

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0340

## 基于量测位置分布统计的轨迹终结方法

李冬冬<sup>1,2</sup>, 张 瑶<sup>1</sup>, 林 扬<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 针对特殊的水下目标跟踪环境(强杂波干扰), 提出一种高效的目标轨迹终结方法: 基于量测位置分布统计的轨迹终结方法. 目标消失前后, 目标轨迹的一些关键信息统计特征发生显著变化, 如量测位置分布. 基于此原理, 依据量测位置分布的变化情况能有效区分虚假轨迹与真实目标轨迹, 进而确定目标是否消失. 基于量测位置分布统计的轨迹终结方法适用于高密度杂波环境. 仿真与分析表明此轨迹终结方法提高了虚假轨迹的删除概率, 减小了目标轨迹的误删除概率, 因而增强了水下目标跟踪性能.

**关键词:** 目标跟踪; 轨迹终结; 杂波环境; 特征分析; 虚假轨迹

**中图分类号:** TP271

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0446(2017)-03-0340-07

### A Track Termination Method Based on Position Measurement Distribution Statistics

LI Dongdong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>, LIN Yang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the harsh underwater target tracking environment (heavy clutter), an effective target track termination method is presented, named the track termination method based on position measurement distribution statistics. When the target disappears, some key parameters of the target track vary remarkably, such as the position measurement distribution. Based on this, false tracks and true target tracks can be distinguished according to the variation of position measurement distribution statistics, to judge whether the true target disappears or not. The presented method is suitable for the heavy clutter environment. The simulation and analyses indicate that the proposed track termination method can increase the probability of deleting false tracks, decrease the probability of deleting true target, and thus improve the performance of underwater target tracking.

**Keywords:** target tracking; track termination; clutter environment; characteristic analysis; false track

## 1 引言 (Introduction)

现如今, 目标跟踪遍及生产生活的各个方面, 如民用领域中空中交通管制与视频监控系統, 军用领域中运动目标的预警与火力控制等<sup>[1-2]</sup>. 尽管目标跟踪理论与技术得以迅速发展, 但就水下特殊环境而言, 目标跟踪仍有许多关键且迫切的问题尚未解决. 轨迹终结便是其中之一.

在目标跟踪过程中, 轨迹终结作为目标轨迹管理的一部分, 其目的是通过适当的方法尽快删除无效轨迹或虚假轨迹, 进而减小其对决策的干扰并降低计算机的运算负担<sup>[3]</sup>.

在水下目标跟踪尤其是浅水环境的目标跟踪过程中, 由于较大的杂波密度及量测误差, 目标轨迹的正确起始与终结都具有一定的难度. 当杂波密度

比较高的时候, 杂波不可避免地会参与目标轨迹的更新. 如果目标消失, 但目标轨迹并没有被立即删除, 杂波可能持续地更新该轨迹, 这会延迟目标轨迹的删除(此时此轨迹变成虚假轨迹); 此外杂波本身也能形成虚假轨迹. 现阶段在水下对目标进行远距离探测可使用的传感器只有声呐. 采用声呐对水下目标远距离探测, 可获得的相对可靠的信息只有位置信息; 而如目标强度、径向速度以及目标大小等信息, 并不可靠或无法获取.

由于水下环境的特殊性, 传统的轨迹终结方法无法直接应用于水下目标跟踪环境. 如基于目标强度信息的轨迹终结方法需获得目标较准确的强度信息<sup>[4]</sup>, 而声呐无法获得水下远距离目标较准确的强度信息, 因此无法应用于水下环境. 再如  $M/N$  轨

基金项目: 中国科学院科技创新重点部署项目 (KGFZD-125-014).

通信作者: 李冬冬, lidongdong@sia.cn 收稿/录用/修回: 2016-12-07/2017-04-18/2017-05-11

迹终结方法<sup>[3]</sup>, 在水下高密度杂波环境中, 其误删除概率较高, 无法直接应用于水下杂波环境. 再如多传感器信息融合轨迹终结方法<sup>[5]</sup>, 采用多个不同类型的传感器对目标进行有效探测, 然而在水下环境中, 可使用的传感器只有声呐, 而且传感器之间的数据也无法及时共享, 因此多传感器信息融合轨迹终结方法也不适用于水下环境.

针对水下特殊环境以及传统轨迹终结方法的局限性, 本文提出一种高效的轨迹终结方法: 基于量测位置分布统计的轨迹终结方法. 该方法利用目标消失前后, 一些关键信息统计特征(如量测位置分布)会发生显著变化的特点, 来区分虚假轨迹与真实目标轨迹, 进而确定目标是否消失. 仿真与分析表明, 本文所提出的轨迹终结方法具备提取量测位置分布统计特征的能力, 能有效地避免杂波的干扰, 适应高杂波密度环境, 对真实存在的目标轨迹有较低的误删概率(the probability of deleting true target,  $P_{dT}$ ), 对虚假轨迹有较高的删除概率(the probability of deleting false alarm,  $P_{dF}$ ), 能够在较短时间内删除虚假轨迹.

## 2 杂波分布特征与目标量测特征 (Characteristics of clutter distribution and target measurement)

虚假轨迹和真实目标轨迹的量测源属性是不同的, 因此其量测分布的统计特征也存在差异. 为此, 首先需阐述虚假轨迹(杂波)与真实目标轨迹的量测分布特征.

### 2.1 杂波量测分布特征

杂波密度反映目标跟踪背景环境的统计特征<sup>[6]</sup>. 杂波密度  $\lambda$  定义为传感器有效观测区域  $A$  内杂波的平均个数  $\bar{m}$ , 即

$$\lambda = \frac{\bar{m}}{A} \quad (1)$$

通常来讲, 杂波个数与位置分布均是随机变量, 且仅仅取决于并反映当前环境统计特征<sup>[7]</sup>. 声呐系统的杂波个数可以认为服从泊松分布, 即

$$p_{\bar{m}}(n) = \frac{\bar{m}^n}{n!} e^{-\bar{m}} \quad (2)$$

其中  $p_{\bar{m}}(\cdot)$  是泊松函数. 杂波的位置量测  $(x_i, y_i)$  在有效观测区域内服从均匀分布.

### 2.2 目标轨迹量测分布特征

如图 1 所示, 在目标消失之前, 量测 1、2 和 3 位于有效预测区域内, 其中量测 2 是源于目标的

量测, 量测 1 和 3 是杂波. 目标消失之前, 轨迹预测区域的量测包括源于目标的量测和杂波. 当目标消失之后, 预测区域内不再包含量测 2, 那么其轨迹预测区域内的量测统计特征仅仅是杂波的统计特征. 由此可得在目标消失前后, 目标轨迹的预测区域内量测的统计特征发生显著变化.

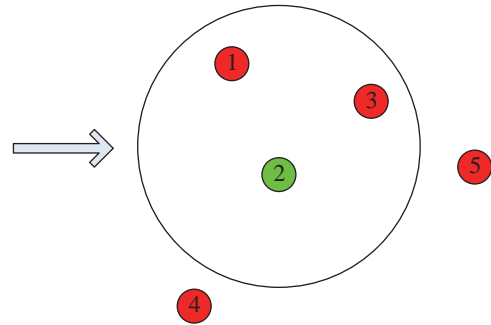


图 1 目标预测区域量测分布示意图

Fig.1 The distribution of measurements in the target prediction area

对于一个处于稳定跟踪过程的真实目标而言, 其状态协方差矩阵的波动较小, 可以认为基本保持不变, 此值可通过求解离散黎卡蒂方程求得<sup>[8]</sup>.

卡尔曼滤波器中<sup>[9]</sup>, 状态协方差矩阵的一步预测为

$$P_{k/k-1} = F \cdot P_{k-1} \cdot F^T + Q \quad (3)$$

其中  $P_{k/k-1}$  是协方差矩阵的一步预测值,  $F$  是状态转移矩阵,  $P_{k-1}$  是目标在  $k-1$  时刻的状态协方差矩阵,  $Q$  为过程噪声协方差矩阵. 滤波增益矩阵为

$$K_k = P_{k/k-1} \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{k/k-1} \cdot H^T + R)^{-1} \quad (4)$$

其中  $H$  为量测矩阵,  $R$  为量测噪声协方差矩阵. 估计状态协方差矩阵为

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_{k/k-1} \quad (5)$$

其中  $I$  为单位阵. 依据式 (3) ~ (5) 可得一步状态协方差更新方程为

$$P_k = F \cdot P_{k-1} \cdot F^T + Q - (F \cdot P_{k-1} \cdot F^T \cdot H^T + Q \cdot H^T) \cdot (H \cdot F \cdot P_{k-1} \cdot F^T \cdot H^T + H \cdot Q \cdot H^T + R)^{-1} \cdot (F \cdot P_{k-1} \cdot F^T \cdot H^T + Q \cdot H^T)^T \quad (6)$$

当滤波器稳定时, 有  $P_k = P_{k-1}$ , 则式 (6) 是一个离散黎卡蒂方程, 求解可得状态协方差矩阵的稳定值. 由此可得当目标处于稳定跟踪时, 目标的状态协方差矩阵仅与目标的量测周期、过程噪声以及量测协方差矩阵有关.

此外当目标状态稳定时, 其新息协方差矩阵也处于稳定状态, 其为

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{k/k-1} \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \quad (7)$$

其中  $\mathbf{S}_k$  为第  $k$  时刻的新息协方差矩阵. 当滤波器稳定时, 状态协方差矩阵与量测协方差矩阵满足<sup>[8]</sup>:

$$\|\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{k/k-1} \cdot \mathbf{H}^T\|_2 \leq \|\mathbf{R}\|_2 \quad (8)$$

即滤波之后, 目标的位置精度高于量测精度. 为了简化处理, 当滤波器稳定时, 可令  $\mathbf{S}_k = 2\mathbf{R}$ .

如图 1 所示, 在滤波过程中, 往往选择一定的门限 (对应于有效预测区域), 落入门限的量测才参与滤波器更新, 则预测门限<sup>[10]</sup>

$$(\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_k)^T \cdot \mathbf{S}_k^{-1} \cdot (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_k) \leq \gamma_1^2 \quad (9)$$

$$V_k = -2 \ln(1 - p_g) \pi \sqrt{|\mathbf{S}_k|} \quad (10)$$

$\gamma_1$  则对应于预测区域的门限,  $V_k$  是预测区域对应的面积,  $\gamma_1$  可依下式来确定:

$$\gamma_1 = \sqrt{-2 \ln(1 - p_g)} \quad (11)$$

$p_g$  是  $\gamma_1$  对应的区域包含预测量测的概率 (波门概率). 门限  $\gamma_1$  所确定的区域, 以  $p_g$  的概率包含预测量测, 即假如  $p_g$  值为 0.9 而且目标被检测到, 那么下一时刻目标的量测以 0.9 的概率落入到由式 (9) 所确定的区域. 即  $p_g$  赋予预测区域的置信度.

杂波量测反映虚假轨迹的分布特征, 目标轨迹量测反映真实目标轨迹的分布特征. 这为基于量测位置分布统计的轨迹终结方法提供理论依据: 通过选定合理的统计区域, 统计量测分布特征, 其可反映不同的量测源属性, 即此轨迹是虚假轨迹还是真实目标轨迹.

### 3 基于量测位置分布统计的轨迹终结方法 (A track termination method based on measurement position distribution statistics)

本文所提出的基于量测位置分布统计的轨迹终结方法分为 3 步: 1) 依据目标消失前后对应的量测分布特征变化, 以及目标轨迹与虚假轨迹之间的量测分布特征差异, 选择合理的统计区域; 构建合适的统计量. 2) 统计量测分布特征, 进而判断该轨迹是虚假轨迹还是目标轨迹. 3) 如果是虚假轨迹, 则删除; 如果是目标轨迹, 则保留.

#### 3.1 选择统计区域

统计区域的选择至关重要. 杂波与目标量测在统计区域内的分布应该有显著不同, 如此才便于选择统计量, 也易于区分虚假轨迹和真实目标轨迹.

将目标轨迹的预测区域作为统计区域, 并对其合理划分. 将预测量测区域依据概率划分为面积相等的若干个区域, 本文选择划分为 3 个, 加上预测区域以外的部分, 总共为 4 个区域, 如图 2 所示.

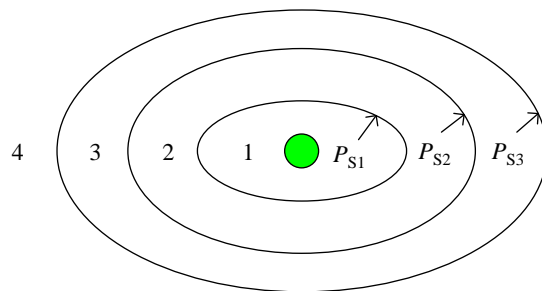


图 2 预测区域的等面积划分示意图: 绿色点为预测位置  
Fig.2 The equal-area partition of the prediction area: the green point is the prediction position

对于  $P_{S1}$  概率椭圆, 无论量测信息协方差矩阵如何变化, 其目标量测落入区域 1 的概率始终是  $P_{S1}$ , 同理对于区域 2 和 3, 有相同结论. 将式 (7) 代入式 (10), 则可得 3 个区域面积:

$$S_1 = S_2 = S_3 = -\frac{2 \ln(1 - p_g) \pi \sigma_{S_{\max}} \sigma_{S_{\min}}}{3} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^j S_i = -2 \ln(1 - \sum_{i=1}^j P_{S_i}) \pi \sigma_{S_{\max}} \sigma_{S_{\min}}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (13)$$

依据式 (12) 和 (13), 可计算 3 个区域对应的概率, 并且满足:

$$P_{S1} > P_{S2} > P_{S3} \quad (14)$$

其中  $\sigma_{S_{\max}}$  和  $\sigma_{S_{\min}}$  是新息协方差矩阵的长轴与短轴.

对于以上划分方法, 如果此轨迹是真实目标轨迹, 则落入有效预测区域内的量测既包含目标量测也包含杂波, 此时量测统计特征反映的是杂波和目标量测的统计特征之和, 构建合理的统计量可区分其是虚假轨迹还是非虚假轨迹 (非虚假轨迹往往视作真实目标轨迹). 其次, 图 2 划分多个子区域, 构建合理的统计量可区分子区域内的差异, 统计子区域内的量测分布统计信息可获得更多有价值的信息, 进一步提高轨迹终结的正确率. 单独建立区域 4 是为了统计杂波分布特征, 因为区域 4 属于门限之外, 区域 4 内的所有量测视为是杂波, 则依据式

(1) 可统计杂波密度  $\lambda$ , 而且区域 4 可与其他 3 个子区域对比, 进一步提高轨迹终结的正确率.

### 3.2 构建统计量

构建合理的统计量, 此统计量需反映量测源自杂波或目标. 新轨迹终结方法中所涉及的构建统计量方法则与统计区域的选择有关.

如果一条轨迹是目标轨迹, 则在轨迹的每个预测区域内落入量测的平均个数为

$$N_j = P_{S_j} + \lambda S_j, \quad j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

如果是虚假轨迹, 则

$$N_j = \lambda S_j, \quad j = 1, 2, 3 \quad (16)$$

从式 (15) 和 (16) 可知, 目标轨迹与虚假轨迹落入预测区域内的平均量测个数  $N_j$  有差异. 因此, 新轨迹终结方法将  $N_j$  作为统计量.

选择  $N_j$  作为统计量的优点在于便于观察统计量是否发生了显著变化. 如果统计量发生了显著变化, 从目标的统计特征变化为杂波的统计特征, 那么预示着目标已经消失, 轨迹应删除. 当其是目标轨迹时, 式 (15) 指明区域 1、2 和 3 对应的平均量测个数是目标量测落入的平均个数与杂波落入的平均个数之和; 如果是虚假轨迹, 则区域 1、2 和 3 的统计结果与区域 4 相同, 各自预测区域内量测平均个数仅仅是杂波落入的平均个数.

### 3.3 确定帧数

在选择了合理的统计区域和统计量之后, 则需确定统计所需帧数. 如果帧数较少, 则  $N_j$  波动较大, 误判概率较大, 如果帧数较多, 则实时性不好.

假设选取  $n$  帧量测信息对  $N_j$  进行统计, 如果是目标轨迹, 则区域  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 的统计信息为

$$E(N_j) = P_{S_j} + \lambda S_j \quad (17)$$

$$D(N_j) = \frac{P_{S_j}(1 - P_{S_j}) + \lambda S_j}{n} \quad (18)$$

如果是虚假轨迹, 则

$$E(N_j) = \lambda S_j \quad (19)$$

$$D(N_j) = \frac{\lambda S_j}{n} \quad (20)$$

帧数  $n$  的选择依据是使 3 个区域的分布重合概率不大于 0.05 (确保 95% 的正确判断率). 如图 3 所示, 假设是目标轨迹, 黑色区域是区域 1 的统计分布, 红色区域是区域 2 的统计分布, 绿色区域是区域 3 的统计分布, 蓝色区域是 3 个区域的杂波统

计分布 (即区域 4 的统计分布). 当轨迹处于稳定跟踪状态和杂波密度保持不变时, 唯一引起图 3 中图形变化的因素是  $n$  值, 当  $n$  值越大时, 图 3 中每个区域的中心线不发生变化, 但是图形会变窄; 当  $n$  值变小时, 图形变宽. 当  $n$  值选择比较小 (不合理) 时, 如图 4 所示, 区域会有重叠, 则误判概率会明显上升 ( $P_{DT}$  变大).

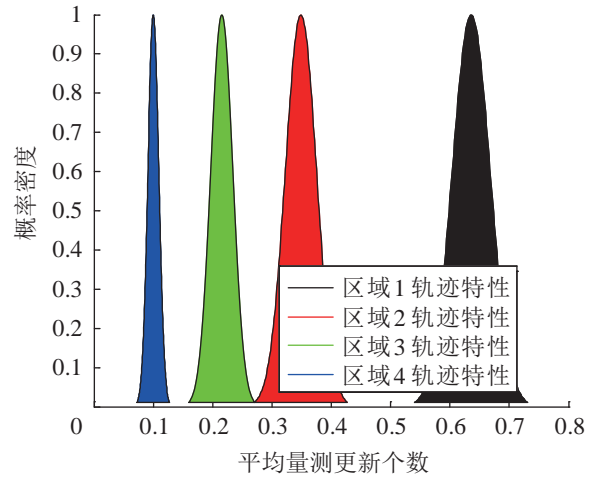


图 3 不同预测区域的量测统计特征: 当  $n$  值较大时, 区域统计分布彼此不重叠, 轨迹终结误判的概率很小

Fig.3 The measurement statistic characteristics of different prediction areas: if  $n$  is relatively large, the statistic distributions of different areas don't overlap, and the wrong judgment probability of track termination is relatively small

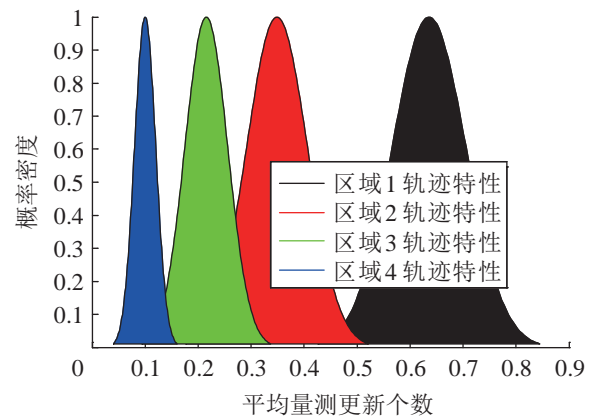


图 4 不同预测区域的量测统计特征: 当  $n$  值较小时, 区域统计分布彼此有重叠, 轨迹终结误判的概率比较大

Fig.4 The measurement statistic characteristics of different prediction areas: if  $n$  is relatively small, the statistic distributions of different areas overlap, and the wrong judgment probability of track termination is relatively large

区域 4 有重要的作用, 作为对比和参考. 由于区域 4 内都是杂波, 那么区域 4 统计的信息始终是杂波分布信息, 在相对很长的时间内是不会变化的, 始终满足式 (19) 和 (20). 当区域 1、2 和 3 的分



布特征明显与区域4不同,而且统计的分布特征满足式(17)和(18)时,则认为是目标的轨迹;如果区域1、2和3的统计分布特征与区域4相等,那么认为其是虚假轨迹.如果一条轨迹是从目标统计特征变迁为杂波统计特征,那么就认为此目标消失,轨迹删除.

结合水下特殊的环境,主动声呐量测周期比较长,可达12s,将量测位置分布统计方法作简化处理,将3个区域看作一个整体,统计整个区域内量测位置统计特征变化与否,此简化方法以小幅度地降低轨迹终结判断准确率为代价获得大幅度的时间效率提升.

#### 4 新轨迹终结方法流程 (Flow diagram of the new track termination)

第3节详细地阐述了基于量测位置分布统计的轨迹终结方法,本节以流程图形式对其进行简要的概括,即描述所提新轨迹终结方法的实现流程,见图5.本方法的具体实现流程为:

第1步:滤波器量测更新.当滤波器获得量测结果时,更新滤波器的状态与状态协方差矩阵.

第2步:依据当前信息,求解离散黎卡蒂方程,获得轨迹稳定状态时的状态协方差矩阵值.

第3步:比较当前滤波状态协方差矩阵与理论计算的状态协方差矩阵,判断滤波器是否稳定.如果滤波器稳定,则转至第4步;否则,转至第9步.

第4步:划分有效预测区域.

第5步:统计一段时间内( $n$ 帧)各区域内量测平均个数.

第6步:依据状态协方差矩阵的稳定值,计算目标轨迹和虚假轨迹的量测分布特征,即计算相同时间内各区域内的量测平均个数.

第7步:轨迹当前的统计结果是否与目标轨迹特征相同,如果相同,则转至第8步;如果不相同,则转至第13步.

第8步:确定当前轨迹是目标轨迹,此轨迹予以保留.

第9步:上接第3步,如果滤波器尚未达到稳定状态,则判断是否处于稳定趋势.如果处于稳定趋势,则转至第10步;如果不处于稳定趋势,则转至第11步.

第10步:说明此轨迹的状态协方差矩阵正处于收敛状态,其很有可能是目标轨迹,至少当前不能对此轨迹作出决断.

第11步:说明此轨迹很有可能是虚假轨迹.为了验证其是否是虚假轨迹,需要划分其有效预测区域.

第12步:统计一段时间内,各区域内的量测分布特征.

第13步:该轨迹当前量测统计结果与虚假轨迹量测分布理论计算结果是否相同.如果相同,则转至第14步;如果不相同,则转至第15步.

第14步:此是虚假轨迹,予以删除.

第15步:此轨迹当前无法断定其是目标轨迹还是虚假轨迹.

第16步:等待下一次量测,更新滤波器.

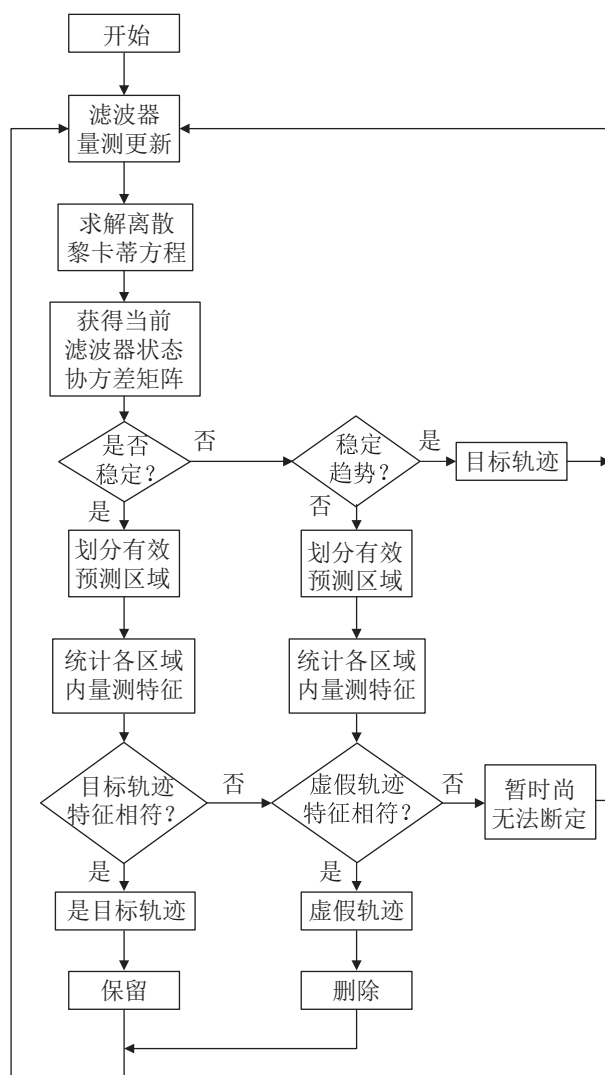


图5 轨迹终结流程图

Fig.5 The flow diagram of track termination

#### 5 仿真与分析 (Simulation and analyses)

轨迹终结是目标跟踪/轨迹管理的一部分,但是很少有文章专门阐述轨迹终结,这是因为通常目标跟踪的场景在空中或陆地,可选择的传感器精

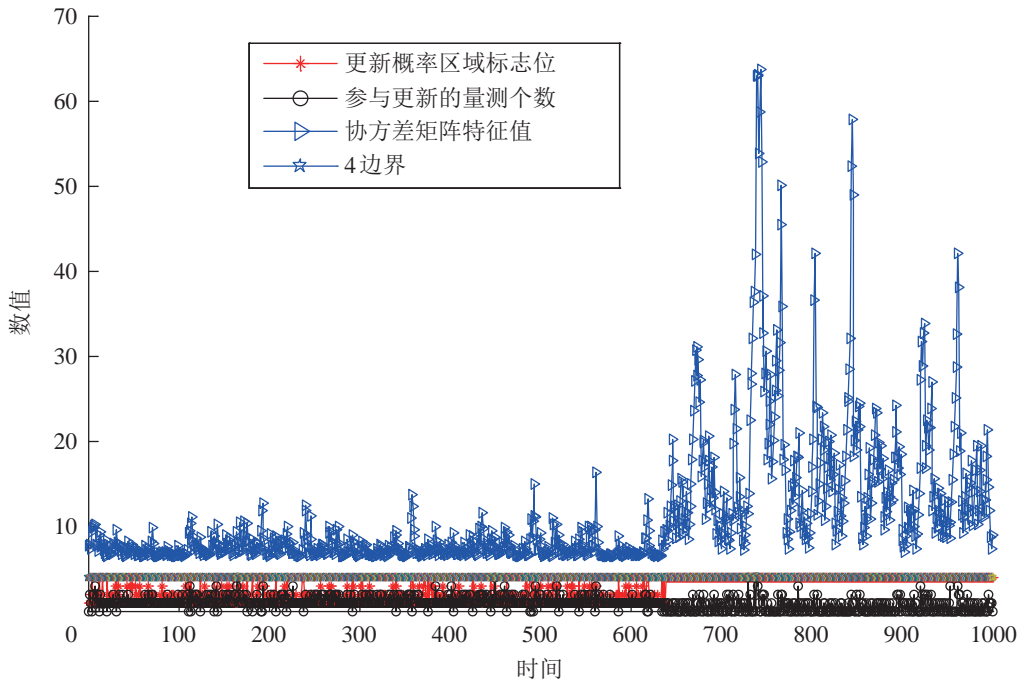


图 6 杂波环境中目标消失前后关键信息随时间的变化图

Fig.6 The key information of a target varies along with time, especially after the target disappears in the clutter environment

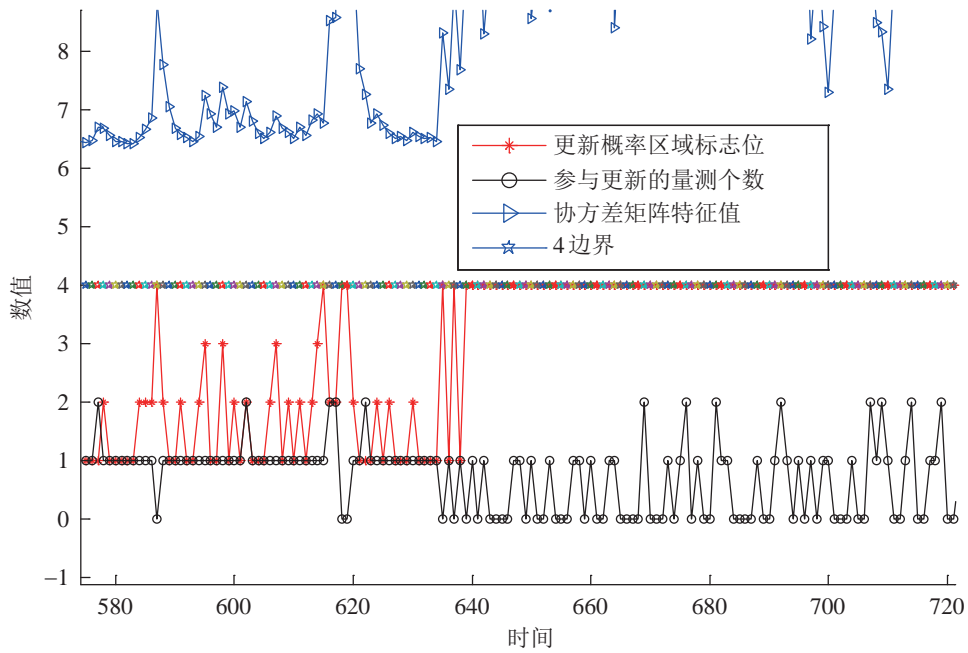


图 7 杂波环境中目标消失前后关键信息随时间变化的局部图

Fig.7 The key information of a target varies along with time (local area), especially after the target disappears in the clutter environment

度高, 传感器类型多, 传感器可组网探测等, 如雷达、光学设备等<sup>[11-12]</sup>. 然而, 水下环境特殊, 传统的方法并不适用. 本文针对水下杂波环境, 提出一种新的高效的轨迹终结方法. 本节针对所提出的轨迹终结方法进行仿真验证, 并分析其性能. 此外, 根据仿真数据, 比较本文的新方法与  $M/N$  轨迹终结方法, 对比结果表明本文新方法的轨迹终结性能

更高.

仿真环境设置包括, 目标速度为 5 m/s, 初始位置为 (5000, 5000),  $X$  轴与  $Y$  轴方向上的量测协方差均为 100 m, 声呐量测周期是 12 s, 声呐探测半径为 9000 m, 杂波密度为 0.001. 目标随机消失时间为 634 s, 图 6 是目标消失之后目标关键信息随时间的变化图, 红色星线是目标正确的量测在 3 个

区域的分布情况, 黑色圆圈线是在 0.9 概率椭圆内的量测个数 (包括杂波在内), 蓝色三角线是状态协方差矩阵特征值 (等价于目标状态的波动程度), 五角星线是边界, 如果量测落入无效量测区域 (无量测落入 0.9 概率椭圆区域内), 则标记在边界处. 图 7 是对图 6 在目标消失局部时间段内的放大图, 以便观察更清晰. 观察图 6 和图 7 可以发现: 现象 1, 目标在消失之前, 已经处于稳定状态, 状态协方差矩阵特征值小于 10, 而且波动很小. 现象 2, 目标的真实量测集中于区域 1 和 2, 区域 3 的目标真实量测相对较少, 这也符合式 (16) 的分析结果; 而且目标的真实量测很少落入无效区域, 即区域 4. 现象 3, 目标的 0.9 概率有效预测区域, 大多数情况下只有目标量测更新, 少数情况下也有杂波参与更新. 现象 4, 当杂波参与目标更新或者无量测更新时, 目标的状态协方差矩阵会变大. 现象 5, 目标消失后, 滤波器的状态协方差矩阵显著增大, 而且波动也增大. 现象 6, 目标消失后, 参与量测更新的均是杂波, 而且需要注意的是黑色圆圈线统计的是滤波器 0.9 概率预测区域量测的总个数; 目标消失后, 有效量测个数明显减少.

目标消失之后, 轨迹的关键信息有显著变化, 正如上文分析, 合理地运用这些信息可判断目标是否消失, 此即新方法的理论依据. 需要说明的是, 量测误差影响轨迹终结效果, 量测误差越大, 则  $P_{dr}$  相对而言没有显著变化, 但是  $P_{dr}$  会有所增大. 同时, 目标的运动模型精确与否也影响轨迹终结效果, 目标的运动模型是否精确体现在预测值和预测区域是否贴合真实情况. 因此, 航迹终结的最终效果受多种因素综合影响.

依据上文所描述的目标跟踪环境, 设定目标在 500 帧时消失, 采用新的轨迹终结方法,  $M$  设置为 7,  $N$  设置为 10,  $n$  值设置为 12, 仿真 1000 次. 统计结果为, 目标轨迹被错误删除次数为 8 次 (在 500 帧之前就被删除), 目标轨迹在 500 帧至 515 帧之间删除的次数是 885 次, 目标轨迹在 515 帧至 530 帧删除的次数是 107 次. 由仿真结果可知轨迹终结方法是有效的. 误删除概率小于 1%, 平均轨迹终结所需时间为 13.7 帧.

采用同样的仿真数据对传统的  $M/N$  轨迹终结方法 ( $M = 3$ ,  $N = 4$ ) 进行仿真, 即在  $N$  帧量测中, 若有  $M$  帧量测未更新轨迹, 则认为此轨迹是虚假轨迹, 予以删除. 结果有 549 次目标轨迹在第 500 帧之前就被删除, 这说明采用传统的轨迹终结方法误删除概率达 0.549, 根本不适用于水下环境.

由此可说明, 针对水下特殊环境, 本文提出的轨迹终结方法性能高于传统的轨迹终结方法.

## 6 总结 (Conclusion)

本文提出一种新的高效的轨迹终结方法: 基于量测位置分布统计的轨迹终结方法. 轨迹终结是目标跟踪的重要步骤, 是将虚假轨迹及时删除, 避免增加计算量和干扰决策. 基于量测位置分布统计的轨迹终结方法则是利用目标消失之后一些关键信息统计特征发生显著变化的特点, 来确定目标是否消失, 该方法适用于高密度杂波环境. 仿真与分析也证明了此轨迹终结方法取得了很好的效果. 但是轨迹终结方法仍然需要进一步完善, 如图 6 所示, 当目标消失后, 其状态协方差也发生了显著变化<sup>[13]</sup>, 如果能够利用这些信息, 综合处理, 那么轨迹终结性能将会进一步提升.

## 参考文献 (References)

- [1] 何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 25-71.  
He Y, Wang G H, Guan X, et al. Information fusion theory with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 25-71.
- [2] Yan J K, Liu H W, Jiu B, et al. Joint detection and tracking processing algorithm for target tracking in multiple radar system[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6534-6541.
- [3] 党建武. 水下多目标跟踪理论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 102-151.  
Dang J W. Underwater target tracking theory[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009: 102-151.
- [4] 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: 15-27.  
He Y, Xiu J J, Zhang J W, et al. Radar data processing with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 15-27.
- [5] Liu H W, Liu H L, Dan X D, et al. Cooperative track initiation for distributed radar network based on target track information[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2016, 10(4): 735-741.
- [6] Kumar D V A N R, Rao S K, Raju K P. A novel stochastic estimator using pre-processing technique for long range target tracking in heavy noise environment[J]. Optik, 2016, 127(10): 4520-4530.
- [7] Hu Z J, Leung H, Blanchette M. Statistical performance analysis of track initiation techniques[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(2): 445-456.
- [8] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 57-98.  
Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. Kalman filter and integrated navigation theory[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998: 57-98.
- [9] Raj K D S, Krishna I M. Kalman filter based target tracking for track while scan data processing[C]//2nd International Conference on Electronics and Communication Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 878-883.  
(下转第 354 页)

- [13] N'Guyen S, Pirim P, Meyer J A. Texture discrimination with artificial whiskers in the robot-rat psikharpax[C]//International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Berlin, Germany: Springer, 2010: 252-265.
- [14] 郭强. 仿生鼠机械系统设计与运动特性研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.  
Guo Q. Mechanical system design and the research on motion characteristic for bio-mimetic mouse[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [15] 李艳杰. 仿鼯鼠挖掘机器人及运动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.  
Li Y J. A bionic digging robot inspired by mole & its movement characteristics research[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [16] Takanishi A, Aoki T, Ito M, et al. Interaction between creature and robot: Development of an experiment system for rat and rat robot interaction[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1998: 1975-1980
- [17] Aoki T, Watanabe T, Miwa H, et al. An animal psychological approach for personal robot design – Interaction between a rat and a rat-robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 365-370.
- [18] Shi Q, Ishii H, Miyagishima S, et al. Development of a hybrid wheel-legged mobile robot WR-3 designed for the behavior analysis of rats[J]. Advanced Robotics, 2011, 25(18): 2255-2272.
- [19] Shi Q, Ishii H, Kinoshita S, et al. A rat-like robot for interacting with real rats[J]. Robotica, 2013, 31(8): 1337-1350.
- [20] Shi Q, Ishii H, Kinoshita S, et al. Modulation of rat behaviour by using a rat-like robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2013, 8(4): No.046002.
- [21] Shi Q, Ishii H, Sugita H, et al. A rat-like robot WR-5 for animal behavior research[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 784-789.
- [22] Shi Q, Ishii H, Sugahara Y, et al. Design and control of a biomimetic robotic rat for interaction with laboratory rats[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(4): 1832-1842.

### 作者简介:

- 李 康 (1993-), 男, 硕士生. 研究领域: 仿生机器人.  
石 青 (1983-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 仿生机器人, 微纳操作机器人等.  
李 昌 (1991-), 男, 博士生. 研究领域: 仿生机器人.

(上接第346页)

- [10] 夏佩伦. 目标跟踪与信息融合 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 125-139.  
Xia P L. Target tracking and information fusion[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 125-139.
- [11] Kennedy H L. Clutter-based test statistics for automatic track initiation[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(3): 266-273.
- [12] 夏瑜, 吴小俊, 李菊, 等. 基于改进融合策略的多特征跟踪算法 [J]. 机器人, 2016, 38(4): 428-436.  
Xia Y, Wu X J, Li J, et al. Multiple features tracking algorithm based on an improved fusion strategy[J]. Robot, 2016, 38(4): 428-436.
- [13] Kumar M N V S S, Modalavalasa N, Ganesh L, et al. A new approach for tracking moving objects in underwater environment[J]. Current Science, 2016, 110(7): 1315-1323.

### 作者简介:

- 李冬冬 (1989-), 男, 博士生. 研究领域: 水下目标跟踪.  
张 瑶 (1984-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 水下目标跟踪, 水下声信号处理.  
林 扬 (1962-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 自主水下机器人总体技术, 水下航行器载体技术.