

一种可行的临近空间高超声速目标航迹起始方法

肖松¹, 谭贤四², 王红², 李志淮¹, 李昌玺¹, 李定山³

(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装备系, 湖北武汉, 430019;
3. 黄陂士官学校, 湖北武汉, 430000)

摘要 针对传统算法在临近空间高超声速目标航迹起始中存在的问题, 提出了一种可行的多规则快速航迹起始方法。在分析临近空间高超声速目标特性的基础上, 首先通过高度约束和速度约束减少杂波干扰, 建立可能航迹, 然后利用速度约束和加速度约束建立候选航迹, 最后通过角度约束来剔除 V 字形航迹和确定真实航迹, 并进行了 Monte Carlo 仿真。结果表明: 该方法能够在杂波环境下对临近空间高超声速目标进行航迹起始, 并且正确航迹起始概率高, 虚假航迹起始概率低, 平均航迹起始时间短, 具有较好的工程应用前景。

关键词 航迹起始; 临近空间; 高超声速目标; 多规则快速航迹

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.003

中图分类号 V249 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0011-05

A Feasible Track Initiation Method for Near Space Hypersonic Target

XIAO Song¹, TAN Xian-si², WANG Hong², LI Zhi-huai¹, LI Chang-xi¹, LI Ding-shan³

(1. Postgraduate Management Battalion Institute, Air Force Early Warning Equipment, Wuhan 430019, China; 2. Land Base Early Warning Equipment Department, AFEWA, Wuhan 430019, China; 3. Huangpi Sergeant School, Wuhan 430000, China)

Abstract: Aimed at the existing problems in the traditional track initiation algorithm applied in the near space hypersonic target track initiation, a feasible multi-rules fast track initiation method is proposed. On the basis of analyzing the motion characteristic of near space hypersonic target, first the noise interference is reduced by the height constraint and speed constraint and the possible track is set up. Then, by using the velocity constraints and acceleration constraints the candidate track is established, and finally through the angle constraint V track is eliminated and the true path is determined. The Monte Carlo simulation results show that the use of the method can initiate near space hypersonic target tracks in the clutter environment, and has a high correct track initiation probability, low false track initiation probability and short average track initiation time. The method has a good prospect in engineering application.

Key words: track initiation; near space; hypersonic target; multi-rules fast track

临近空间高超声速飞行器,是指在临近空间(距离地面 20~100 km)飞行速度达到 5 Ma 以上的飞行器,具有飞行高度高、飞行速度快、突防能力强等

特点,可以完成传统航天器和航空器不能完成的作战任务,在精确远程打击、快速突防、电子压制、对地侦察监视和预警等方面极具发展潜力^[1-3],对其探测

收稿日期:2012-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271451)

作者简介:肖松(1985-),男,湖北武汉人,博士生,主要从事临近空间高超声速飞行器检测及跟踪研究。

E-mail: tracyoioi@yahoo.com.cn

及防御问题的研究迫在眉睫。

航迹起始作为多目标航迹处理的首要问题,直接影响跟踪系统的性能。常规目标航迹起始的研究已经很成熟。文献[4]提出了一种新的基于三原色“减法”颜色混合模型的联合多传感器多目标航迹起始及跟踪方法;文献[5]利用蚁群优化算法寻找最优分类规则并建立规则库,形成了一种基于蚁群规则库的纯方位目标跟踪算法;文献[6]首先将 Hough 变换法应用于输入空间观察点的转换,然后利用 Mean shift 算法解决峰值寻求问题,具有较高的检测精度;文献[7-8]在杂波干扰条件下,对传统逻辑起始算法进行了改进,提高了系统正确航迹起始概率。但是,针对临近空间高超声速目标航迹起始的研究还未见报道,鉴于此,本文从工程实践的角度出发,针对临近空间高超声速目标的特点和传统航迹起始算法存在的问题,提出了一种可行的多规则快速航迹起始方法。

1 问题描述

1.1 临近空间高超声速目标运动特性

垂直平面内飞行的临近空间高超声速飞行器主要受到重力 mg 、推力 P 、升力 L 和阻力 D , 假设某时刻飞行器的飞行高度为 h , 速度为 v , 航迹倾角为 γ , 攻角为 α , 飞行器质量为 m , 重力加速度 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 、地球半径 $R=6\ 371 \text{ km}$, 则:

1) 飞行高度: $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$, 发动机正常工作时高度限制一般为 $h_{\min}=20 \text{ km}$ 、 $h_{\max}=100 \text{ km}$, 且:

$$\frac{dh}{dt} = v \sin \gamma \quad (1)$$

2) 飞行速度: $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$, 飞行器进行高超声速飞行时, $v_{\min}=5 \text{ Ma}$, $v_{\max}=20 \text{ Ma}$, 且:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{P \cos \alpha - D}{m} - \frac{g \sin \gamma}{(R+h)^2} \quad (2)$$

3) 航向变化: 为了确保飞行器飞行方向一直朝着目标, 飞行器速度方向(航向)与其指向目标方向之间的夹角小于 90° , 且:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{P \sin \alpha + L}{mv} - \frac{g \cos \gamma}{(R+h)^2 v} + \frac{v \cos \gamma}{R+h} \quad (3)$$

4) 机动能力: 临近空间高超声速飞行器发动机的特殊要求造成可用过载限制严格, 转弯半径比常规目标的大, 设其水平面最大转弯半径为 r_{\max} , 最大过载为 n_{\max} , 则:

$$r_{\max} = \frac{v^2 \cos \gamma}{n_{\max} g} \quad (4)$$

临近空间高超声速飞行器也受到燃料和时间约束、航迹末端约束等。由于临近空间高超声速飞行

器飞行速度极快, 如果飞行器出现微小抖动或者受到外界干扰, 则会对航迹产生较大影响, 其飞行状态的快速变化给航迹起始提出了更高的要求。

1.2 传统航迹起始方法存在的问题

令 $z_j(k)$ 表示传感器 k 时刻接收到的第 j 个量测, 其中 $j=1, 2, \dots, m_k$, m_k 表示 k 时刻接收到的量测总数。记传感器在 k 时刻收到的所有量测为:

$$Z(k) = \{z_1(k), z_2(k), \dots, z_{m_k}(k)\} \quad (5)$$

航迹起始过程即是从整个量测数据集 Z_M 中提取出一个或多个源于目标的量测序列, 同时给出该目标的初始状态估计。其中目标航迹 l 对应的量测序列为 $\{Z_{\rho(l,1)}(1), Z_{\rho(l,2)}(2), \dots, Z_{\rho(l,M)}(M)\}$, $\rho(l, k)$ 表示 k 时刻与目标航迹 l 对应的量测编号。

为了能提供更多的防御时间, 越早发现临近空间高超声速目标越好, 所以航迹起始时目标距离传感器很远; 又由于其“高、快、小”的特性, 从而导致 Z_M 误差较大且杂波较多, 使航迹起始问题变得更加难以处理。现有的航迹起始算法可分为顺序处理技术和批处理技术 2 大类: 前者适用于相对无杂波环境中的航迹起始, 主要包括启发式规则方法和基于逻辑的方法^[9]; 后者适用于强杂波环境, 主要包括 Hough 变换法以及其改进方法等^[10]。启发式规则方法是一种确定性较为粗糙的方法, 基于逻辑的方法在对候选目标量测进行扩展过程中, 对位于确认区域中每一个量测 $z_j(k)$ 进行航迹的分裂, 由于目标速度极快, 导致相关波门比常规目标的大很多, 同时进入确认区域的杂波也急剧增加, 所以将占用大量的存储空间, 不利于实时计算; Hough 变换法只有经过多拍扫描以后才能够得到较好的效果, 典型的缺陷为计算量很大和起始时间太长, 不符合实际工程的需要, 而且该方法采用阈值法进行航迹检测, 阈值过低导致航迹簇拥, 阈值过高导致目标漏检。

2 多规则航迹起始方法设计

从第 1 节的分析可以看出, 临近空间高超声速飞行器有其鲜明的运动特性, 从而导致传统航迹起始方法对其失去效果, 但是, 临近空间高超声速飞行器同时受到多种约束, 并不是强机动目标, 所以, 可以用目标运动的连贯性和方向性等约束规则来完成对目标的航迹起始。

2.1 高度约束

临近空间空域不仅有利于飞行器生存和高超声速飞行, 而且有利于飞行器对空和对天进行攻击。在航迹起始时, 位于临近空间空域外的点必定是虚假点迹, 可以直接剔除, 然后再建立航迹头, 这样就

可以大大减小计算量和降低虚假航迹起始概率。

2.2 速度约束

假设临近空间高超声速目标飞行速度为 $v_{\min} = 5 Ma$ 、 $v_{\max} = 20 Ma$, 传感器采样周期为 T , k 时刻目标位置为 $[x(k), y(k)]$ 。以各航迹头为圆心, 以 $v_{\min} T$ 和 $v_{\max} T$ 为半径, 建立 $k+1$ 时刻量测的环形确认区域, 即:

$$\frac{v_{\min} \leq \sqrt{[x(k+1)-x(k)]^2 + [y(k+1)-y(k)]^2}}{t_{k+1}-t_k} \leq v_{\max} \quad (6)$$

将落入该环形区域内的点与前一点连接形成可能航迹, 同时剔除其它点迹。虽然目标的速度极快, 但是通过速度约束可以大大减少杂波干扰, 降低运算量。对于式(6), 形成环形波门时, 若考虑目标的实际战术意图, 可以进一步缩小此圆环, 或限于向某个方向的部分圆环。实践证明, 对于高威胁目标, 航迹起始漏警比虚警所带来的后果严重, 所以, 为了尽可能将所有目标航迹包含在可能航迹里, 此处的环形波门可以设计的稍大一些。

2.3 加速度约束

在获得第 3 次扫描数据时, 除了可以利用速度约束外, 还可以利用加速度约束来进一步减少杂波干扰。加速度约束的表达式为:

$$\left| \frac{\sqrt{[x(k+2)-x(k+1)]^2 + [y(k+2)-y(k+1)]^2}}{(t_{k+2}-t_{k+1})(t_{k+2}-t_k)} - \frac{\sqrt{[x(k+1)-x(k)]^2 + [y(k+1)-y(k)]^2}}{(t_{k+1}-t_k)(t_{k+2}-t_k)} \right| \leq a_{\max} \quad (7)$$

传统航迹起始算法假设目标在做匀速直线运动, 本文为了更加贴近实际情况, 假设目标在做加速运动, 临近空间高超声速飞行器最大机动过载约为 $10 g$, 再根据状态噪声和量测噪声大小来确定 a_{\max} 的取值范围。

2.4 航向约束

目标在高超声速飞行时, 由于机体受到物理强度的限制, 不能像常规目标一样进行突然悬停甚至快速反向等强机动飞行, 因此可以通过角度约束来排除 V 字形航迹和确定真实航迹。

$$\theta = \arctan \left[\frac{y(k+2)-y(k)}{x(k+2)-x(k)} \right] \quad (8)$$

式中 $[x(k+2), y(k+2)]$ 为航迹起始的最终位置; $[x(k), y(k)]$ 为航迹起始的初始位置, 工程中一般取 $\theta_{\max} = \pi/4$ 。

3 多规则航迹起始方法计算步骤

根据航迹起始过程中点迹数量的不同, 将航迹分为源生航迹(航迹头)、可能航迹、候选航迹和真实航迹, 其点迹数量分别为 1 个、2 个、3 个和 3 个。航迹起始方法流程见图 1。

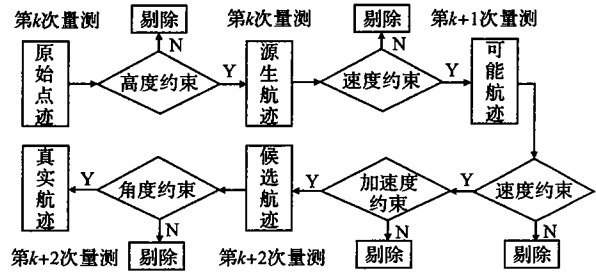


图 1 航迹起始方法流程

Fig. 1 Flow of track initiation method

如图 1 所示, 临近空间高超声速目标多规则航迹起始步骤主要有:

Step 1 将符合高度约束的初始量测建立源生航迹, 即航迹头;

Step 2 以航迹头为圆心, 利用速度约束建立环形波门, 将落入波门内的点和航迹头相连接, 建立可能航迹;

Step 3 以第二次测量的有效点迹为圆心, 利用速度约束建立环形波门, 将落入波门内的点迹与前一点相连接, 形成候选航迹; 由形成候选航迹的 3 点估计出目标的加速度, 利用加速度约束进一步精简候选航迹;

Step 4 对候选航迹进行航向约束, 剔除 V 字形航迹。剩下的航迹即可判定为真实航迹。

4 仿真分析

4.1 仿真场景设置

假设有 5 个临近空间高超声速飞行器, 在垂直平面内以不同的初速度作加速直线运动(有噪声干扰), 飞行器机动情况见表 1。

表 1 目标机动情况

Tab. 1 Target maneuver instance

目标	初始位置/km	初始速度/(m·s ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)
1	(15,80)	3 400	100
2	(35,95)	4 000	85
3	(25,85)	3 000	95
4	(55,65)	4 200	80
5	(40,55)	4 400	70

传感器测距误差 $\sigma_r = 400$ m, 测向误差 $\sigma_\theta =$

0.004 rad,量测周期 $T=1$ s。假设杂波数和杂波位置是随机且独立的,每个周期的杂波数量服从泊松分布。在 Matlab7.1 中进行 100 次 Monte Carlo 仿真,可以得到设定条件下新方法和传统 Hough 变换

法的航迹起始效果。

4.2 仿真结果分析

图 2 给出了杂波数为 400 时新方法和传统 Hough 变换法的仿真结果。

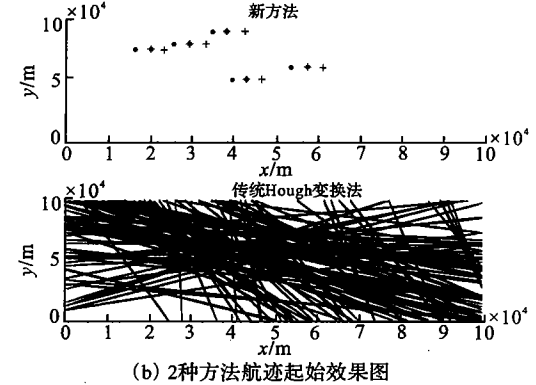
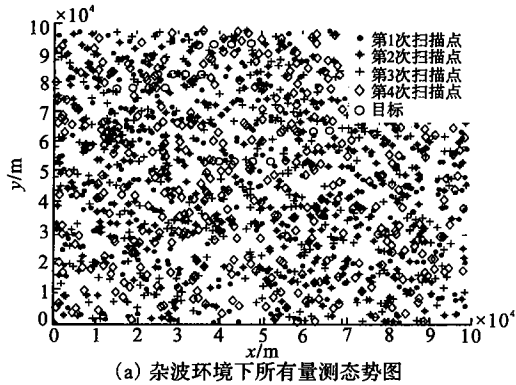


图 2 航迹起始仿真结果

Fig. 2 Simulation results of track initiation

从图 2 中可以看出,新方法只需要 3 个扫描周期就可以有效起始 5 条航迹,而传统 Hough 变换法不能做到。这主要是因为密集杂波环境中,新方法在每一个量测周期都采用针对性较强的约束规则剔除杂波,提高了正确航迹起始概率,而在传统 Hough 变换法中,量化间隔的大小和门限的选取直接影响其性能,且目前还没有关于这 2 个参数选择的一般标准,所以,其在此类特殊目标的航迹起始应

用中效果较差。从仿真的过程来看,如果杂波密度太大(杂波数大于 550),新方法也会出现虚假航迹,此时可以增加 1 个扫描周期的计算,即对第 4 个周期所得的点迹进行 Step2 和 Step3 的处理,则可以有效排除杂波干扰,提高正确航迹起始概率。采用正确航迹起始概率 P_i 、虚假航迹起始概率 P_f 以及平均航迹起始时间 T_a 。这 3 个指标来评价航迹起始方法的优劣,仿真结果见表 2 和表 3。

表 2 不同杂波环境下的统计性能(目标检测概率为 0.8)

Tab. 2 Statistical performance under different clutter environment (target detection probability is 0.8)

统计性能	每周期杂波数									
	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
$P_i/\%$	100.0	100.0	96.1	94.7	84.5	45.7	10.3	0	0	0
	100.0	100.0	100.0	94.6	93.3	88.2	88.4	85.2	60.7	45.5
$P_f/\%$	0	0	69.6	67.2	77.1	90.0	97.5	100.0	100.0	100.0
	0	0	0	21.2	33.7	43.4	58.0	65.7	57.1	65.5
T_a/s	3.2	4.7	7.1	18.7	35.4	49.8	67.6	-	-	-
	1.8	2.1	2.6	2.7	3.0	3.7	5.3	6.6	7.8	10.3

表 3 杂波数为 400 时不同检测概率下的性能统计

Tab. 3 Statistics performance under different detection probability when mixed wave number is 400

统计性能	每周期杂波数						
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$P_i/\%$	10.4	17.7	22.2	28.9	32.6	45.7	60.0
	30.2	54.7	65.3	70.4	79.0	88.2	100.0
$P_f/\%$	100.0	99.2	99.6	96.1	89.2	90.0	84.4
	80.1	73.4	60.2	54.4	49.7	43.4	0

从表 2 可以看出,当目标检测概率为 0.8 时,随着杂波数从每周期 150 个增加到 600 个,2 种方法的 P_i 值随着杂波数的增加而减小, P_f 值随之增大。当每周期的杂波数少于 250 个时,2 种方法 P_i 值均较高,当每周期杂波数增加到 400 时,传统 Hough

变换法的 P_f 值迅速增大,不能实现航迹起始。从 T_a 值来看,传统 Hough 变换法运行时间较长,随着杂波数量的增加,计算量也增加, P_i 值减小,导致 T_a 值增加,新方法在杂波数小于 350 时能够在扫描周期内完成航迹起始,但是杂波数超过 350 时, T_a

值增加较明显。

从表3可以看出,当每周期杂波数为400时,随着目标检测概率的增大,2种算法的 P_i 值均增大,当目标检测概率小于0.6时,新方法仍然有一定效果,而传统Hough变换法的 P_f 值急剧增加。

5 结语

针对临近空间高超声速飞行器航迹起始困难的问题,本文提出了一种多规则快速航迹起始方法。该方法通过高度约束、速度约束、加速度约束和航向约束,实现对临近空间高超声速目标的快速航迹起始。从正确航迹起始概率、虚假航迹起始概率以及平均航迹起始时间3个方面将本文提出的方法和传统Hough变换法进行了比较,仿真结果表明该方法可以应用在临近空间高超声速飞行器航迹起始中并能获得较好的效果,提供了一种高超声速飞行器航迹起始的思路,具有积极的现实意义和工程实践意义。但是,该方法没有考虑在强杂波干扰环境下,目标数量未知或者临近空间高超声速目标和常规目标并存的情况,这将是下一步的研究重点。

参考文献(References):

- [1] 梁晓龙,冯金富,杨啸天,等. 近空间高超声速弹箭气动数值模拟[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2009,10(6):1-5.
LIANG Xiaolong, FENG Jinfu, YANG Xiaotian, et al. Numerical simulations for aerodynamic characteristics of near space hypersonic projectile[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2009,10(6):1-5. (in Chinese)
- [2] HU Ruifeng, WU Ziniu, WU Zhe, et al. Aerodynamic map for soft and hard hypersonic level flight in near space[J]. Acta mech sin, 2009,25:571-575.
- [3] Huang Wei, Ma Lin, Wang Zhenguo. A parametric study on the aerodynamic characteristics of a hypersonic waverider vehicle[J]. Acta astronautica, 2011, 69(3-4):135-140.
- [4] Xu Benlian, Xu Huigang, Zhu Jihong, et al. Ants with three primary colors for track initiation[J]. Expert systems with applications, 2011,38(8): 9809-9820.
- [5] Zhu Jihong, Xu Benlian, Wang Zhiquan. Track initiation of bearings-only tracking based on ant navigation

concept[J]. Communications in nonlinear science and numerical simulation, 2010,15(11):3557-3567.

- [6] Zhou Lijun, Xie Weixin, Li Liangqun. Mean shift track initiation algorithm based on hough transform [C]//10th international conference on signal processing. Beijing:[s. n.], 2010:1263-1266.
- [7] 孙云辉,陈永光,吕栋雷,等. 干扰条件下 T/R-R 型双基地雷达系统的航迹起始[J]. 现代雷达, 2012, 34(1):20-24.
SUN Yunhui, CHEN Yongguang, LÜ Donglei, et al. Track initiation of T/R-R bistatic system under the condition of electronic jamming [J]. Modern radar, 2012,34(1):20-24. (in Chinese)
- [8] 刘昇,卢广山,张晓鸿,等. 密集杂波环境下逻辑起始算法研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(1):34-37.
LIU Sheng, LU Guangshan, ZHANG Xiaohong, et al. Logic Algorithm for track initiation under intensive clutters [J]. Electronics optics & control, 2012, 19(1):34-37. (in Chinese)
- [9] 张喆,樊晓光,李建勋. 基于 M/N 逻辑和一步延迟的航迹起始方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(10):234-236.
ZHANG Zhe, FAN Xiaoguang, LI Jianxun. Track initiation method based on M/N logic and one-step delaying [J]. Computer engineering, 2011, 37(10):234-236. (in Chinese)
- [10] 时银水,姬红兵,王学青,等. 基于随机 Hough 变换的航迹起始算法[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(5):651-657.
SHI Yinshui, JI Hongbing, WANG Xueqing, et al. Track initiation algorithm based on randomized Hough transform [J]. Pattern recognition and artificial intelligence, 2011, 24(5):651-657. (in Chinese)

本刊相关链接文献:

- [1]李昌玺,毕红葵,张兵,等. 一种改进的高超声速目标跟踪算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(5):50-54.
- [2]霍亮,张志峰,柏鹏,等. 一种基于遗传算法的多传感器多目标航迹关联模型[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(3):28-32.
- [3]吴丹,冯新喜. 多雷达多目标航迹起始算法研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2006, 7(1):16-19.

(编辑:徐敏)