机对机动目标的定位跟踪过程中,方位角信息的获取与对慢速目标基本一致。

IMM 算法使用多个不同的运动模型匹配运动目标不同的运动状态,IMM 因为其较高的运算费效比,在高速高机动目标跟踪领域得到了广泛应用^[3-14]。

其状态模型为:

$$\begin{cases} X_k = F[M(k)]X_{k-1} + W[k-1,M(k)] \\ Z_k = H[F(k)]X_k + V[k,M(k)] \end{cases} \tag{1}$$

模型间转移服从马尔可夫链:

$$P\{M(k) = M_j/M(k-1) = M_i\} = p_{ij} \tag{2}$$

其中, p_{ij} 是系统由模型 i 转移到模型 j 的概率。

2 IMM 算法流程

2.1 输入初值交互

IMM 算法的系统模型转移服从马尔可夫链,转移概率为 π_{ij} ^[4],且 $0 < \pi_{ij} < 1$, $\sum \pi_{ij} = 1$,输入交互初值如下:

$$\begin{aligned} X^{oj}(k-1/k-1) &= \sum_{i=1}^N X^i(k-1/k-1)u_{ij}(k-1) \\ P^{oj}(k-1/k-1) &= \sum_{i=1}^N [P^i(k-1/k-1) + (X^i(k-1/k-1) - X^{oj}(k-1/k-1))(X^i(k-1/k-1) - X^{oj}(k-1/k-1))^T]u_{ij}(k-1) \end{aligned} \tag{3}$$

2.2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种线性方差估计,采用状态空间方法,设计滤波器在时域范围里,算法是通过递推,且对线性系统的滤波不但精度比较高,而且计算比较简便。经过卡尔曼滤波可以得到系统的状态估计 $X^i(k/k)$ 、协方差 $P^i(k/k)$ 、残差 $v^j(k)$ 及协方差 $S^j(k)$ ^[5]。一步预测、残差计算、增益计算、状态更新、

状态方差矩阵更新公式如下:

$$\hat{X}_i(k|k-1) = \Phi_i \hat{X}_{oi}(k-1) \quad (4)$$

$$P_i(k|k-1) = \Phi_i P_{oi}(k-1) \Phi_i^T + Q_i \quad (5)$$

$$v_i(k) = Z(k) - H_i \hat{X}_i(k|k-1) \quad (6)$$

$$S_i(k) = H_i P_i(k|k-1) H_i^T + R_i \quad (7)$$

$$K_i(k) = P_i(k|k-1) H_i^T S_i(k)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{X}_i(k) = \hat{X}_i(k|k-1)_i + K_i(k) v_i(k) \quad (9)$$

$$P_i(k) = (I - K_i H_i) P_i(k|k-1)_i \quad (10)$$

2.3 模型更新概率

模型 j 的滤波残差服从高斯分布^[6], 其似然函数和模型概率更新公式为:

$$\Lambda^j(k) = \frac{1}{\sqrt{|2\pi S^j(k)|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [v^j(k)]^T (S^j(k))^{-1} [v^j(k)] \right\}$$

$$u_j(k) = \frac{1}{C} \Lambda^j(k) \bar{C}_j \quad (11)$$

2.4 输出估计交互

$X(k/k)$ 、 $P(k/k)$ 为 k 时刻的状态估计及协方差, 其交互结果为:

$$X(k/k) = \sum_{i=1}^N X^i(k/k) u_i(k)$$

$$P(k/k) = \sum_{i=1}^N u_i(k) \{ P^i(k/k) + [X^i(k/k) - X(k/k)] [X^i(k/k) - X(k/k)]^T \} \quad (12)$$

3 仿真场景设置

假设高超声速飞行器目标在二维空间内分别做平飞运动、转弯机动。取 180 个采样点, 采样周期为 0.5 s, 采用 Monte-Carlo 方法进行 50 次仿真。

假设模型间的转移概率为:

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix} \quad (13)$$

仿真目标运动理想轨迹如图 1 所示。

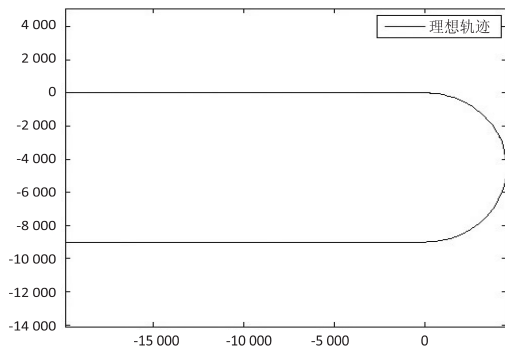


图 1 目标运动轨迹

4 仿真实例与分析

在噪声 $r=100$ 时, 应用 3 个运动模型采用 IMM 算法进行仿真, 得到滤波轨迹、滤波误差见图 2、图 3。

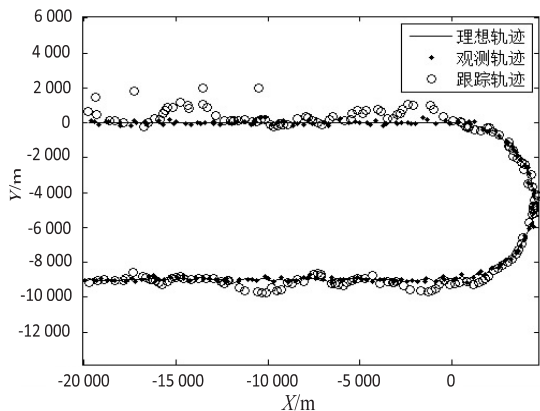


图 2 滤波轨迹

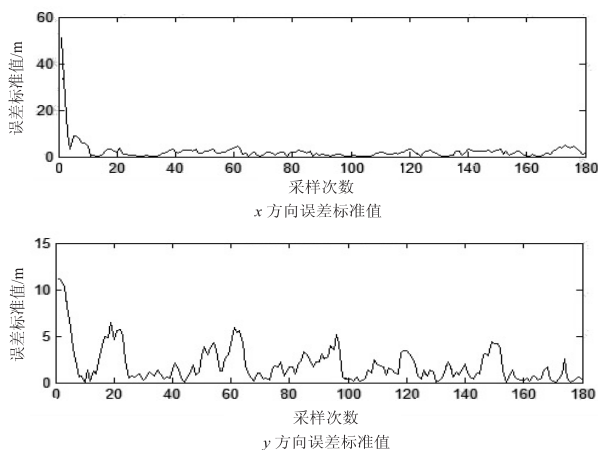


图 3 滤波误差

当噪声为 $r=100$ 时, 由滤波 x 方向与 y 方向误差分析可以知道: 在跟踪初始阶段, 跟踪算法有些发散, 而后可以很快地收敛。

5 结束语

文中在针对目标的转弯过程中, 所提出的算法可以比较好地跟踪目标。因此, 仿真实验结果表明 IMM 算法具有较高的跟踪精度, 分析滤波误差在临近空间环境下具有较好的跟踪效果, 有一定的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 丁振, 潘泉. 新息滤波交互式多模型噪声辨识算法[J]. 电子学报, 1997, 25(5): 95-98.
- [3] 臧荣春, 崔平远. 马尔可夫参数自适应 IFIMM 算法研究[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 521-524.
- [4] 肖松, 李志淮, 谭贤四, 等. 临近空间高超声速飞行器 DG-VSMM 跟踪算法[J]. 弹道学报, 2013, 25(2): 22-27.

(5)通道内针对2条控制路径采用逻辑同源互斥原则控制输出,能够克服控制源的多失效模式对最终故障指示信号输出的影响,即对故障申报逻辑结果进行双线互斥(线 C_1 与 C_2 逻辑状态同源反相)输出结合后端驱动电路可以在多种失效模式下仍然确保故障指示信号的有效输出,具体故障模式抑制情况见表1。

表1 故障申报逻辑与故障指示输出状态列表

故障申报逻辑		预期状态	失效模式1	失效模式2	失效模式3
状态1	0	C_1	0	1	0
		C_2	1	1	0
	指示输出状态	地	地	地	开
	输出正确性	正确	正确	正确	错误
状态2	1	C_1	1	1	0
		C_2	0	1	0
	故障指示输出	开	地	地	地
	输出正确性	正确	正确	正确	正确

可以看出,共8种逻辑状态(2种正常,6种失效)中仅有1种失效模式不能进行正确输出,但只要另一通道能够做出正确的故障指示,则这一种失效模式同样也可以被抑制。

5 结束语

综合评价功能电路设计优劣的几个必要方面包括功能是否完备、可测试性设计、可靠性设计、安全性设计等。文中论述了机载计算机中离散量接口功能电路的设计方法和思路,并给出了可为设计人员借鉴的功能结构组成及设计实例图,期望对读者有所获益。当然除文中论述的内容外,电磁兼容性、信号完整性、散热设计等方面也是功能模块电路在具体设计实现中应考虑到的重要因素。

参考文献:

[1] 王 萌,马小博. 机载嵌入式计算机内模拟电子模块的设计方法[J]. 计算机技术与发展,2006,16(10):47-48.

[2] 杨士元. 数字系统的故障诊断与可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[3] 王 萌. 硬件模块的可测试性设计与测试[C]//中国航空学会青年科技论坛文集. 北京:中国航空学会,2004.

[4] 田心宇,张小林,吴海涛,等. 机载计算机 BIT 设计技术及策略研究[J]. 计算机测量与控制,2011,19(9):2064-2066.

[5] 刘少雄,喻卫东. 嵌入式计算机的 BIT 设计与实现[J]. 计算机工程,2008,34(B09):115-116.

[6] Drees R, Young N. Role of BIT in support system maintenance and availability[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine,2004,19(8):3-7.

[7] Lord D H, Gleason D. Design & evaluation methodology for built-in-test[J]. IEEE Trans on Reliability, 1981, R-30(3):222-226.

[8] 李修杰,詹于杭. 模块测试与维护总线[J]. 航空电子技术,2003,34(2):8-16.

[9] 傅佩琛. 计算机系统硬件软件可靠性理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1990.

[10] 李烈彪,李 仙. 计算机系统的可靠性技术[J]. 计算机技术与发展,2007,17(11):142-144.

[11] 陆廷孝. 可靠性设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

[12] 潘计辉,张盛兵,张小林,等. 三余度机载计算机设计与实现[J]. 西北工业大学学报,2013,31(5):798-802.

[13] Yeh Y C. Triple-triple redundant 777 primary flight computer[C]//Proc of 1996 IEEE aerospace applications conference. Aspen,CO:IEEE,1996:293-307.

[14] Briere D, Traverse P. AIRBUS A320/A330/A340 electrical flight controls:a family of fault-tolerant systems[C]//Proc of the twenty-third international symposium on fault-tolerant computing. Toulouse:IEEE,1993:616-623.

(上接第206页)

[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,2011,32(8):4-6.

[6] 张福斌. 水下航行器导航系统设计与误差分析[D]. 西安:西北工业大学,2002.

[7] Hagen O K, Anonsen K B, Mandt M. The HUGIN real-time terrain navigation system[C]//Proc of oceans conference. Kjeller, Norway:[s. n.],2010:1-7.

[8] 王 越,曹长修. BP网络局部极小值产生的原因分析及避免方法[J]. 计算机工程,2002,28(6):35-36.

[9] Tengline C, Lee C S G. Neural network based fuzzy logical control and decision system[J]. IEEE Trans on Computer, 1991,40(12):1320-1326.

[10] Toit D, Burdick J W. Robot motion planning in dynamic, uncertain environments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012,28(1):101-115.

[11] van de V P, Flanagan C, Toal D J. Neural network control of underwater vehicles[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence,2005,18(5):533-547.

[12] 潘 泉,梁 彦,杨 峰,等. 现代目标跟踪与信息融合[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

[13] 刘 刚. 多目标跟踪算法及实现研究[D]. 西安:西北工业大学,2003.

[14] 王亚平,彭东亮,薛安克. 强机动目标跟踪自适应交互式多模型算法[J]. 计算机仿真,2008,25(4):326-329.

高超声速飞行器交互式多模型跟踪算法仿真

作者：[郝杰](#)，[任静](#)，[HAO Jie](#)，[REN Jing](#)
作者单位：[西安航空学院, 陕西 西安, 710077](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)[ISTIC](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2015(2)

引用本文格式：[郝杰](#).[任静](#).[HAO Jie](#).[REN Jing](#) [高超声速飞行器交互式多模型跟踪算法仿真](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(2)