

# 论航迹起始方法

董志荣

**摘要** 本文讨论了航迹起始的概念,综述了多种航迹起始方法,着重介绍了一种工程实用的逻辑法,最后对有关问题进行了讨论。

**关键词** 航迹<sup>2</sup>起始<sup>1</sup>方法

## 1 概述

### 1.1 航迹起始问题

航迹起始在各种航迹处理的情况都存在,单目标安静环境(无假目标)航迹起始处理简单,多目标安静环境航迹起始处理也相对简单,单目标嘈杂环境(有真、假目标)航迹起始处理较复杂,多目标嘈杂环境航迹起始处理最复杂。本文主要讨论多目标嘈杂环境航迹起始方法。这种情况下的复杂性主要是由于多目标密集环境(含真假密集目标)航迹处理自身复杂性和航迹起始的地位决定的。众所周知,对于多目标航迹处理,人们已经在分批、分区、建立各种波门、限制波门内相关量测的数目以及多种数学方法方面、多方设法减少其固有的组合爆炸所带来的计算负担,正确的航迹起始也是有力的措施之一<sup>[1]</sup>。“失之毫厘,差之千里”其重要性也就在于此。正是由于航迹起始时,目标一般在远距离,传感器探测分辨力低、测量精度差,加之真假目标的出现无真正的统计规律,所以在多目标航迹处理中,航迹起始问题成为第一个难以处理的问题。

### 1.2 航迹起始概念

在英文中用的是“Track initiation”,在中文文献中常用“航迹起始”、“航迹初始”、“跟踪起始”等。按照航迹处理的航迹起始、航迹确认(保持)、航迹撤消过程,航迹起始应指:未进入稳定跟踪(航迹保持)之前的航迹确立过程。这里既包括航迹头的选择<sup>2</sup>,又包括航迹起始航迹段及其形成的过程。

### 1.3 航迹起始的研究现状

航迹起始一直伴随着航迹处理的产生和发展。从直观法到逻辑法<sup>[2-5]</sup>,一直到多种数学方法<sup>[6]</sup>;从纯方法研究到其性能评估<sup>[8-11]</sup>;从主动传感器到被动传感器<sup>[6]</sup>;从搜索传感器检测到指控系统航迹处理<sup>[12]</sup>;从舰船、飞机到导弹目标<sup>[13]</sup>,已积累了众多参考文献。

在众多的研究著作和论文中,应用于工程的多是直观法和逻辑法,如本文第3.1节所指出的那样,凡涉及似然、后验、检测、虚警概率的方法,仅作为一种理论上与方法上的研讨,由此可以深知问题复杂程度,并可继续深入研究,但其本身对工程目前并没多少实用价值。因为那些概率分布也好、参数也好,只是作为一种问题描述的假定而已。

[注]航迹头的选择见文献[1,2]。目前仍无十分有效的方法,因为在第1次扫描中,真假目标难分,由于假目标存在,会引出假的航迹起始。为此,在工程上常设立人工速率辅助跟踪、人工起始/自动跟踪的工作方式进行补救。

## 2 航迹起始实用方法

### 2.1 直观法<sup>[1~5]</sup>

本方法利用物体运动学原理:相邻两次扫描任意两个量测,若属于同一个目标,则两量测与扫描时间之比介于目标最小速度与最大速度之间,或由此得到的加速度也要受到目标最大加速度值的约束。

设 $\bar{x}_i(i=1, \dots, N)$ 是第 $i$ 次扫描的位置量测向量,则 $N$ 次扫描的任意 $M$ 次量测,航迹起始直观法满足下列要求:

(1) 量测的或估计的速度介于目标最小速度与最大速度之间

$$v_{\min} \leq \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \leq v_{\max} \quad (1)$$

式(1),对平面来说,形成圆环波门,若考虑实际问题目标战术意图,可进一步缩小此圆环,或限于向我方的半圆环,或面向我方扇面角为 $\theta$ 的楔形,如图1。

对于空间来说,形成空心球,空心球外半径为 $v_{\max}T$ ,内半径为 $v_{\min}T$ 。根据需要,可进一步缩小此空心球,或限于面向我方的半空心球,或面向我方锥形角为 $\theta$ 的楔形体。

这种用速度约束形成的相关域,特别适合于第1次扫描得到的量测和后续扫描的自由量测<sup>[2]</sup>。

(2) 量测的或估计的加速度的绝对值小于最大加速度 $a_{\max}$ 。如果多于1个量测,则用具有最小加速度那个量测形成新航迹。

在文献[2]中,用加速度形成扩大波门,以对付第3次扫描后航迹互联中目标机动的情况。

加速度约束数学表达式为

$$\left| \frac{\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i}{t_{i+1} - t_i} - \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right| \leq a_{\max}(t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

为了减少形成假航迹可能性,直观法航迹起始也选择角度限制法实现。

考察向量 $\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}$ ,由点乘公式确定夹角 $\phi$ 。

$$\phi = \cos^{-1} \left[ \frac{(\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i) \cdot (\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1})}{|\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i| |\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}|} \right] \quad (3)$$

角度 $\phi$ 的限制为

$$|\phi| \leq \phi_0 \quad (4)$$

其中,

$$0 \leq \phi_0 \leq \pi \quad (5)$$

直观法是一种确定性(不考虑量测噪声)较为粗糙的方法。在没有真假目标先验信息

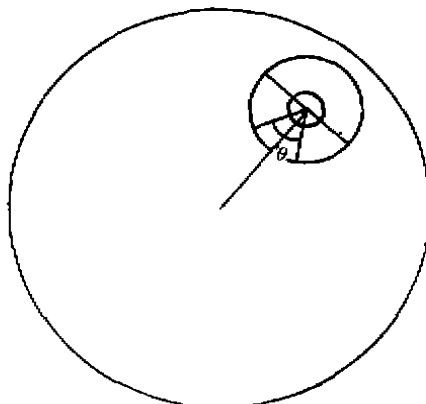


图1 速度限制图

情况下,仍是一种可以应用或参与部分应用的方法。

## 2.2 逻辑法

这是文献[2]在集合论描述法中提出的方法。这种方法对整个航迹处理过程均适用,当然也适用于航迹起始。本方法在文献[4]第9.5节(p. 252)也作了类似的描述,但它允许为在第3次扫描的量测建立的相关域中多于1个量测时航迹分叉或用概率数据互联(见文献[14]第2.5节)。文献[2]和[5]为了减少航迹起始数目不允许这样做。

下面将文献[2]的逻辑法简述如下:

(1) 以第1次扫描量测为航迹头,用速度法建立初始相关域,对落入初始相关域的第2次扫描量测,均可建立可能航迹;

(2) 对上述每个可能航迹直线外推,并建立后续相关域,它以外推点为中心,后续相关域大小由航迹外推误差协方差确定。第3次扫描量测落入后续相关域离外推点最近者给予相关;

(3) 若后续相关域没有量测,则或撤消此可能航迹,或用加速度限制的扩大相关域考察第3次扫描量测是否落在其中;

(4) 继续上述的步骤,直到形成稳定航迹时,航迹起始方算完成;

(5) 在历次扫描中,均未落入相关域参与航迹相关判别的那些量测(称自由量测)均作为新的航迹头,按(1)的方法处理。

用逻辑法确定航迹起始,何时才能形成稳定航迹呢?这个问题取决于航迹起始复杂性分析和性能的折衷。它取决于真假目标性能、密集的程度及分布、搜索传感器分辨力和量测误差等。如对飞机目标,一般3—5次扫描,对舰艇目标,可能至少需要5—8次扫描。文献[4]泛称经过5—8次扫描,只可能保留少数几条航迹。文献[3]介绍了航迹起始滑窗法的 $m/n$ 逻辑,意即在 $n$ 次连续扫描中有不少于 $m$ 次量测互联即宣告航迹起始告成。将 $m/n$ 逻辑法用于航迹起始,在文献[5]的背景分析模拟中认为用 $3/4$ 最为合适,取 $n=5$ 时改进的效果并不明显。为了确定 $m/n$ 具体数值范围,我们制作 $n \leq 5$ 的 $m/n$ 比值表,见表1。

表1  $m/n$  比值表

$m/n$ $m \backslash n$	1	2	3	4	5
1	1				
2	0.5	1			
3	0.33	0.67	1		
4	0.25	0.5	0.75	1	
5	0.2	0.4	0.6	0.8	1

为了性能与计算复杂程度的折衷,在多次扫描内,取 $1/2 < m/n < 1$ 是适宜的。因为 $m/n > 1/2$ 表示互联量测数过半,若不然,再作为可能航迹不可信赖;关于 $m/n < 1$ 情况,明显地, $m/n$ 不能大于1;若取 $m/n = 1$ ,即表示每次扫描均有量测互联,这样也过分相信环境安静。因此在 $2 \leq n \leq 5$ 时, $m/n$ 的值只有 $2/3, 3/4, 3/5, 4/5$ 可选。对于高速目标,战术上取 $n=5$ 嫌时间长。因此,在工程上,只取下述两种情况:

(1) 2/3 比值,作为快速启动。见文献[3]第 3.6 节;

(2) 3/4 比值,作为正常航迹起始。

为了正常航迹起始与航迹确认(保持)衔接,文献[2]采用增长记忆滤波的方法,并以航迹质量示性数衡量航迹能否由“可能”转入“确认”。为了提高对机动目标进行多目标航迹处理的反应能力并简化滤波外推计算,下面给出一个简便方法。

采用 4 点滑窗方法,即来一次扫描量测,丢掉最前面一批扫描量测,始终保持 4 次扫描量测。利用四次扫描已形成航迹起始的量测  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_{i-1}, y_{i-1})$ ,  $(x_{i-2}, y_{i-2})$ ,  $(x_{i-3}, y_{i-3})$ , 在等扫描周期情况下,利用最小二乘原理,可以证明下列线性外推公式成立

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \frac{1}{2}(x_{i-1} - x_{i-3}) \\ y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2}(y_{i-1} - y_{i-3}) \end{cases} \quad (6)^{[2]}$$

有意思的是外推到  $i+1$  点,不需要  $i-2$  点量测(见图 2),即  $i-2$  点的量测不论其误差多大,甚至缺漏,对外推到  $i+1$  点都没影响,因此公式(6)特别适用于多目标航迹处理 4 点滑窗外推。公式(6)又是如此的简单。

直觉法与逻辑法在文献[5]中是作为两个独立的方法介绍的。而在文献[2]中,将直觉法只用于建立初始波门,而与逻辑法连在一起使用。

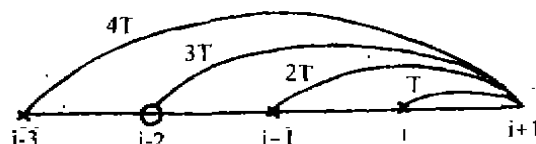


图 2 四点外推图

### 3 其他航迹起始方法及有关问题讨论

#### 3.1 其他航迹起始方法一览表(表 2)

表 2 航迹起始其它方法

序号	名称	方法	适用对象	环境	评价	参考文献
1	霍夫变换法	N 次扫描批处理	离线处理	高虚警率下匀速直线运动	有长航迹寿命	[5]
2	改进霍夫变换法	N 次扫描批处理	离线处理	高杂波环境, 不适用机动目标	长航迹寿命, 低假数据互联率, 计算时间短	[5]
3	序列比检验	“最近邻”相关法	用于航迹确定	稀疏目标环境, 独立非机动目标	对数似然比检验, 不实用	[T5]
4	贝叶斯航迹确定法	“最近邻”相关法	用于航迹确定	同上	计算后验概率, 不实用	
5	N 维分配法	“最近邻”相关法	用于航迹起始	稀疏目标环境	计算量大, 仍为组合思想, 一般用聚类方法改造	
6	模式匹配法	“最近邻”相关, 批处理	用于航迹起始	密集环境	关键在航迹模板如何获得?	[16]

[注]对空间点外推时,公式(6)只需增加  $z$  轴上的类似于  $x$ 、 $y$  轴上的公式即可。这种外推公式曾在单目标跟踪算法前作为剔点处理使用过。

在上述方法中,凡涉及似然函数、后验概率、检验概率、虚警概率者,仅作为一种方法探索,目前对工程没有实用价值。

### 3.2 有关问题讨论

#### (1) 航迹起始性能主要指标

**航迹反应时间**——对航迹起始也有一个起始成功时间,主要指从第1个量测到形成稳定航迹的时间;由于此反应时间是一个随机变数,人们常以平均扫描次数、平均假互联率等表示;

**航迹质量**——表示航迹优劣的数<sup>[1,2]</sup>。可用打分方法度量,可用航迹的位置速度误差度量,也可用目标指示精度表示,也可用平均航迹纯度(purity)<sup>[6]</sup>表示。

**计算量与计算时间**——它与反应时间概念不同。这里指的是全部程序执行一个周期的时间。

#### (2) 航迹起始扫描数的论证

航迹处理往往被人为地分为航迹起始、航迹保持(确认)和航迹撤消(终结)三个阶段。实际上三个阶段在方法上往往是一脉相承的。为了航迹的确认寄希望于有准确的航迹起始,而为了准确的航迹起始,寄希望于航迹头的正确选择。为了快速而又有一定质量航迹起始,根据理论分析和工程实践经验,对高速目标的雷达测量,航迹起始扫描周期数取为4为宜。在实际的环境中,4次扫描能否都建立起稳定航迹,需视目标数及其相对位置、检测概率、量测分辨率、虚警概率。如果4次扫描建立不起来航迹起始,有许多航迹处理方法依然可通过延伸到下一扫描周期处理,如文献[1,2]中介绍的集合论描述法。

#### (3) 被动系统的航迹起始问题

被动系统如被动测向声呐、侦察声呐、红外警戒系统、雷达侦察机等传感器,在单目标航迹处理中,曾遇到目标运动分析的难题<sup>[1]</sup>,在多目标航迹处理中更增加了航迹起始、量测分类、本艇最优机动控制等困难。此类问题航迹起始研究的文献较少,作者在文献[1,17]中,对被动测向声呐、侦察声呐的多目标航迹处理集合论描述法中,给出了一种工程方法,在原理上仍属于本文第2节介绍的直观法和逻辑法。由于被动系统固有性质,在目标匀速直线运动假定下,求解目标运动参数的必要条件是本载体必须机动,加上本载体最优机动控制问题,在当今世界上并没有解决<sup>[18]</sup>,所以被动系统多目标航迹处理(包括航迹起始)特别是密集环境下的问题,仍需作出新的努力。

#### (4) 多目标航迹处理物理模拟器设计原理

作者在七十年代研究多目标航迹处理时,曾构思过一种多目标航迹处理物理模拟器设计问题。这种设计原理同样也适用于航迹起始。兹将设计原理以距离方位系统为背景简单介绍如下:

设目标匀速直线运动,在距离方位系统中,每次量测(含真假目标)的位置,以激光准确地烧蚀在同轴连接的圆盘上,盘距适当,第1次量测盘固定于轴上,第2次量测盘在扫描周期T内准确地匀速运动后也固定在轴上,并同时当收到新量测时,以激光烧蚀在第二个盘上,第3次扫描之后的量测,分别以激光烧蚀在后续盘上。在适当远离的轴线上设一光源、远离的程度以保持光束的基本平行、光束穿越圆盘量测孔时而少产生衍射为准,或最好使其衍射区与传感器量测误差一致。光源在第1次量测盘烧蚀完量测孔时点燃,直到

物理模拟器实验完毕熄灭,原理见图3。

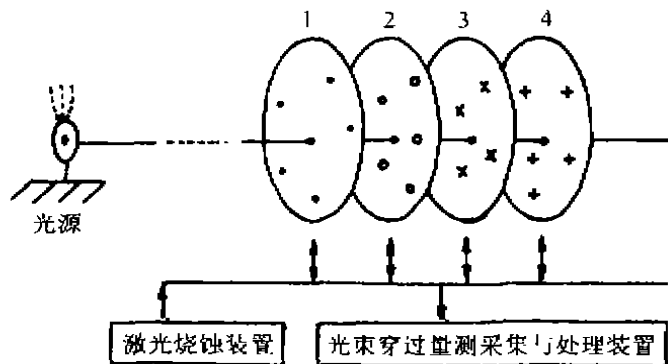


图3 物理模拟器原理图

在每次扫描后,量测已被烧蚀在圆盘上,光束穿过的量测串,经过采集和处理装置,便形成多目标各自的航迹,由此形成各自的航迹参数。

该模拟器部件及其设计参数:

- (1)光源:光强度及离第1量测圆盘的距离的选择;
- (2)轴与盘:材料、尺寸、盘与盘距离的选择,盘的匀速转动控制;
- (3)激光烧蚀装置及其在运动中的烧蚀控制;
- (4)光束穿过的量测采集与处理装置。

这种模拟器的制作,可作为一种教学用具,可以加深多目标航迹处理原理的了解,不论对学生还是继续工程教育的科技人员均会有所裨益。这种物理模拟器的设计原理,完全不同于对多目标航迹处理的数学建模后进行计算机解算,而求出目标航迹的方法。

#### 4 结束语

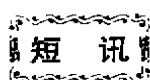
多站多目标航迹处理研究正方兴未艾,许多问题值得深入研究,如量测的分类方法、最优外推方法、航迹性能分析方法、航迹编号方法、航迹/量测融合原理以及本文的航迹起始问题等。可以说,过去的一切方法很值得以工程实践为标准检验其最终价值,催人继续努力啊!

#### 参考文献

- 1 董志荣. 舰艇指控系统的理论基础. 国防工业出版社, 1995.
- 2 董志荣. 多目标密集环境下的航迹处理问题及其集合论描述法. 火控技术, 1981(2).
- 3 Farina A and Studer F A. Radar Data Processing(volume I). Research Studies Press, 1985
- 4 Bar-shalom Y, Fortmann TE. Tracking and Data Association. Academic Press Inc, 1988.
- 5 Leung H, Hu Z, Blanchette M. Evaluation of multiple target track initiation techniques in real radar tracking environments. IEE proc. Radar, Sonar Navig., Vol. 143, No. 4 1996: 246 ~ 254
- 6 Ting P Y and Ittis R A. Multi-target Bearings-only Track Initiation Using Simulated Annealing. Processings of the 29th conference on Decision and control, Honolulu, Hawaii 1990:

pp(2) - 7

- 2289 - 2290
- 7 Pawlak R J, Beex A A. Fusion technique for multi - sensor track initiation, IEE Proc. Radar, Sonar Navig. Vol. 142, No. 5, 1995: 225 ~ 231.
  - 8 Chang K C, Mori S, Chong C Y. Performance Evaluation of Track Initiation in Dense Target environments IEEE Trans. Vol. AES - 30(1) 1994: 213 ~ 219
  - 9 Streit R L. Track Initialization Sensitivity in Clutter. Proceedings SPIE - The International Society for Optical Engineering Vol. 2561 pp. 460 ~ 471
  - 10 Bar - shalom Y, Li X R. Effectiveness of the Likelihood Function in Logic - Based Track Formation, IEEE Trans Vol. AES - 27(1), 1991: 184 ~ 187
  - 11 Mori S, Chang K C, and Chong C Y. Performance Analysis of optimal data association with applications to multiple target tracking. In Multitarget - multisensor Tracking: Applications and Advances, Vol. II. Boston, MA. Artech House. 1992. ch. 7.
  - 12 Carlson B D, Evans E D, Wilson S L. Search Radar Detection and Track With the Hough Transform. Part I: System Concept, Part II: Detection Statistics, Part III: Detection Performance with Binary Integration . IEEE Trans. Vol. AES - 30(1). 1994: 102 ~ 125.
  - 13 Yeddanapudi M, Bar - shalom Y, Pattipati K R, Somnath D. Ballistic Missile Track Initiation from Satellite Observations . IEEE Trans. Vol. AES - 31(3), 1995: 1054 ~ 1071
  - 14 Bar - shalom Y, Editor. Multitarget - Multisensor Tracking: Advanced Applications. Artech House. 1990.
  - 15 Binias G. Automatic track initiation with phased - array radar. IEEE International Radar Conference, pp. 423 ~ 428, 1975.
  - 16 Blackman S S. Multiple - target tracking with radar applications, Dedham: Artech House, Inc. 1986.
  - 17 董志荣. 多目标密集环境下的航迹处理问题及其集合论描述法(续), 火力与指挥控制, 1987(1), (3).
  - 18 董志荣. 纯方位系统本载体最优机动控制问题, 潜艇学术研究, 1998(3).
  - 19 董志荣. 航迹/量测融合的数学原理研究进展, 舰船电子工程, 1998, 待发表.



短讯

TJ-X

## 俄罗斯新式近程武器系统

C

据《Sea Power》杂志 1998 年 3 月报道, 1997 年在北马来西亚的凌加卫岛举行的国际海上和宇航展览会上, 俄罗斯展出它的新型近程武器系统 Palma。它是一种双 30mm 加特林旋转火炮。目的是取代俄罗斯海军标准近程武器系统 AK630。

Palma 基于 AO-18KD 加特林炮, 每个系统有四门炮、电子处理设备、“顶板”监视和目标指示雷达。据俄官员说, 它是 AK-630 发射率的 2 倍, 开火只需它的 1/3 时间——约 3.5 秒。