

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107817

基于斜率约束和回溯搜索的水下多目标跟踪方法^{*}

张雨, 陈熙源, 朱敏, 于凌宇

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘要:针对复杂水域环境下的多目标跟踪问题,本文提出了一种基于斜率约束和回溯搜索的多目标跟踪方法。首先,基于方位测量数据和水下目标运动学分析,利用门限阈值的方法检测目标。然后,基于传统多假设跟踪算法框架设计一种新的斜率约束和共用量测的假设生成规则。在航迹中断时,通过回溯搜索的方法确定中断起始航迹点,利用容积卡尔曼滤波对中断航迹预测和补偿,同时对假设生成结果减枝,以达到降低算法空间复杂度的目的。试验结果表明:该方案能够实现多目标自动关联跟踪、中断航迹自动预测、自动航迹终止等任务,目标跟踪平均均方根误差 0.5944° , 算法平均运行时间 0.8265 s 。

关键词: 斜率约束; 回溯搜索; 多假设跟踪; 容积卡尔曼滤波; 水下多目标跟踪

中图分类号: TP241 TH69 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40 520.60

A multi-target passive tracking method based on slope constraint and retrospective searching

Zhang Yu, Chen Xiyuan, Zhu Min, Yu Lingyu

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To achieve multi-target tracking tasks in complex water environment, a multi-target tracking method based on slope constraint and backtracking search strategy is proposed. Firstly, the threshold detection method is used to extract targets based on the bearing-time recording (BTR) data and the underwater kinematics analysis. Then, a novel hypothesis generation rule is proposed under the frame of traditional multi-hypothesis tracking (MHT) algorithm, which could be termed as slope constraint and measurements sharing. When the trajectory is interrupted, the retrospective search method is used to determine the interruption starting track point of targets. In addition, the cubature Kalman filter (CKF) is utilized to predict and compensate the interrupted trajectory. The hypothesis generation result is reduced to optimize the space complexity of algorithm. Experimental results show that this strategy can complete tasks such as multi-target automatic association tracking, interrupted track automatic prediction, and automatic track termination. The the average root mean square error of target tracking is 0.5944° , and the average running time of the algorithm is 0.8265 s .

Keywords: slope constraint; measurements sharing; multi-hypothesis tracking; cubature kalman filter; multi-target passive tracking

0 引言

水下多目标的被动跟踪和检测相对于主动跟踪具有非线性、轨迹中断、干扰目标较多等特点。在跟踪过程中,由于杂波、多途干扰、信噪比低、目标多等原因,要实现水下被动多目标的检测和跟踪是一个具有挑战的任务。在常规被动目标检测和跟踪中,通常基于滤波器来完成跟踪任务^[1-3]。水下环境的被动目标跟踪方法一般

通过宽带能量检测得到目标方位的谱数据,并以时间方位历程图(bearing-time recording, BTR)形式进行显示,再基于BTR图进行目标跟踪的研究。在目标检测的任务中,经典方法是将隐马尔可夫模型(hidden markov model, HMM)和跟踪置前检测(track-before-detect, TBD)相结合,把频率、频率变化率、方位及方位变化率作为HMM的状态,实现基于线谱的自动检测^[4]。在目标跟踪的任务中,水下环境的复杂性使得探测器出现很多的散射信号,获得的目标探测的点迹数目少,野值多。因此,数据

收稿日期:2021-04-24 Received Date: 2021-04-24

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61873064)、国家重点研发计划(2017YFC0306300)项目资助

关联算法的优劣直接决定了水下目标跟踪的性能。随着信息融合技术的快速发展,通过信息融合实现水多目标跟踪也取得了突破性的进展,Bar-Shalom 和 Singer 通过数据关联算法和 Kalman 滤波技术结合,使得多目标跟踪技术取得突破性的进展。同时,对于数据关联算法,最早的有最近邻算法^[5],直接将量测与距离最近的目标关联,但在处理多目标交叉问题时,关联正确率很低。在实际工程应用中,也有使用方位能量信息进行粒子的迭代,也可取得较好的跟踪效果,但在方位角信号分辨率低,体现在 BTR 图中为信号能量较弱的条件下,实现目标跟踪就非常的困难^[6]。Benjamin 等提出了基于概率密度(probability density function, PDF)的跟踪方法,但该方法仍然具有的缺陷是不易处理交叉目标^[7]。因此,为了解决交叉目标的问题,Kevin 给出一种基于多假设跟踪(multi hypothesis tracking, MHT)的多目标自动跟踪方法,该方法将干扰目标作为先验信息,依据数据融合的思想,通过对目标轨迹状态估计、数据关联和轨迹管理来实现对所有可检测目标(包括弱目标在内)的跟踪^[8-9]。但该方法的缺陷也很明显,当目标数量增加时,算法复杂度呈指数增加,对内存的要求也会更高,也不能达到实时性的要求^[10-11]。在国内,对于目标跟踪而言,王忠等^[12]在目标方位信息的基础上,增加能量信息,从而提高跟踪能力,但该方法受限于目标为非快速机动。为了解决多目标交叉问题,高运等^[13]提出了一种跟踪置前检测,能有效对多目标进行跟踪,解决多目标交叉问题,并能估计目标轨迹的起止时间。同时,对于多目标跟踪过程中出现的航迹中断问题,李子高等^[14]使用图形处理中的自适应区域生长方法对中断航迹进行补全,但无法在长航时中断下取得好的效果。最近邻卡尔曼滤波算法,容积卡尔曼滤波算法等也被用来对中断航迹进行预测和补偿,且算法计算量小^[15]。中科院声学研究所提出了一种粒子采样预测进行航迹中断预测补齐的方法,通过设置观测门限的方法自适应设置跟踪门限,再通过块关联跟踪方法进行航迹中断关联和方位交叉关联。但该方法受限于待跟踪目标方位至少存在一段连续的运动轨迹,对于在跟踪过程中出现的新目标无法正确起批^[16]。西北工业大学也提出了一种针对水下不可观测数据的纯方位 PMHT 多目标跟踪方法,通过引入目标和量测数据之间的关联变量来解决量测与目标之间数据关联模糊的问题^[17]。

本文面向水下被动多目标的自动检测和跟踪,结合水下目标运动学分析和方位测量,提出了一种被动多目标自动检测和跟踪算法,利用区域生长搜索的块关联算法实现目标自动关联跟踪。此外,针对长目标中断,使用非线性卡尔曼滤波的方法对中断目标实现较长时间的预测。

1 被动目标系统观测模型

假设在二维监测区域内有多个目标,采用匀速运动模型模拟每个目标的位置变化情况,假定一个目标在 k 时刻的状态矢量表示为可表示为 $\mathbf{x}_k = [x, v_x, y, v_y]^T$, $\mathbf{x}_k$ 状态矢量中包含 x, y 方向上的位置和速度。所以,目标的状态方程可以表示为:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}w_k \quad (1)$$

其中,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

式中: $\mathbf{F}$ 表示目标的状态转移矩阵; $\mathbf{G}$ 为状态噪声强度的输入矩阵。通常假设过程噪声 w_k 服从均值为 0, 协方差矩阵为 $\mathbf{Q}$ 的高斯分布, 假设过程噪声和量测噪声相互独立。

假设跟踪目标和探测传感器位于同一个平面内, 确定被动探测传感器的个数和位置后, 即可得到某一目标 $\mathbf{x}_k$ 的方位角:

$$\beta_k = \arctan \frac{x - a}{y - b} \quad (2)$$

其中, β_k 表示第 k 个目标的方位角; (a, b) 表示某一探测传感器的位置坐标。

2 基于 k-MHT 算法的目标跟踪

传统 MHT 算法是利用基于时间序列的量测数据形成候选目标的假设树, 并在下一时刻获得量测量时, 做出 3 种假设, 分别判断是否来自现有目标、来自杂波以及新目标。然后利用贝叶斯公式计算每一种假设的概率并生成关联矩阵, 结合 Murty 算法找出最优分配结果。从而确定当前量测是属于哪一种假设。传统假设规定对于每一个量测, 允许 1 个目标与其关联, 即 1 个观测点只与 1 个目标关联。但在实际环境中, 通常会出现两个目标方位交叉时只存在一个检测点, 即无法满足上述假设条件。

因此, 为了解决方位交叉时出现关联错误和航迹预测等问题, 本文对传统多假设跟踪算法进行改进, 提出一种基于斜率约束和回溯搜索的多假设目标跟踪算法, 记为 k-MHT 算法。在 k-MHT 算法中, 我们使用斜率约束和共用量测策略作为假设生成的条件, 保持在每个时刻的跟踪并拟合当前目标的斜率, 通过比较当前斜率和历史拟合的斜率的差来判断是否出现航迹中断。如果当前斜率和历史拟合的斜率的差大于一定阈值, 则认为出现航迹中断, 就触发回溯搜索, 回溯到航迹中断的起始时刻

点,对误判目标不继续跟踪,并利用容积卡尔曼滤波进行航迹预测,最终避免航迹点的错连;如果没有超过设定阈值则认为没有出现航迹中断,保持当前的跟踪结果,继续跟踪。

2.1 关联跟踪

假设在 t 时刻,目标的总个数为 M ,待关联目标的状态矩阵为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_M]$, i 表示目标的批号, x_i 表示第 i 个目标的状态向量, t 时刻的量测矩阵为:

$\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_m]$, m 表示量测目标的个数, z_j 表示第 j 个量测值。在多目标关联中,我们给出可行性的假设:1) 对于每一个目标,最多只有一个量测与其关联;2) 对于每一个量测,允许多个目标与其关联,允许目标之间共用量测值。因此,数据关联的目标函数可以表示为:

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^m u_{ij} g_{ij} \quad (3)$$

其中, g_{ij} 表示目标 i 和量测 j 的关联程度; u_{ij} 表示目标 i 和量测 j 的关联情况。对于目标 i 和量测 j 的关联程度,可以用似然函数来表示:

$$g_{ij} = (2\pi S)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2} z_{i,j}^T S^{-1} z_{i,j}} \quad (4)$$

$$\tilde{z}_{i,j} = z_j - p_i \quad (5)$$

其中, p_i 表示第 i 个目标在该时刻的预测值; $\tilde{z}_{i,j}$ 表示第 i 个目标量测值和实际第 j 个目标的方位值的差; S 表示 i 和 j 两个目标方位值的残差。当目标的预测值和该目标当前时刻的目标值正确关联时,目标的关联程度越大。关联矩阵 $\mathbf{U}$ 的表达式为:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{01} & \cdots & u_{i1} & \cdots & u_{M1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{0j} & \cdots & u_{ij} & \cdots & u_{Mj} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{0m} & \cdots & u_{im} & \cdots & u_{Mm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于改进的 MHT 算法的约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M u_{ij} = 1 \\ \sum_{j=1}^m u_{ij} > 1 \\ k_{\text{ploffy}} \times k_{\text{current}} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, u_{ij} 的值为 0 或 1,当量测量和第 i 个目标 x_i 关联时, u_{ij} 为 1,否则为 0。 k_{ploffy} 表示原本目标历史航迹拟合曲线的斜率; k_{current} 表示加入假设量测量之后当前目标和量测量拟合的斜率,约束中需要保证两次拟合的斜率同号,这种方式可以排除估计斜率非同号的假设。

2.2 基于回溯搜索的假设剪枝

常用的 MHT 算法通常使用 N-scan 方法进行剪枝,通过限制假设树的深度来控制假设数量。考虑在工程应用中,复杂环境下杂波较多, MHT 算法中假设生成的策略会造成很多的杂波量测点被误认为是新目标的起批点,从而出现算法复杂度成指数增长的情况。而且,在航迹出现断裂的情况下,因为假设生成的原因,算法会给出错误的假设目标,最终导致关联错误。因此本文设计一种基于回溯的假设剪枝策略。首先,需要判断当前目标航迹是否出现断裂问题,我们认为一条航迹出现 10 帧以上量测点缺失,则出现中断。每次关联跟踪时,对前 10 个时刻的航迹点计算斜率拟合值,通过斜率约束的阈值条件判断当前航迹点是否已经中断。如果出现中断,则回溯到原中断的起始时刻点,开始航迹点的预测,进而实现避免航迹点的错连的现象。

2.3 容积卡尔曼滤波算法

当利用时间方位历程图对航迹目标进行跟踪时,经常会因为目标本身的轨迹交叉和信号的丢帧,导致目标航迹在关联之后出现断裂,这时候关联算法将无法工作。因此,需要对断裂轨迹进行预测。本文采用容积卡尔曼滤波的方式对断裂轨迹预测。CKF 算法的基本原理是利用三阶球形相体积法则来近似后验均值和非线性函数的协方差,同时利用容积点进行数值进行积分^[9]。滤波过程可以分为时间更新和量测更新两部分,本文设置状态量和协方差的初始计算为: $x_k = E(x_0)$, $p_k = cov(x_0)$ 。

1) 时间更新

计算三阶容积点和方差:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{k-1|k-1} = chol(\mathbf{P}_{k-1|k-1}) \\ \mathbf{x}_{k-1|k-1,i} = \mathbf{S}_{k-1|k-1} \boldsymbol{\xi}_i + \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $chol(\cdot)$ 表示 Cholesky 分解; $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$ 表示 $k-1$ 时刻均方根误差的预测值; $\mathbf{S}_{k-1|k-1}$ 表示最优滤波估计协方差; $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ 为 $k-1$ 时刻滤波器输出的最优状态估计; $\mathbf{x}_{k-1|k-1,i}$ 表示计算容积点; $\{\boldsymbol{\xi}_i\}$ 表示标准化容积点,通常被设置为:

$$\sqrt{n} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$$

对于状态方程,带入容积点可得到状态估计值:

$$\mathbf{x}_{k|k-1,i} = f(\mathbf{x}_{k-1|k-1,i}) \quad (9)$$

然后,计算状态量估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 和协方差的预测值 $\mathbf{P}_{k|k-1}$:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n} \omega_i \mathbf{x}_{k|k-1,i} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n} \omega_i (\mathbf{x}_{k|k-1,i} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})(\mathbf{x}_{k|k-1,i} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})^T \quad (11)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{klk-1}$ 是在 $k-1$ 时刻对 k 时刻系统状态的估计值; $\mathbf{P}_{klk-1}$ 是系统在 $k-1$ 时刻对下一时刻 k 协方差的预测值; ω_i 表示随机权重, $\omega_i = \frac{1}{2n}$ 。

2) 量测更新

当计算量测更新值时, 当前时刻的容积点值为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{k-1|k-1} = \text{chol}(\mathbf{P}_{k-1|k-1}) \\ \mathbf{x}_{k-1|k-1,i} = \mathbf{S}_{k-1|k-1} \boldsymbol{\xi}_i + \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \end{cases} \quad (12)$$

确定了容积点之后, 计算容积点对应的输出量测值:

$$\hat{\mathbf{z}}_{klk-1} = h(\mathbf{x}_{klk-1,i}) \quad (13)$$

然后, 计算量测量的估计值 $\hat{\mathbf{z}}_{klk-1}$:

$$\hat{\mathbf{z}}_{klk-1} = \sum_{i=1}^{2n} \omega_i \mathbf{z}_{klk-1,i} \quad (14)$$

确定协方差:

$$\mathbf{P}_{xz,k} = \sum_{i=1}^{2n} \omega_i (\mathbf{x}_{klk-1,i} - \hat{\mathbf{x}}_{klk-1}) (\mathbf{z}_{klk-1,i} - \hat{\mathbf{z}}_{klk-1})^T \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{xx,k} = \sum_{i=1}^{2n} \omega_i (\mathbf{x}_{klk-1,i} - \hat{\mathbf{x}}_{klk-1}) (\mathbf{x}_{klk-1,i} - \hat{\mathbf{x}}_{klk-1})^T \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{zz,k} = \sum_{i=1}^{2n} \omega_i (\mathbf{z}_{klk-1,i} - \hat{\mathbf{z}}_{klk-1}) (\mathbf{z}_{klk-1,i} - \hat{\mathbf{z}}_{klk-1})^T \quad (17)$$

式中: $\hat{\mathbf{z}}_{klk-1}$ 是在 $k-1$ 时刻对 k 时刻的量测量预测值; $\mathbf{P}_{xx,k}$, $\mathbf{P}_{xz,k}$, $\mathbf{P}_{zz,k}$ 表示自相关和互相关协方差阵。

最后计算滤波器增益, 当前时刻的状态估计值, 和状态量误差的协方差值:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{xz,k} \mathbf{P}_{zz,k}^{-1} \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{klk} = \hat{\mathbf{x}}_{klk-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{klk-1}) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_{k/k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{zz,k} \mathbf{K}_k^T \quad (20)$$

3 实验验证

为了验证 k-MHT 算法的可行性和鲁棒性, 本文选取了 3 种不同的试验场景其中包括: 多目标航迹的交叉、航迹的中断和杂波环境下多目标跟踪。

实验中设定检测概率阈值设为 0.75, 目标回波服从正态分布, 存在均值为 0, 方差为 0.5 的高斯白噪声。在阈值检测中, 每一秒可以得到当前时刻下所有目标的检测结果。在阈值检测之后, 利用本文提出的基于斜率约束的多假设目标跟踪算法进行关联跟踪。

3.1 简单目标的检测和跟踪

图 1 表示了在一海试场景下的目标检测和跟踪结果。其中, 图 1(a) 表示目标回波数与时间的关系图, 图 1(b) 是基于图 1(a) 的中 BTR 图和目标检测结果进行目标跟踪得到的结果图。

在图 1 中(a)中起批目标一共有 2 个, 分别在波束号 5 和 60 附近, 目标根据批号分别标注成蓝色和红色。(和 BTR 图中的目标显示一致)。从 BTR 图中可以看

出, 实验环境中存在有不连续的噪声干扰, 且检测信号较弱。从跟踪的结果图中可以看出, 本文提出的基于斜率约束的跟踪策略可以有效的完成简单目标的跟踪。

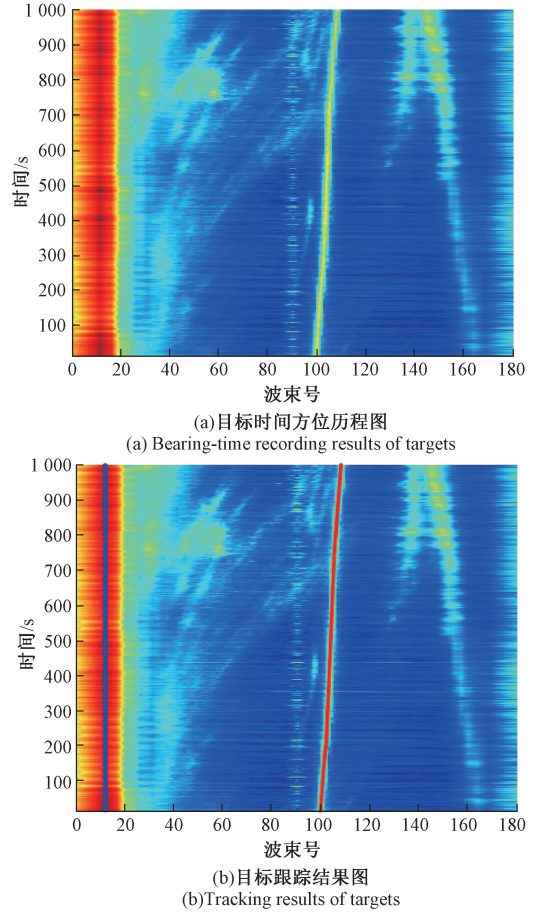


图 1 BTR 和目标跟踪结果图

Fig. 1 Bearing-time recording and tracking results of targets

3.2 复杂环境下多目标跟踪

k-MHT 算法可以很好的处理航迹的交叉和中断航迹的预测, 传统 MHT 算法对于复杂环境下的多目标跟踪可以取得很好的效果。所以, 本文实验论证了 k-MHT 算法在杂波环境下也能保持较好的跟踪效果。图 2(a)、(b) 分别表示复杂环境下多 e 目标的时间方位历程图和目标检测图。图 3 表示多目标跟踪结果图。在图中, 用不同颜色标记不同的目标。在前文中提到: 我们使用斜率约束和共用量测的策略作为假设生成的条件, 并且在每个时刻的跟踪后拟合当前目标的斜率, 通过比较当前斜率和历史拟合的斜率的差来判断是否出现航迹中断。因此记当前斜率 k_{cur} 和历史拟合的斜率 k_{cur} 之间的差为 Δk , 设定不同的阈值 t 用于判断是否出现航迹中断。图 3(a) 和 (b) 分别表示阈值 $t=0.1$ 、 $t=0.025$ 下多目标跟踪结果。在图 3(a) 中圆

圈标注处位为航迹中断处,因为在图 2(b) 的相同位置处已经不存在连续的目标点迹。同时图 3(b) 对比图 3(a) 在圆圈标注处出现了新目标的起批。因此可以知道,当门限阈值变小,会有更多目标的航迹被起批和跟踪关联(见图 3(b) 标注处),且在图 3(a) 中对于在检测图中信号较强的目标,在跟踪结果图中都被正确起批,在回波干扰的影响下也都没有发生关联跟踪错误。

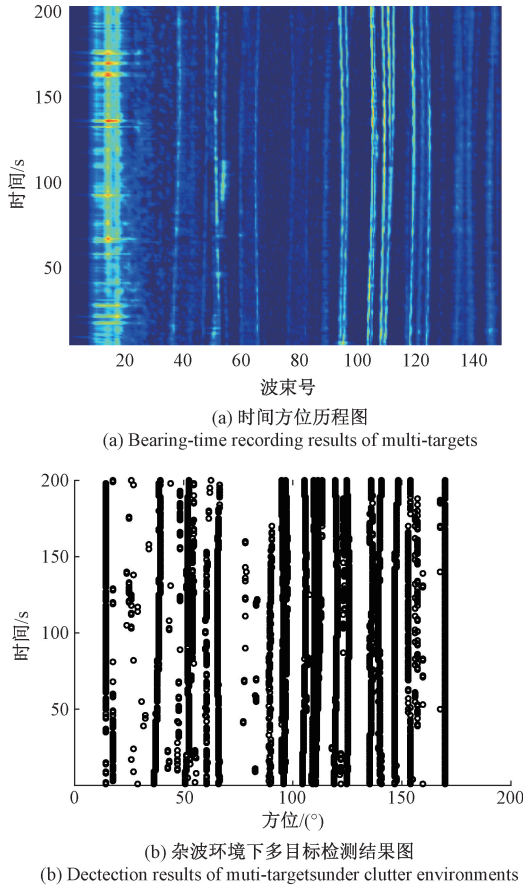


图2 杂波环境下的多目标时间方位历程图和检测结果图
Fig. 2 BTR and detecting results with multi-targets under complex environment

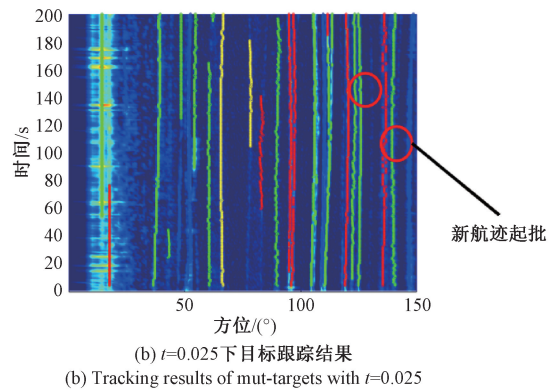
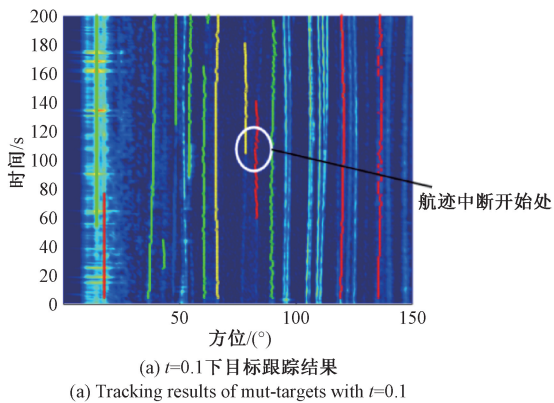


图3 杂波环境下的多目标跟踪结果对比图
Fig. 3 Comparison results with different tracking results with multi-targets under complex environments

在出现航迹中断,如图 3(a) 中标注处所示,对比检测结果,此处出现了航迹的中断,但在跟踪过程中, k-MHT 算法对目标会继续保持量测一致进行跟踪,但因为一直保持量测更新导致目标航迹斜率不符合和其本身的运动轨迹,会触发回溯搜索,进行假设剪枝,即不继续跟踪误检的虚假目标,然后利用容积卡尔曼滤波进行航迹预测,将断裂航迹补偿。

存在方位角为 0 的点是因为在跟踪过程中当目标超过 15 个时刻不存在检测点时,本文认为航迹终止,则会把对应跟踪目标的方位角置 0。

3.3 不同跟踪算法的性能比较

为了验证本文提出的基于斜率约束和回溯搜索的目标跟踪算法的性能,本文比较了 3 种不同跟踪算法的跟踪效果分别是:最近邻(NN)、多假设跟踪(MHT)和本文提出的基于斜率约束的多假设跟踪(k-MHT)。跟踪结果如表 1、2 所示。表 1 和 2 分别给出了两种海试实验下不同跟踪算法的性能结果,并统计其跟踪正确率、漏检率、平均绝对误差和平均运行时间。本文算法的运行处理器为: Intel(R) Core(TM) i7-8700k CPU @ 3.7 GHz GTX2070 s GPU,平均运行时间为同一时刻下不同算法实现跟踪所需要的时间,从表 1 和 2 平均运行时间的结果可以看出: MHT 算法耗时最多,其次是传统 NN 算法,本文提出的算法相较于 MHT 算法,平均运行时间在两次试验环境下分别提高 55% 和 31.25%。在跟踪正确率的计算中,只要有一个目标发生关联错误即认为错误关联。表 1 显示, MHT 和 k-MHT 算法在两个目标交叉时都可以正确关联,但 NN 算法在目标发生交叉时,容易产生错误关联。且当在跟踪过程中出现新目标的时候, NN 算法发生漏检的概率较大。从表 2 中可以看出,本文提出的 k-MHT 算法性能明显优于其他两种方法,跟踪的平均绝对误差相对于 NN 算法从 7.111° 下降到 0.677° ,误差精

度提高 90.48%, 相对于 MHT 算法误差精度提高 54.52%。但相对于试验环境一, MHT 算法的跟踪正确率下降了 22.2%, 因为在试验环境二中存在目标航迹中断, 传统 MHT 算法再遇到航迹中断的情况时会当前目标停止, 等待重新起批, 这样会导致跟踪正确率下降, 将原本是同一个目标认为是两条航迹。本文利用容积卡尔曼滤波对断裂航迹补偿, 并和后续时刻同一目标产生的航迹再进行关联, 提高了跟踪的正确率。

表 1 试验环境一下 3 种算法跟踪性能比较

Table 1 Comparison of tracking performance for three different algorithms in experiment 1

试验环境一	跟踪正确率 /%	漏检率 /%	平均绝对 误差/(°)	平均运行 时间/s
NN	69.7	11.11	6.381 2	1.376
MHT	100	0	3.142 1	1.489
k-MHT	100	0	0.594 4	0.67

表 2 试验环境二下 3 种算法跟踪性能比较

Table 2 Comparison of tracking performance for three different algorithms in experiment 2

试验环境二	跟踪正确率 /%	起批漏检率 /%	平均绝对 误差/(°)	平均运行 时间/s
NN	68.9	11.11	7.111 2	1.776
MHT	77.8	0	3.234 2	1.43
k-MHT	100	0	0.677 2	0.983

此外, 本文以试验二为例, 讨论了不同跟踪算法下每个目标的均方根误差, 如图 4 所示。

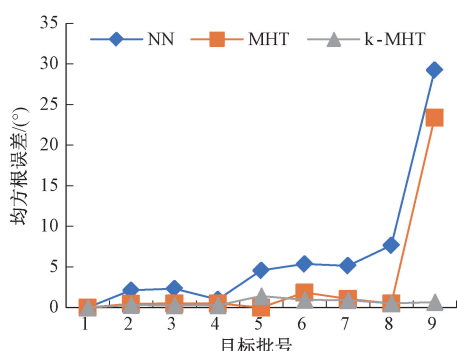


图 4 目标的均方根误差图

Fig. 4 Root mean square error of each target

从图 4 中可以看出, k-MHT 算法计算得每个目标的均方根误差都比 NN 算法和 MHT 算法要小。但目标批号 5 在 MHT 算法下计算的均方根误差为 0.822 3°, 在 k-MHT 算法下计算的均方根误差为 1.421 1°。针对

目标批号 5, MHT 算法的效果要比 k-MHT 算法要优, 这是因为目标批号 5 一直是以斜率 0 的趋势运动, 且在运动过程中不存在航迹的中断和杂波的干扰, 航迹形成较为稳定, 所以 MHT 算法可以取得较好的效果, 但当目标运动趋势较大, 航迹不稳定时, k-MHT 算法的鲁棒性更好。

4 结 论

为了解决复杂水域环境下的多目标跟踪错误和航迹中断等问题, 本文提出一种基于斜率约束和回溯搜索的多目标跟踪算法, 即 k-MHT 算法。在多航迹交叉的场景下, 引入斜率约束和共用量测的假设生成条件, 减少对目标的先验依赖。通过斜率拟合和设定阈值的方式来判断是否出现航迹中断, 在航迹中断场景下, 利用回溯搜索策略进行航迹预测, 并对假设生成的目标剪枝, 避免航迹点的错连。海试实验结果表明: k-MHT 算法比 MHT 算法耗时更短, 目标跟踪正确率更高。此外, 本文提出的算法克服了原 MHT 算法复杂度指数增长的缺点, 可以满足实时性的要求。

致谢: 感谢东南大学信息科学与工程学院罗昕炜老师对论文给予的帮助!

参考文献

- [1] 蒋小勇, 周胜增. 隐马尔可夫模型在多目标自动检测和跟踪中应用[J]. 声学及电子工程, 2016(4): 29-34.
- JIANG X Y, ZHOU SH Z. Application of hidden markov model in multi-target automatic detection and tracking[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2016(4): 29-34.
- [2] 韩晓微, 王雨薇, 谢英红, 等. 基于双相关滤波器的多通道尺度自适应目标跟踪[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 76-84.
- HAN X W, WANG Y W, XIE Y H, et al. Multi channel scale adaptive target tracking based on double correlation filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 76-84.
- [3] 郑浦, 白宏阳, 李政茂, 等. 抖动干扰下运动目标精准检测与跟踪算法设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 93-101.
- ZHENG P, BAI H Y, LI ZH M, et al. Accurate detection and tracking algorithm design of moving target under jitter interference[J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2019, 40(11):93-101.
- [4] 汤双霞, 詹志辉. 基于标签多伯努利滤波器的被动多目标跟踪[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 31(6): 134-140.
- TANG SH X, ZHAN ZH H. Passive multi target tracking based on label multi Bernoulli filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 31(6):134-140.
- [5] 江南. 基于动态自适应相关滤波的复杂场景目标跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 140-147.
- JIANG N. Target tracking algorithm in complex scenes based on dynamic adaptive correlation filtering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2):140-147.
- [6] NORTHARDT T, NARDONE. Track-before-detect bearings-only localization performance in complex passive sonar scenarios: A case study [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(2): 482-491.
- [7] BADRIASL L, ARULAMPALAM S, VAN DER HOEK J, et al. Bayesian WIV estimators for 3-D bearings-only TMA with speed constraints[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(13): 3576-3591.
- [8] DIAMANT R, KIPNIS D, BIGAL E, et al. An active acoustic track-before-detect approach for finding underwater mobile targets[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2019, 13(1): 104-119.
- [9] REID D. An algorithm for tracking multiple targets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1979, 24(3): 834-854.
- [10] FORTMANN T, BAR-SHALOM Y, SCHEFFE M. Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1983, 8(4): 173-184.
- [11] 邵鹏飞, 王蕾, 王方勇. 基于序贯蒙特卡洛与概率假设密度滤波的主动分布式声纳多目标跟踪[J]. 兵工学报, 2020(5):941-949.
- SHAO P F, WANG L, WANG F Y. Active distributed sonar multi-target tracking based on sequential monte carlo and probability hypothesis density filtering[J]. Acta Armamentarii, 2020(5):941-949.
- [12] 王忠, 陈伏虎. 基于阵元域数据的联合检测与跟踪算法[J]. 声学学报(中文版), 2007(6): 553-558.
- WANG ZH, CHEN F H. Joint detection and tracking algorithm based on array element domain data[J]. Acta Acoustics (Chinese Edition), 2007(6): 553-558.
- [13] 高运, 孙德龙, 周胜增. 被动声呐多目标自动检测与跟踪算法研究[J]. 声学与电子工程, 2018(4): 15-17.
- GAO Y, SUN D L, ZHOU SH Z. Research on multi-target automatic detection and tracking algorithm of dynamic sonar [J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2018(4): 15-17.
- [14] 李子高, 李淑秋, 闻疏琳. 基于无人平台的水下目标自动检测方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 103-108.
- LI Z G, LI SH Q, WEN SH L. Automatic detection of an underwater target based on UUV[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 103-108.
- [15] CLARK D, RUIZ I T, PETILLOT Y, et al. Particle PHD filter multiple target tracking in sonar image[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 409-416.
- [16] 王宇杰, 李宇, 鞠东豪, 等. 一种基于水下无人航行器等多目标被动跟踪算法[J]. 电子信息学报, 2020, 42(8):2014-2020.
- WANG Y J, LI Y, JU D H, et al. A passive tracking algorithm based on underwater unmanned aerial vehicles and other multi-targets [J]. Journal of Electronic Information, 2020, 42(8):2014-2020.
- [17] 李晓花, 李亚安, 鲁晓峰, 等. 强干扰环境下水下纯方位 PMHT 多目标跟踪[J]. 西北工业大学学报, 2020, 182(2):136-142.
- LI X H, LI Y AN, LU X F, et al. Multi target PMHT tracking of underwater bearing only in strong jamming environment [J]. Journal of Northwest University of Technology, 2020, 182(2):136-142.

作者简介



张雨, 2019 年于中北大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为水下、水面多目标检测跟踪和多传感融合组合导航。

E-mail: 220193310@seu.edu.cn

Zhang Yu received her B. Sc. degree from North University of China in 2019. She is currently a master student at Southeast University. Her main research interests include multitarget tracking, multi-sensor fusion integrated navigation.



陈熙源 (通信作者), 1998 年毕业于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授, 主要研究方向为多目标跟踪、惯性技术、软件接收机及组合导航。

E-mail: chxiyuan@seu.edu.cn

Chen Xiyuan (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southeast University (SEU) in 1998. He is currently a professor at SEU. His main research interests include multitarget tracking, inertial technologies, software defined receiver and integrated navigation.



朱敏, 2020 年于中北大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生。主要研究方向为多目标检测跟踪和分布式传递对准。

E-mail: 220203451@seu.edu.cn

Zhu Min received her B. Sc. degree from North University of China in 2020. She is currently a master student at Southeast University. Her main research interests include multitarget tracking, and distributed transfer alignment.



于凌宇, 2020 年于南京林业大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生。主要研究方向为多路径信号抑制和组合导航。

E-mail: 220203448@seu.edu.cn.

Yu Lingyu received her B. Sc. degree from Nanjing Forestry University in 2020. She is currently a master student at Southeast University. Her main research interests include multi-path signal suppression and integrated navigation.