文章编号:1002-2082(2011)04-0773-06

红外凝视系统下的多规则航迹起始算法

闫宗群,李 刚,张 雏,侯永甲,陈 剑

(军械工程学院 光学与电子工程系,河北 石家庄 050003)

摘 要:针对传统航迹起始算法在红外凝视跟踪系统应用中存在的弊端,提出了一种适用于凝视跟踪系统的多规则快速航迹起始算法。该方法通过深入分析红外凝视系统中目标自身特点及其运动特性,给出了能够对低速甚至静止的大威胁概率目标和断续点迹目标进行威胁概率判断和航向方差判断的起始规则,实现了凝视系统下对大威胁概率目标和断续点迹目标航迹的快速起始。仿真结果表明该算法能够将虚假航迹起始概率控制在 10%以下,并且只需要 3 至 4 个采样周期即可准确地起始航迹。同时,实际应用表明了该算法在杂波环境下的有效性和稳健性。

关键词:红外凝视系统; 多目标跟踪; 航迹起始; 断续航迹; 威胁目标

中图分类号: TN976 **文献标志码**: A

Multi-rule track initiation algorithm in infrared staring system

YAN Zong-qun, LI Gang, ZHANG Chu, HOU Yong-jia, CHEN Jian

(Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: A fast multi-rule track initiation algorithm used in an infrared staring tracking system is proposed to overcome the deficiency of conventional track initiation algorithm. Based on the analysis of the target signatures and its kinematics in the infrared staring system, an initiation rule for determining the threat probability and course variance of low-speed or even static targets with high threat probability or targets with fragmentary plots is put forward, and fast track of these targets in the staring system is initiated. Simulation result indicates that the algorithm controls the probability of false track below 10%, and initiates tracks after only 3 or 4 sampling periods. The validity and robustness of the algorithm is verified in clutter environment.

Key words: infrared staring system; multi-target tracking; track initiation, fragmentary plots, threat target

引言

航迹起始作为多目标跟踪航迹处理的首要问题,其航迹起始的正确性是减少多目标跟踪固有的组合爆炸所带来的计算负担的有效措施。现有的纯方位目标的航迹起始算法对凝视系统下的目标航迹进行快速、有效起始的难度较大,文献[1-2]对纯方位目标跟踪问题提出的假设为红外凝视系统下的航迹起始算法的设计提供了很大的启发。本文介绍的航迹起始算法是针对凝视型红外多目标侦测跟踪系统的一种航迹起始算法,由于这种被动无源跟踪系统具有其自身的特点,决定了它对航迹起始算法的特殊要求。此方法首先利用具有航迹连贯性判断和方向判断的规则一,加强了对威胁目标航迹的快速起始;然后利用具有航向

收稿日期:2010-09-15; **修回日期**:2010-10-23

作者简介:闫宗群(1986—),男,河南获嘉人,硕士研究生,主要从事光电对抗与信息处理研究工作。
E-mail: yanzongqun@163.com

方差判断的规则二和航迹可信度判断的规则三相配合完成对断续点迹目标的航迹起始,从而在红外凝视系统中实现了密集杂波环境下对整个空域威胁目标航迹的快速起始。

1 凝视型红外多目标侦测跟踪系统的特点

在凝视型系统中,由于超大视场角和较大桶形畸变的存在,必然引起系统分辨率的减弱。同时由于红外焦平面阵列探测器自身分辨率限制,导致这种被动无源系统在具有其他系统不具有优势的同时,也不可避免地产生了一些弊端:1) 目标尺寸小于一个像素;2) 目标在像平面上的运动速度很小;3) 目标轨迹成断续点迹。

凝视系统下目标的这些新的特点导致目标在成像面上的信噪比很低,一方面会导致目标检测时出现漏检,另一方面会引入许多虚警,容易造成航迹起始中航迹分叉增多,从而降低航迹起始的效率,增大了虚假航迹起始的概率。

2 算法描述

现有的航迹起始方法主要分为适用于稀疏杂波环境下航迹起始的序贯处理技术和适用于密集杂波环境下航迹起始的批处理技术[3],其典型方法为基于逻辑的算法和基于 Hough 变换的算法。在图像处理中,以 Hough 变换为代表的批处理技术具有较顺序处理方法优越的性能,但它一般不能满足实时性要求,同时考虑到红外凝视跟踪系统的相关特点,本文采用以基于逻辑的方法为代表的序贯处理技术。一般情况下,简单目标在纯方位系统下的运动模型都具有高度的非线性[2,4],这会给航迹起始带来一定的困难,但由于被动跟踪系统高速的数据采样频率,精确的目标指示能力,使得目标方位角和俯仰角的变化可以近似被认为是线性的,且两者是解耦的[2]。需要注意的是,由于最具威胁的目标往往是那些来袭速率较大,但运动方向与系统径向夹角又较小的目标,所以航迹起始算法要对此类目标进行密切关注。本文算法根据此类目标的特点设计了基于目标运动的连贯性和方向性的判断规则一来完成对威胁概率大的目标的航迹起始。为了解决凝视跟踪系统下目标航迹断续问题给航迹起始带来的影响,本文算法采用了航向连贯性判断(规则二)和逻辑法相结合(规则三)的方法完成对断续点迹目标的航迹起始。整个算法不仅可以快速地起始目标航迹,而且可在保证较高正确起始概率的同时具有较低虚假航迹起始概率。

3 判断规则的设计

3.1 规则一

在威胁告警系统中,威胁目标的快速航迹起始问题是航迹起始算法的关键问题。本算法设置的判断规则一就是用来起始那些径向来袭或相对角速度小、威胁概率大的目标。由于这类目标在像平面上表现为某些位置不动,或者运动速度很小的目标点,所以规则一的设置是通过设置一个速度门限,将小于这个门限的轨迹作为大威胁概率目标航迹进行起始。不过在进行这个判断之前,首先要通过连贯性判断,以确认该航迹为目标航迹。连贯性判断公式[5]:

$$\Phi=\arccos\left[\frac{\langle(r_{k+1}-r_k),(r_k-r_{k-1})\rangle}{\|r_{k+1}-r_k\|\cdot\|r_k-r_{k-1}\|}\right] \quad (1)$$

式中:$\boldsymbol{r}_{k+1}$ 和 $\boldsymbol{r}_k$ 分别为第 k 个点到第 $k+1$ 点、第 $k-1$ 个点到第 k 个点的方向矢量;Φ 为 2 个方向矢量的夹角。由于目标运动的连贯性约束,必有 $\Phi\leqslant\Phi_0$。这里,$0\leqslant\Phi\leqslant\pi$ 是预先设定的阈值,对应目标在采样周期间隔内最大的角度变化。

速度门限的设置是假设目标在检测距离 D 上拥有最大运动速度 $v_{\max}$ 时,如果目标沿径向或与径向成很小的夹角 α(一般取 15°)来袭,则目标切向速度分量必然小于一定阈值,则判断公式为

$$\|(r_{k+1}-r_k)/T\|\leqslant v_t \quad (2)$$

式中 θ 为速度阈值,其值为

$$v_t=v_{\max}\cdot\sin\alpha/(D\cdot\theta) \quad (3)$$

式中 θ 为探测器单个像元所对应的空间角度。

为了满足系统的快速性要求,算法设计了 3 个周期的量测序列代入规则一进行判断。满足条件即可完成对大威胁概率目标的航迹起始,可提高系统的预警能力。

3.2 规则二

由于凝视系统分辨率低和目标尺寸小,使得目标在测量时可能丢失,这就造成了点迹序列发生断裂,形成断续点迹。为了提高系统的航迹起始概率,本文算法设计了规则二,用来对断续点迹进行起始[6]。

设(x,y)为系统红外焦平面探测器上的任意一点,某一候选航迹的点迹为(x_1,y_1),(x_2,y_2),…,(x_n,y_i),则航迹中任意一点(x_i,y_i)与候选航

迹航迹头(x_1,y_1)的航向角γ_i为

$$\gamma_i=\arctan\left[\frac{y_i-y_1}{x_i-x_1}\right] \tag{4}$$

则航向角的方差σ_c^2为

$$\sigma_\gamma^2=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\gamma_i-\bar{\gamma})^2 \tag{5}$$

式中:n为点迹的个数,其中有的点是关联上的真实的点迹,有的则是某一帧的预测点;$\bar{\gamma}$为航向角的均值。

航向角方差的约束条件:

1) 当$\sigma_\gamma^2\leqslant K_\gamma$时,认为该航迹为真实航迹,并进行起始;

2) 当$\sigma_\gamma^2>K_\gamma$时,则认为该候选航迹为噪声构成的虚假航迹,并进行删除。

K_γ为航向误差门限大小与传感器测量误差和目标飞行机动性能有关,测量精度越高,目标机动过载能力越弱,K_γ越小,反之越大。

为了满足系统实时性要求,本文设计的规则二置于规则一之后,设置了4个周期的量测序列代入规则二进行判断,则4个周期中只要有3个周期的点迹(1,2,3;1,2,4;1,3,4;2,3,4)被检测到,这个航迹即可被起始,有效地提高了系统的航迹起始概率。

3.3　规则三

为了提高航迹起始的正确概率,满足系统实时性要求,本文算法设计5个周期作为一个航迹起始的滑动窗口。规则三的设计既要作为航迹起始的最后评判标准,又要保证航迹起始的准确性。这里选择了基于逻辑的航迹起始算法中的M/N准则对航迹的可信度进行最后判断,即在N次量测中,该点迹能够被检测到M次,那么就将该点迹作为正确的航迹进行起始。为了降低虚警,这里选择的是4/5逻辑,即认为点迹存在概率为80%,该值得信赖的。

4　红外凝视系统的多规则航迹起始算法

多规则航迹起始算法针对凝视系统下目标及其运动的特性,设计了专门针对大威胁概率目标和断续点迹的航迹起始判断规则,并将逻辑判断准则中的M/N准则作为规则三对前2个规则的补充,既提高了正确航迹起始的概率,又保证了系统对实时性的要求。这里依据航迹起始过程中点迹的个数不同将航迹分为源生航迹(也称为航迹头)、可能航迹、中间航迹和候选航迹,它们中的点迹个数分别为1个、2个、3个、4个。该算法主要有以下几个步骤:

1) 将未被起始算法关联的初始量测建立为源生航迹,利用最大速度约束条件建立相关区域(即以源生航迹点为中心,以目标运动的最大速度为半径确定的区域),确认下一帧量测建立可能航迹;

2) 对可能航迹进行直线外推,以外推点为中心,以外推误差方差为半径形成下一帧相应于该航迹的量测确认区域,对应帧量测落入相关域的,利用规则一进行判断,满足则判定为真实航迹,送给跟踪单元,否则升为中间航迹等待下一帧的确定。没有量测落入相关域的可能航迹则判断为虚警,剔除;

3) 对中间航迹进行最小二乘外推,利用外推误差方差构建下一帧的相应于该航迹的量测确认区域。对落入相关域内的量测,根据规则二进行判断,满足则判定为真实航迹,送给跟踪单元,否则升为候选航迹等待下一帧的确定。没有量测落入相关域的量测,利用预测位置进行更新,并记录其丢失次数,同时升为候选航迹,等待下一帧的确定;

4) 对候选航迹进行最小二乘外推,并确立相关区域。对有量测落入其中的候选航迹进行规则三判断,对没有量测落入相关域的候选航迹进行丢失次数增加1以后,利用规则三判断。满足逻辑,即判定为真实航迹,否则,作为虚假航迹,剔除。算法流程图见图1。

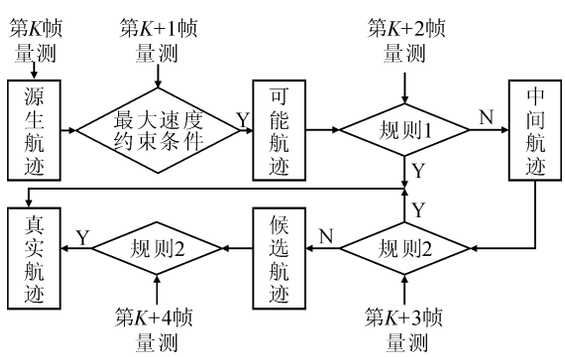

图1　航迹起始算法流程

Fig. 1　Flow of track initiation algorithm

5　仿真试验

为了能够对仿真效果进行准确、合理的评价,基于Monte-Carlo迭代法进行N次仿真,分别采用了虚假航迹起始概率、目标的正确起始概率及

平均起始时间这 3 个评价指标来评价航迹起始方法的优劣。

航迹起始方法优劣的评价指标定义如下[7]:

1) 虚假航迹起始概率 F

$$F=\sum_{i=1}^{N} f_i / \sum_{i=1}^{N} n_i \tag{6}$$

式中:N 为 Monte-Carlo 仿真试验的次数;f_i 为第 i 次仿真试验中虚假航迹的个数;n_i 为第 i 次仿真试验中起始航迹的个数。

2) 目标 j 的正确起始概率 R_j

$$R_j=\sum_{i=1}^{N} l_{ij} / N \tag{7}$$

式中 L_{ij} 代表第 i 次 Monte-Carlo 仿真试验中目标 j 航迹是否正确起始,正确起始时为 1,没有正确起始时为 0。

3) 目标 j 平均航迹起始时间 T_j

$$T_j=\sum_{i=1}^{N} t_{ij} / \sum_{i=1}^{N} l_{ij} \tag{8}$$

式中 t_{ij} 为第 i 次 Monte-Carlo 仿真中目标 j 航迹起始所需要的周期数(帧数)。

实验分析的硬件条件为主频 2.60 GHz 的 CPU,内存为 1 GHz 的 PC 机。仿真利用的软件为 Windows PC 平台上的 Matlab 语言。假设有 5 个目标,分别在笛卡尔坐标系下以不同的速度,沿不同的方向作具有加速度扰动的匀速直线运动。假定系统在距离 10 km 时进行可靠的航迹起始跟踪,最大飞行速度为 2 000 m/s,最大加速度为 100 m/s^2;由于本文处理的数据对象是红外探测器输出的数字图像,所以需要将笛卡尔坐标系下的目标运动轨迹转换到像平面上。目标在笛卡尔坐标系下的初始状态在像平面内的初始状态如表 1 所示。测量误差标准差为 0.5 个像素,为了增加航迹起始的计算复杂程度,设定杂波(杂波个数服从泊松分布,在像平面内服从均匀分布)的密度为 $\lambda=5.2\times10^{-5}$/mrad^2。算法中的规则参数 $\Phi_0=\pi/3$,$v_t=0.25$。基于 200 次 Monte-Carlo 仿真,根据指标定义,可以得到设定条件下各目标的正确起始概率、平均航迹起始时间和系统的虚警航迹起始概率与杂波密度之间的对应关系。

图 2 和图 3 分别为等待起始的 5 个目标的航迹图和连续 5 个扫描周期的所有量测的态势图。5 个目标分别对应了像面上 5 种不同运动速度的目标。从表 1 中可以看出,目标 3 速度最小,为静止目标,对应于实际情况下沿径向来袭或远去目标;目标 1、2 速度较小,对应于实际情况中径向速度较大,即威胁较大的目标;目标 4、5 速度最大,则对应实际情况中的切向飞行的目标。

表 1　像平面上目标初始状态

Table 1　Initial states of targets on image plane

项目	目标				
	1	2	3	4	5
速度/(像素/帧)	0.25	0.5	0	1.5	1
X 坐标/像素	100	150	55	195	80
Y 坐标/像素	100	150	55	200	150

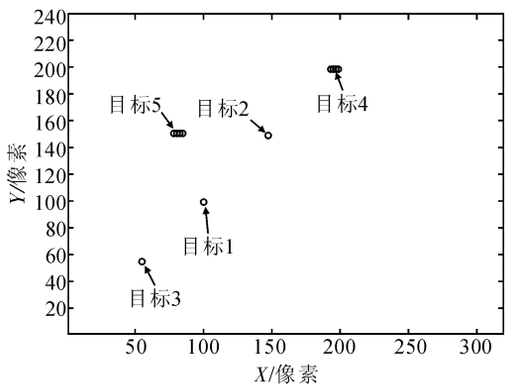

图 2　待起始的 5 个目标航迹

Fig. 2　Five targets traces to be initiated

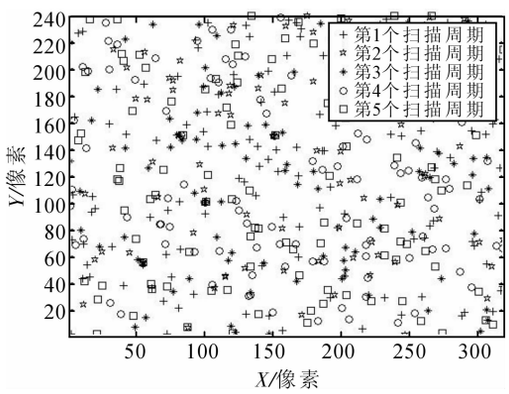

图 3　杂波环境下所有量测的态势图

Fig. 3　Situation map in clutter environment

图 4 给出在相同的条件下,逻辑航迹起始算法、**Hough** 变换航迹起始算法和本文的多规则航迹起始算法的起始效果图。由图 4 中 3 种不同航迹起始算法的航迹起始效果图可知,这些算法在密集杂波环境下都会出现虚警,只是虚警率不同而已。在进行对比的 3 种算法中,**Hough** 变换算法的起始效果较差,无法用以工程应用,这主要是因为红外鱼眼凝视系统中目标呈现的静止或慢速特性,使得其在像面上的轨迹只有一个固定点或者一条很短的曲线,供 **Hough** 变换利用的数据太少造成的;逻辑起始算法的始效果次之,这是因为逻辑法设置了置信度来对杂波进行了抑制,降低了虚警率;本文算法的航迹起始效果相对其他两种

算法来说较好。

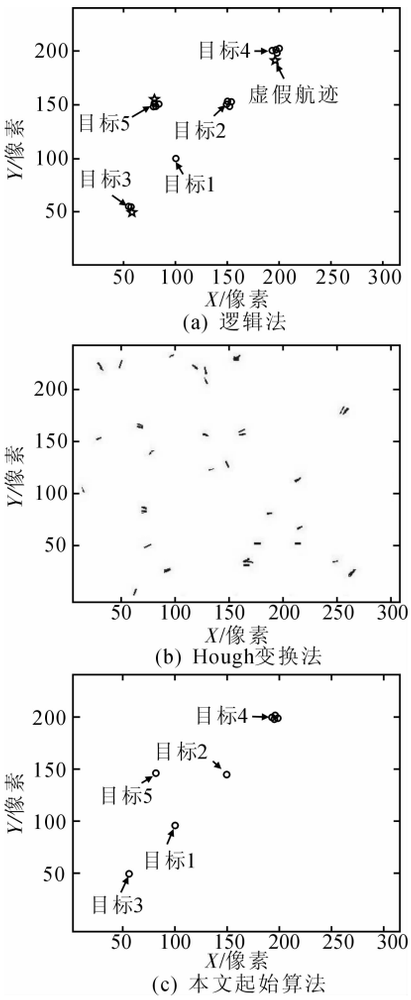

图 4　3 种算法的航迹起始效果图

Fig. 4　Track initiation results of the three algorithms

下面主要对逻辑法和本文的多规则起始算法的各项指标进行比较分析。根据指标定义,可以得到设定条件下各目标的正确起始概率、平均航迹起始时间(见表 2)和系统的虚警航迹起始概率、平均航迹起始时间与杂波密度之间的对应关系(见图 5)。

表 2　各目标的正确起始概率 R_j 和平均航迹起始时间 T_j

Tab 2　Correct track initiation probability R_j and average track initiation time T_j

	目标	1	2	3	4	5
本文算法	R_j/%	1	1	1	1	1
	T_j/帧	3.675 0	4.010 0	3.025 0	4	4
逻辑法	R_j/%	1	1	1	1	1
	T_j/帧	5	5	5	5	5

从表 2 可知,对于相同条件下的低速目标,逻辑法和本文算法都能达到很好的起始效果,但本文算法对不同速度目标的起始时间不同,而逻辑法在起始过程中,一旦门限设定,则必须达到一定的周期数(帧数)才能进行判断、起始,所以花费的时间较长。图 6 给出了逻辑法与本文算法在不同杂波密度下的虚警率曲线和平均起始时间曲线。从中可以看出,本文算法的虚警率比逻辑法的要低得多,但都随着杂波密度的增大而增大;平均起始时间变化曲线在杂波密度较小时相差不是很大,但是随着杂波密度的增大,其差值也逐渐变大。

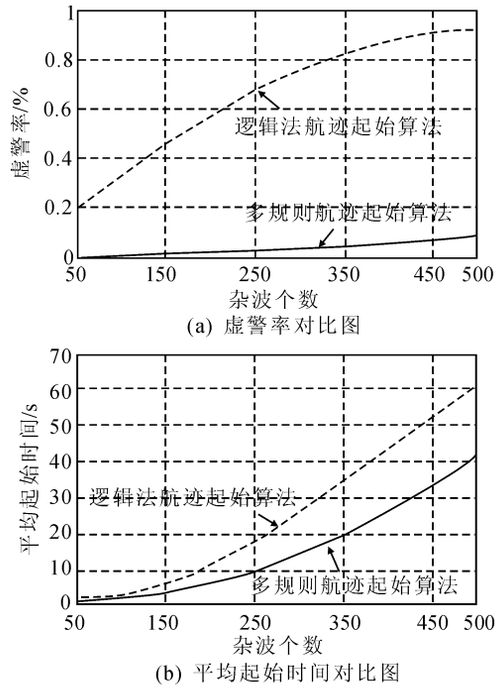

图 5　逻辑起始算法和多规则起始算法性能的比较

Fig. 5　Performance comparison between logic initation algorithm and this algorithm

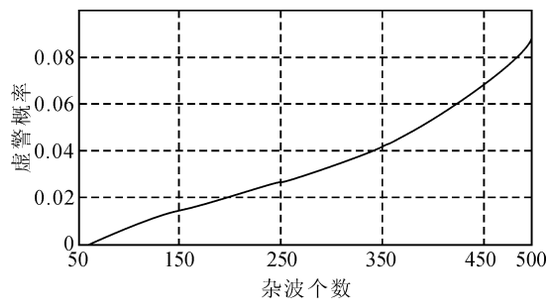

图 6　本文起始算法在不同杂波个数下的虚假航迹起始概率

Fig. 6　False track probabilities with varied clutter densities

从表 2 还可知,设定运动方向与观测径向夹角较小的大威胁概率目标(目标 1 和目标 3)一般在 3 个采样周期内就能起始起来;那些断续点迹在规

则二和规则三的判断下一般都能够在前 4 个采样周期内建立航迹,通过 5 个周期的 3 个规则的依次判断,目标的正确起始概率较高,起始时间较短,算法快速的航迹起始能力得到了较好的验证。同时,通过图 6 可知,在不同的杂波密度下,虚假航迹的起始概率 F 都在一定的范围内变化,即使在杂波密度较大时,虚假航迹起始概率也没有发生急剧增加的现象,仍保持在一定的范围内,这证明了该算法的杂波适应性。

6 结论

本文提出了一种用于红外凝视系统下多目标跟踪的多规则航迹起始算法。仿真结果表明:该算法很好地解决了凝视系统下的航迹起始问题。通过设定大威胁概率目标航迹起始规则(规则 1)和断续点迹目标航迹起始规则(规则 2),提高了算法的航迹起始能力,使各个目标的正确航迹起始概率得到了显著的提高,而且能在最短的时间内快速起始航迹,这一点对于红外凝视告警系统来说是至关重要的。同时,本文算法通过设定逻辑起始规则(规则 3),在一定程度上限定了虚假航迹的起始概率,使其始终保持在一个相对较小的范围内,并没有出现猛增现象,验证了算法的适应性。这种算法已在中波红外鱼眼系统中得到了应用,从实验效果来看,此方法是行之有效的。

参考文献:

[1] 陈辉,徐林海,李晨,等.被动传感器系统的快速航迹起始算法[J].光电工程,2008,35(9):17-21.
CHEN Hui, XU Lin-hai, LI Chen, et al. Fast track initiation approach for passive sensor system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(9): 17-21. (in Chinese with an English abstract)

[2] 陈辉,李晨,连峰.纯方位二维目标跟踪的航迹起始算法[J].航空学报,2009,30(4):692-697.
CHEN Hui, LI Chen, LIAN Feng. Track Initiation Algorithm for two-dimensional target tracking based on bearing-only measurements[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2009, 30(4): 692-697. (in Chinese with an English abstract)

[3] 朱红艳,韩崇昭,韩红.航迹起始算法研究[J].航空学报,2004,25(3):284-288.
ZHU Hong-yan, HAN Chong-zhao, HAN Hong. Study on approaches for track initiation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(3): 284-288. (in Chinese with an English abstract)

[4] 秦中原,徐晖,安玮.一种双被动传感器多目标航迹起始算法[J].电子对抗,2008(6):32-35.
QIN Zhong-yuan, XU Hui, AN We. An algorithm of track initiation for multiple targets tracking by a couple of passive sensors[J]. Electronic Warfare, 2008(6): 32-35. (in Chinese with an English abstract)

[5] 孟藏珍,闫抒升,王晓军.密集杂波环境下的多目标航迹起始算法研究[J].舰船电子对抗,2009,32(1):72-76.
MENG Cang-zhen, YAN Shu-sheng, WANG Xiao-jun. Research into the multi-target track initiation algorithm in the dense clutter circumstanc[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(1): 72-76. (in Chinese with an English abstract)

[6] 时银水,姬红兵,烫金平.对断续点迹的速度模糊聚类航迹起始研究[J].仪器仪表学报,2009,30(10):2118-2122.
SHI Yin-shui, JI Hong-bing, TANG Jin-ping. Study on track initiation from fragmentary plots with velocity fuzzy clustering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2118-2122. (in Chinese with an English abstract)

[7] 罗鹏飞,张文明.一种多目标跟踪航迹起始新算法及其性能评估[J].国防科技大学学报,1999,21(6):51-55.
LUO Peng-fei, ZHANG Wen-ming. A new algorithm of track inition for multiple target tracking and performance evaluation[J]. Journal of National University of Defense Technolngy, 1999, 21(6): 51-55. (in Chinese with an English abstract)

[8] LEUNG H, HU Z, BLANCHETTE M. Evaluation of multiple target track initiation techniques in real radar tracking environments[J]. Sonar Naving, 1996, 143(4): 246-254.

[9] 朱自谦.一种通用航迹起始模型[J].航空学报,2009,30(3):497-504.
ZHU Zi-qian. A universal track initiation model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 497-504. (in Chinese with an English abstract)

[10] MUSICKI D, EVANS R. Clutter map information for data association and track initialization [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 387-398.