

多信息融合角度关联多目标跟踪算法

钱梦浩¹, 陈伟^{1*}, 徐小平², 孙瑞胜¹

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏南京 210094; 2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对大量虚假关联鬼点导致的跟踪精度下降问题,提出了一种基于角度量测与目标运动特性融合的双级鬼点剔除与目标跟踪算法。该算法采取“先关联后估计”的协同定位策略,通过建立角度量测噪声与定位误差之间的映射关系,构建了视域栅格地图及能量积累矩阵;剖析了视域内真实目标与虚假关联鬼点间的空间几何分布特征,基于Hough变换的思想设计了一种新型剔除判据,实现了鬼点的一级粗剔除;通过研究目标定位模糊区散布特征及运动特性,利用运动参数辨识构建预测跟踪门,从运动学层面实现了鬼点的二级精剔除。实验结果表明,所提算法在目标跟踪精度方面相较于现有算法取得了显著提升,鬼点剔除率达到91.734%,有效解决了多目标跟踪中的虚假关联问题。

关键词:角度协同;多目标跟踪;虚假关联;鬼点目标

中图分类号:V248.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2026)01-227-11

Angle-association-based multi-information fusion for multi-target tracking

QIAN Menghao¹, CHEN Wei^{1*}, XU Xiaoping², SUN Ruisheng¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To mitigate the degradation of tracking accuracy induced by numerous false association ghost points, a dual-level ghost point elimination and target tracking algorithm integrating angular measurement with target motion characteristics was introduced. The proposed algorithm employed a cooperative localization strategy that prioritizes association before estimation. By establishing a mapping relationship between angular measurement noise and localization error, a field-of-view grid map and an energy accumulation matrix were constructed. Through a detailed analysis of the spatial geometric distribution characteristics of real targets and false association ghost points within the field of view, a novel elimination criterion based on Hough transform theory was developed, facilitating the primary coarse elimination of ghost points. Additionally, by examining the distribution characteristics of target localization ambiguity regions and motion features, a predictive tracking gate was constructed using motion parameter identification, enabling the secondary fine elimination of ghost points at the kinematic level. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm significantly enhances target tracking accuracy, achieving a ghost point elimination rate of 91.734%, thereby effectively addressing the false association problem in multi-target tracking.

Keywords: angle collaboration; multi-target tracking; false association; ghost targets

多目标跟踪是目标跟踪领域重要的组成部分,旨在通过一个或者多个传感器提供的测量信息实现目标的状态估计^[1]。在被动无源探测领域中,测向交叉定位通过部署多台高精度测向设备获取目标方位信息,利用测向线交汇原理实现目标空间位置估计^[2-4]。多巡飞弹协同目标跟踪系统通过光学红外导引等途径提取相对目标的视

线角信息,结合弹间信息共享可实现多弹协同测向目标定位^[5]。在实际应用中,系统面临测量原点不确定性的技术挑战,多路测向交叉定位形成大量的虚假定位点,并在时间序列中形成难以剔除的虚假航迹,严重影响了多目标跟踪精度性能^[2, 6-7]。随着巡飞弹和目标数量的增加,该类虚假点呈指数级增长。除此之外,复杂战场电磁

收稿日期:2025-03-10

基金项目:水下信息与控制重点实验室资助项目(2022-JCJQ-LB-030-09)

第一作者:钱梦浩(1995—),男,河南周口人,博士研究生,E-mail:mars_q96@163.com

*通信作者:陈伟(1987—),男,江苏盐城人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:wchen@njust.edu.cn

引用格式:钱梦浩,陈伟,徐小平,等.多信息融合角度关联多目标跟踪算法[J].国防科技大学学报,2026,48(1):227-237.

Citation:QIAN M H, CHEN W, XU X P, et al. Angle-association-based multi-information fusion for multi-target tracking[J]. Journal of

National University of Defense Technology, 2026, 48(1): 227-237.

环境下还会面临量测噪声和大量的杂波干扰,部分任务场景下甚至会出现诱饵目标。同时,测量误差会导致巡飞弹对同一目标的方向角射线经过交叉定位后,所得点位分散在一定范围内的定位模糊区内。这些模糊点位与虚假关联点相互叠加,显著增加了虚假点辨识的难度^[8]。当杂波和诱饵目标可观测时,其交叉定位点与真实目标呈现同样的几何表征,形成难以辨别的顽固鬼点,对目标跟踪精度提出了更高要求。因此如何快速、准确地识别并剔除虚假点位成为亟待解决的关键问题。

现有研究中,提高目标量测冗余度和分析“鬼点”与目标在几何复杂度上的差异性是实现“鬼点”粗剔除的主要手段。具体地,文献[9]提出基于最小距离的虚假点剔除算法,通过计算参考方向上两交叉点之间的距离,取距离最小的两交叉点作为干扰源的点集。文献[10]在最小距离交叉定位算法的基础上提出了一种基于最小距离门限判决的多传感器多目标交叉定位虚假点剔除算法。文献[11]纳入测量频率信息来提高数据关联结果的可靠性,在对目标进行跟踪时进行航迹管理能够有效抑制“鬼点”生成。文献[12]研究了仅角度量测下双站多目标被动跟踪问题,通过机动改变传感器位置,增加不同方位对目标的观测信息,降低数据关联不确定性来实现鬼点剔除,但对观测平台的机动能力和跟踪场景有较高要求。文献[13~14]利用Hough变换的思想在参数空间内进行能量积累矩阵构建,通过对能量单元进行投票实现对“鬼点”判别。该算法剔除虚假点准确率较高,但计算复杂度相对较高,且Hough变换在参数空间更适合于直线航迹检测,对于点位检测的效果不佳。文献[15]将模糊集思想引入Hough变换,利用模糊函数的隶属度作为参数空间的累积量,在局部和全局两个层次进行联合判决,通过模糊推理最终区分真假航迹。但是当杂波或诱饵目标出现时,交叉定位点位与真实目标有着同样几何复杂度,上述算法往往对其无能为力。文献[16]通过考虑同一目标在多站观测时的耦合关系,构建多传感器多目标测向方程进行目标定位,避免虚假点位的产生。文献[17]从鬼点航迹与目标轨迹的复杂性出发,提出了一种目标/鬼点分类器,并未实际解决虚假关联鬼点关联问题,可以作为鬼点剔除后的航迹优化参考。

因此,本研究针对复杂环境下多弹多目标角度协同跟踪系统的虚假关联鬼点问题,通过剖析

视域内真实目标与虚假关联鬼点间的空间几何分布特征,研究目标定位模糊区散布特征及运动特性,从探测视域性、目标同源性和运动一致性三方面出发,设计一套“先关联后估计”策略下多信息融合角度关联多目标跟踪算法,实现虚假关联鬼点的有效剔除,提高多目标跟踪精度。

1 问题描述

1.1 多弹角度协同定位模型

对于多巡飞弹多目标跟踪系统而言,目标与巡飞弹观测平台的分布关系不影响方位角及相对定位关系,但根据场景设想,并且避免角度变化剧烈时出现计算奇异问题,需保证目标角度观测值域为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。假设该场景中目标的位置坐标为 $\mathbf{X}_T = [x_T, y_T, z_T]^T$,第*i*个巡飞弹成员的坐标为 $\mathbf{U}_i = [x_i, y_i, z_i]$,观测量为第*i*个巡飞弹与目标间的俯仰角 φ_i 和方位角 β_i ,具体表达式分别为:

$$\varphi_i = \arctan \left[\frac{z_T - z_i}{\sqrt{(x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2}} \right] \quad (1)$$

$$\beta_i = \arctan \left[(y_T - y_i) / (x_T - x_i) \right] \quad (2)$$

考虑双弹角度协同目标定位场景,以 xOy 平面作为水平面,建立三维空间笛卡儿坐标系,如图1所示。

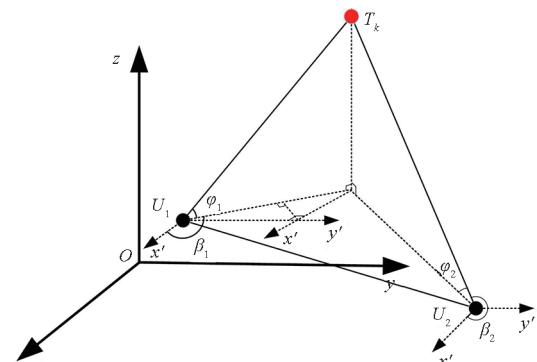


图1 多站单目标定位跟踪模型

Fig. 1 Multi-station angle collaborative target localization model

当巡飞弹坐标已知,可以对式(1)~(2)进行整理得:

$$\begin{cases} x_T \cos \beta_i + y_T \sin \beta_i - z_T \cot \varphi_i = x_i \cos \beta_i + y_i \sin \beta_i - z_i \cot \varphi_i \\ x_T \sin \beta_i - y_T \cos \beta_i = x_i \sin \beta_i - y_i \cos \beta_i \end{cases} \quad (3)$$

对于多巡飞弹多目标跟踪系统而言,若巡飞弹数目为*n*且满足*n*≥2,则式(3)可以写为:

$$\mathbf{A}_i \mathbf{X}_T = \mathbf{b}_i \quad (4)$$

式中, \mathbf{A}_i 和 \mathbf{b}_i 具体形式如下:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos\beta_i & \sin\beta_i & -\cot\varphi_i \\ \sin\beta_i & -\cos\beta_i & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} x_i \cos\beta_i + y_i \sin\beta_i - z_i \cot\varphi_i \\ x_i \sin\beta_i - y_i \cos\beta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时可以得到求解目标位置矩阵的最小二乘表达式:

$$\mathbf{X}_T = [x_T, y_T, z_T]^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (7)$$

式中, \mathbf{A} 和 \mathbf{b} 是 \mathbf{A}_i 和 \mathbf{b}_i 按下标从小到大按行排序组合形成的矩阵。

1.2 多弹角度协同多目标关联鬼点分析

当存在多个目标时,每枚巡飞弹获得多个角度信息,测量原点不确定问题将产生大量的虚假点。协同测向关联交叉定位可以将三维定位问题拆解成二维定位(xOy 平面)问题和一维定位问题^[13, 16]。在三维空间中,利用两枚巡飞弹的方位角和俯仰角可完成虚假点的剔除,但存在一些特殊情况,如巡飞弹与目标处于同一平面、交叉点位相对巡飞弹的俯仰角都相等或十分接近时,在该方法下剔除虚假点基本失效。为了便于直观展示巡飞弹跟踪视域变化及鬼点生成与分布特性,本研究考虑在 xOy 平面上巡飞弹位置为 $U_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), n 为集群系统巡飞弹成员总数,目标位置为 $T_k(x_k, y_k)$ ($k = 1, 2, \dots, m$), m 为跟踪目标总个数。以 3 枚巡飞弹跟踪 3 个目标为例,图 2 给出二维 xOy 平面上典型任务场景虚假关联示意图。通过分析鬼点出现的主要因素,根据不同应用场景采用不同的鬼点剔除算法,可以降低其对多目标跟踪精度的影响。

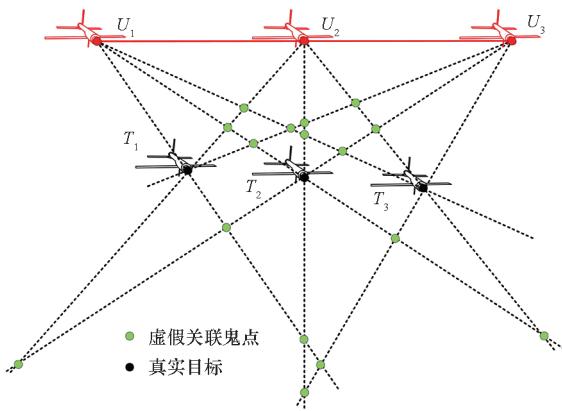


图 2 多站多目标系统虚假关联场景

Fig. 2 False correlation scenario for multi-station multi-target system

一般地,假定多巡飞弹集群协同多目标跟踪

系统中巡飞弹数目 $n > 2$,运动目标数目为 m ,巡飞弹跟踪视域内所有目标均可以被实时检测且所有角度观测均来自目标。在每个观测周期内,将巡飞弹两两分组,产生的交叉点数目最大为 $N = C_n^2 \cdot C_m^1 \cdot C_m^1$,其中有 $m \cdot C_n^2$ 个真实交叉点(与目标对应的交叉点),对应每个目标的交叉点数为 C_n^2 ,不考虑量测误差时这些交叉点是重合的。根据巡飞弹和目标的数量关系,鬼点处交叉点分布情况如下:

- 1) $n > m$, 鬼点处最大交叉点数为 C_m^2 ;
- 2) $n = m$, 鬼点处最大交叉点数为 C_m^2 , 并且此种情况的点只可能存在一个;
- 3) $n < m$, 鬼点处最大交叉点数为 C_n^2 , 并且此种情况的点可能存在多个。

2 多弹协同多目标跟踪鬼点剔除算法

基于上述分析,本节将从视域性、同源性和一致性三方面开展多目标角度关联下虚假鬼点检测与剔除算法设计,具体工作流程图如图 3 所示。

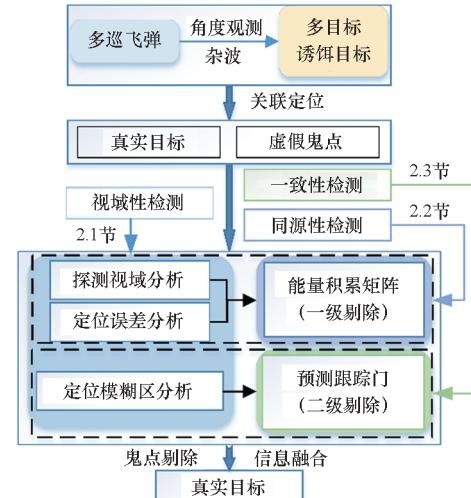


图 3 多目标跟踪鬼点剔除算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the multi-target tracking ghost point elimination algorithm

2.1 杂波环境下栅格地图构建

2.1.1 探测视域分析

根据巡飞弹位置、探测距离、探测角度等参数,构建巡飞弹模糊探测视域,可以对落在探测视域之外的虚假关联点进行初步剔除,降低计算复杂度的同时降低鬼点对目标跟踪精度的影响。在多巡飞弹多目标跟踪系统中,将集群边界巡飞弹成员所处位置作为坐标原点 O ,其中前向探测方向作为 y 轴,构建相对直角坐标系。两枚巡飞弹之间的距离为定位基线长度 d ,

巡飞弹的最大前向探测距离记为 r , 以巡飞弹位置为基准, 确定二维 xOy 平面初级模糊可定位视域边界:

$$\begin{cases} S_l = \bar{x}_{\min} - r \cos \theta \\ S_r = \bar{x}_{\max} + r \cos \theta \\ S_u = \bar{y}_{\max} \\ S_b = \bar{y}_{\min} + r \end{cases} \quad (8)$$

其中, S_l 和 S_r 为 x 轴向视域边界, S_u 和 S_b 为 y 轴向视域边界, \bar{x}_{\min} 和 \bar{y}_{\min} 为巡飞弹坐标集合的最小值, \bar{x}_{\max} 和 \bar{y}_{\max} 为巡飞弹坐标集合的最大值。记目标关联点位坐标为 $\hat{T}_k(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ ($k = 1, 2, \dots, N$), 则关联交叉点位落入初级模糊可定位视域的判据为

$$\begin{cases} S_l \leq \hat{x}_k \leq S_r \\ S_b \leq \hat{y}_k \leq S_u \end{cases} \quad (9)$$

2.1.2 多弹角度协同定位误差分析

多弹协同目标定位精度和角度测量误差直接相关, 图 4 给出了二维平面内角度协同目标观测模型, 用于分析角度误差和定位精度间的耦合关系。两枚巡飞弹的角度测量信息如下:

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_1 = \theta_1 + v_1 \\ \tilde{\theta}_2 = \theta_2 + v_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: (θ_1, θ_2) 为真实方位角; $(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$ 为测量方位角; (v_1, v_2) 为测量噪声。

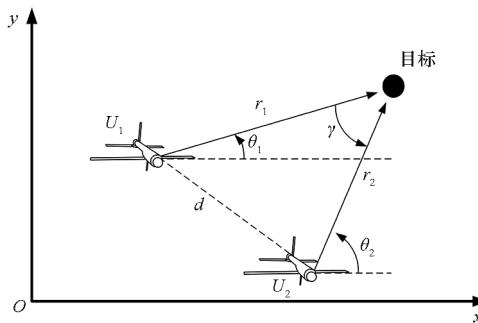


图 4 二维平面内角度协同目标观测模型

Fig. 4 Two-dimensional plane angle-collaborative target observation model

设 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为两枚巡飞弹的真实位置, (\bar{x}_T, \bar{y}_T) 为含有误差的目标位置信息, γ 为两枚巡飞弹相对于目标的方位角夹角, 且有 $\gamma = \theta_2 - \theta_1$ 。如图 4 所示, 其方位位置关系如下:

$$\begin{cases} \tan \theta_1 = (y_T - y_1) / (x_T - x_1) \\ \tan \theta_2 = (y_T - y_2) / (x_T - x_2) \end{cases} \quad (11)$$

同时, 基于三者相对位置关系可以解出目标坐标 (x_T, y_T) 。

$$\begin{cases} x_T = \frac{(y_1 - y_2) \cos \theta_1 \cos \theta_2 + x_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1 - x_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \\ y_T = \frac{(x_2 - x_1) \sin \theta_1 \sin \theta_2 - y_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + y_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \end{cases} \quad (12)$$

将上式在 (θ_1, θ_2) 处进行泰勒展开并忽略二阶以上高阶项, 可近似得到位置误差表达式。

$$\begin{cases} \delta(x_T) \approx \frac{\partial x_T}{\partial \theta_1} \delta(\theta_1) + \frac{\partial x_T}{\partial \theta_2} \delta(\theta_2) \\ \delta(y_T) \approx \frac{\partial y_T}{\partial \theta_1} \delta(\theta_1) + \frac{\partial y_T}{\partial \theta_2} \delta(\theta_2) \end{cases} \quad (13)$$

根据几何关系计算巡飞弹到目标的距离(r_1 , r_2), 以 r_2 为斜边构建直角三角形, 构建几何关系有

$$\begin{cases} r_2 \sin \theta_2 = r_1 \sin \theta_1 + (y_2 - y_1) \\ r_2 \cos \theta_2 = r_1 \cos \theta_1 - (x_2 - x_1) \end{cases} \quad (14)$$

进而可以解得

$$r_1 = \frac{(y_2 - y_1) \cos \theta_2 + (x_2 - x_1) \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (15)$$

$$r_2 = \frac{(y_1 - y_2) \cos \theta_1 + (x_2 - x_1) \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (16)$$

计算各项偏微分, 式(13)可以改写为

$$\begin{cases} \delta(x_T) = \frac{r_1 \cos \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \delta(\theta_1) - \frac{r_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \delta(\theta_2) \\ \delta(y_T) = \frac{r_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \delta(\theta_1) - \frac{r_2 \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \delta(\theta_2) \end{cases} \quad (17)$$

目标估计位置误差为

$$\delta_p = \sqrt{\delta^2(x_T) + \delta^2(y_T)} \quad (18)$$

2.1.3 角度观测误差下目标定位模糊区分析

若不考虑巡飞弹的位置误差, 并假设两枚巡飞弹(或单枚巡飞弹在不同时刻)的最大测向误差相同且均为 $\Delta\theta_{\max}$, 则目标的真实位置应该在巡飞弹探测扇形区相交的四边形 $ABCD$ 内, 如图 5 所示。

测向误差是在 $\pm \Delta\theta_{\max}$ 范围内的任意值, 因此目标的真实位置可能出现在四边形 $ABCD$ 区域的任意点上, 且该四边形区域被称为定位模糊区。由正弦定理可知, 各边与其所对角的正弦值的比值相等。当基线距离 d 一定时, 利用三角形余弦定理, 可以得到边 CU_1 、 BU_1 、 AU_1 长度如下:

$$L_{CU_1} = d \sin(\theta_2 + \Delta\theta_{\max}) / \sin(\gamma + 2\Delta\theta_{\max}) \quad (19)$$

$$L_{BU_1} = d \sin(\theta_2 - \Delta\theta_{\max}) / \sin \gamma \quad (20)$$

$$L_{AU_1} = d \sin(\theta_2 + \Delta\theta_{\max}) / \sin(\gamma - 2\Delta\theta_{\max}) \quad (21)$$

四边形 $ABCD$ 可近似视为轴对称图形, 其面

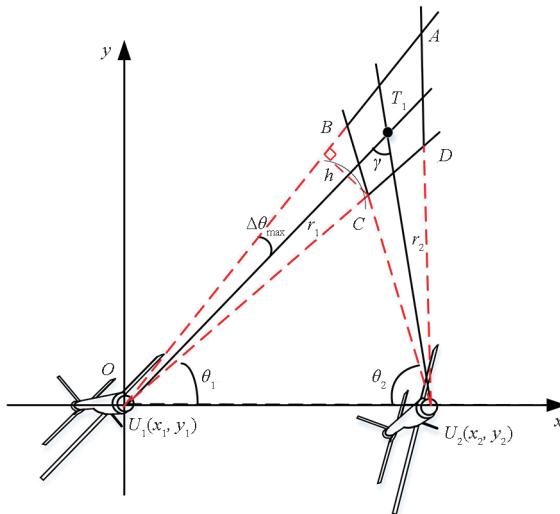


图 5 双弹角度协同定位模糊区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of dual station angle collaborative positioning in fuzzy area

积等于三角形 ABC 的面积的 2 倍。三角形 ABC 的面积计算可以视作将 AB 作为底边, 底边对应的高可以用相应的一段圆弧来近似, 即

$$h = 2L_{CU_1}\Delta\theta_{\max} = \left| \frac{2d\Delta\theta_{\max}\sin(\theta_2 + \Delta\theta_{\max})}{\sin(\gamma + 2\Delta\theta_{\max})} \right| \quad (22)$$

若考虑 $\Delta\theta_{\max}$ 为小量, 忽略其在三角函数计算中的影响, 则可简化计算, 即四边形 $ABCD$ 的面积可近似表示为

$$S_{ABCD} = 2S_{ABC} = \frac{4d^2\sin\theta_1\sin\theta_2\Delta\theta_{\max}^2}{\sin^3(\theta_2 + \theta_1)} \quad (23)$$

可见, S_{ABCD} 的大小除与基线距离 d 、测向误差 $\Delta\theta_{\max}$ 有关外, 还与弹目相对测向值 θ_1 和 θ_2 有关。一般来说, $\Delta\theta_{\max}$ 取决于巡飞弹红外测向的性能。在 $\Delta\theta_{\max}$ 一定的情况下, 基线距离 d 越小, 则 S_{ABCD} 也越小。如果基线距离 d 一定, 则 S_{ABCD} 的大小主要取决于 θ_1 和 θ_2 。

在实际巡飞弹集群应用中, 巡飞弹间的基线是可以获取并进行编队调整和维持的, 可以视为先验信息。但非合作目标的观测角度是随目标运动而动态随机变化的, 属于未知观测信息且包含观测误差, 定位模糊区的面积及分布受到观测角度的影响。考虑当基线距离一定时, 令

$$W = \sin\theta_1\sin\theta_2/\sin^3(\theta_1 + \theta_2) \quad (24)$$

要使 S_{ABCD} 最小, 应满足 $\partial W/\partial\theta_1 = 0$, $\partial W/\partial\theta_2 = 0$, 整理可解得

$$\tan\theta_1 = \tan\theta_2 = \frac{1}{3}\tan(\theta_2 + \theta_1) \quad (25)$$

当基线距离一定时, 只有在底角满足 $\theta_1 = \theta_2 = \pi/6$ 的条件下, 对应的定位模糊区的面积才

为最小值, 此时交会角 $\gamma = 120^\circ$ 。此时定位模糊区的面积可以改写为

$$S_{ABCD} = \frac{4d^2\sin\theta_1\sin\theta_2\Delta\theta_{\max}^2}{\sin^3(\theta_2 + \theta_1)} \approx 1.54d^2\Delta\theta_{\max}^2 \quad (26)$$

去除鬼点的依据是重合点落入相同的积累单元, 因此需要构建栅格地图对定位视域进行切分, 生成若干栅格积累单元。考虑到动态定位拓扑下目标定位模糊区尺寸会发生改变, 不利于目标在时间序列上的连续性, 可考虑基于最优拓扑构型和修正参数设计出栅格单元的先验参数 g 。栅格积累单元尺寸大小与目标定位模糊区散布面积相关, 在拟选取矩形栅格单元的设想下, xOy 平面根据测向交叉定位模糊区面积有

$$g_{xy} = \sqrt{S_{ABCD}} = \eta d\Delta\theta_{\max} \quad (27)$$

式中, $\eta > 1$ 为尺寸调整因子, 高度通道栅格尺寸 g_z 根据弹目高程进行切分, 不同栅格疏密程度与计算复杂度相关, 可根据需求进行设计。

2.2 能量积累矩阵下一级鬼点剔除方法

通过统计视域地图中关联点位的栅格分布情况, 构建能量积累矩阵, 并结合 1.2 节所述鬼点与真实目标的几何分布特性, 可实现虚假关联鬼点的一级剔除。当按照上述规则进行索引计算时, 点位与栅格尺寸不完全是倍数关系, 需要执行取整操作获取有效既定索引。具体地, 落入初级模糊可定位视域的疑似目标的坐标记为 $\hat{T}_k(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$, 记二维 xOy 平面内的横向与纵向视域索引分别为 I_{row} 和 I_{col} , 索引计算规则设计如下:

$$\begin{cases} I_{\text{row}} = \text{round}[(\hat{x}_k - S_1)/g] \\ I_{\text{col}} = \text{round}[(\hat{y}_k - S_b)/g] \end{cases} \quad (28)$$

当关联点位落在视域地图边界时, 取整操作使得栅格地图边界索引未必落入视域内, 需执行填充处理, 对超出地图边界的索引编号进行约束, 避免点位提取失效。同时在观测误差存在的情况下, 真实目标的关联点位落点会形成一定范围的定位模糊区。栅格单元的划分是固定且有序的, 同一目标的定位模糊区内的交叉点位可能分散于不同栅格中, 从而导致能量积累耗散问题。因此, 为避免目标模糊区位于栅格边界时单一栅格单元无法涵盖所有目标疑似点, 进而造成栅格索引下目标关联点位统计不完全的问题, 可构建泛化栅格地图, 引入邻近栅格联合统计以提升目标能量积累的鲁棒性。具体地, 记二维 xOy 平面内的横向与纵向泛化栅格索引为 \hat{I}_{row} 和 \hat{I}_{col} , 记行索引最大值为 I_{max} , 以行索引为例设计泛化规则:

$$\hat{I}_{\text{row}} = \begin{cases} [I_{\text{row}}, I_{\text{row}} + 1], & I_{\text{row}} = 1 \\ [I_{\text{row}} - 1, I_{\text{row}}], & I_{\text{row}} = I_{\max} \\ [I_{\text{row}} - 1, I_{\text{row}}, I_{\text{row}} + 1], & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

在视域平面中对测向交叉定位的离散点位进行排布,同时对栅格单元累积的离散点位进行统计投票。其中,对应目标的交叉点理论上是重合的,则点位将落在相同的积累单元,对每个积累单元的投票结果进行积累,将会得到不同积累单元的能量矩阵。显然,重合点数越多,积累值越高,能量值越大。在每个观测周期,双弹协同角度交叉定位下每个目标总能得到 C_n^2 个交叉点,这些交叉点是相互重合的。而由于角度错误关联交叉得到的虚假定位点将分散在整个探测视域,其分布特性由巡飞弹的空间布局及目标的位置共同决定。无论巡飞弹和目标的相对位置如何分布以及传感器的数量如何选取,包含正确角度关联交叉点的目标处点位总是最多的,因此,要从众多交叉点中得到属于目标的量测,可以根据交叉点相互重合的情况来判断。已知目标真实交叉点重合且重合数为 C_n^2 ,那么根据积累结果,可以分两种情况进行判断:

1) 当交叉点不重合或者相互重合的数目小于 C_n^2 时,交叉点判断为鬼点,可以剔除。

2) 当相互重合的交叉点的数目等于 C_n^2 ,且存在 m 个这样的重合点,则该 m 个点位判断为目标点;如果存在 $m + m^*$ 个这样的重合点,则其中仍存在 m^* 个虚假点,还需要进行判断。

记积累单元能量矩阵统计值为 p ,疑似目标簇成立的最小能量值为 $p_T = C_n^2 \cdot c$,其中 $c (c < 1)$ 为缩放经验因子。若 $p < p_T$,该簇不成立;若 $p \geq p_T$,判定该簇为疑似目标点簇。

2.3 预测跟踪门下二级鬼点剔除方法

二级点簇剔除的核心思想是基于历史轨迹进行目标运动特性辨识,并结合目标定位模糊区与当前运动特性计算目标散布区,进而生成二级预测跟踪门。落在预测跟踪门内的点簇即为连续时间序列下的有效目标交叉定位点,落在预测跟踪门之外的目标是量测噪声导致的虚检目标,在航迹信息层面将不服从运动约束。因此在合理设计条件下,虚检目标问题可通过运动特征的预测跟踪门进一步消除。具体而言,目标散布区的大小和形状不仅取决于定位模糊区的几何特性,还与目标的航向和航速密切相关。在目标航速和航向未知的情况下,目标可能以定位模糊区内的任意一点为起点,在一定的航速范围内进行任意方向

的机动。通过对目标当前的运动参数进行辨识,假设目标当前速度为 v_d ,飞行采样时间为 t ,目标最大航速为 v_m ,则目标最大机动距离为

$$L_t = v_m t \quad (30)$$

以定位模糊区边界上某点为圆心,以 L_t 为半径画圆,即为以该点为中心的目标机动散布圆,所有目标机动散布圆外沿构成一个扩展的封闭边界,近似等效于一个椭圆,如图 6 所示。图中, U_1 和 U_2 是巡飞弹位置,将 U_1 所处位置作为坐标原点 O ,使 U_2 处于 x 轴正半轴上,则 U_1 和 U_2 之间的距离 d 为定位基线长度, $\Delta\theta_{\max}$ 为测向误差, θ_1 和 θ_2 为巡飞弹和目标间的测向角, γ 为交叉定位交会角,四边形 $ABCD$ 为定位模糊区, T 为目标散布中心,也即当前时刻交叉定位点。

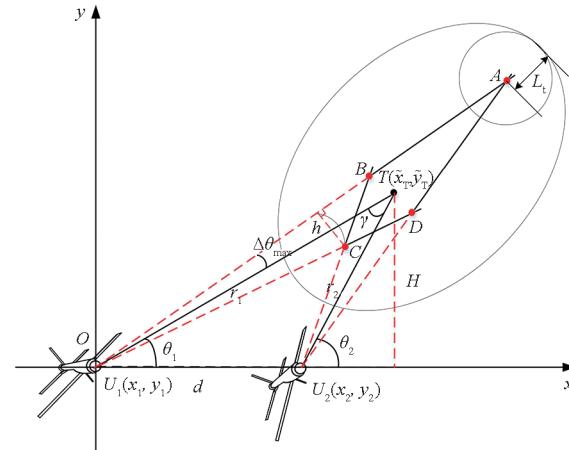


图 6 双弹角度协同定位预测跟踪门设计示意图

Fig. 6 Design schematic diagram of dual missile angle collaborative positioning prediction tracking gate

记 L_a 和 L_b 分别为椭圆目标散布区的长短轴,其中短轴近似为长轴的一半,长轴近似为当前目标位置到定位模糊区纵向端点的距离与目标预测步长之和,其近似计算公式如下:

$$L_a = 2L_{AB} \sin(\gamma/2 - \Delta\theta_{\max}) + 2L_t \\ = \frac{ds \sin(\theta_1 + \Delta\theta_{\max})}{\sin\gamma} \frac{\sin(2\Delta\theta_{\max})}{\cos(\gamma/2 - \Delta\theta_{\max})} + 2v_m t \quad (31)$$

可见,在目标最大航速 v_m 一定的情况下,椭圆目标散布区的几何特征与测向误差 $\Delta\theta_{\max}$ 、测向方位角 θ 和飞行采样时间 t 有关。选取当前交叉定位坐标作为椭圆目标散布区圆心,结合辨识计算得到椭圆目标散布区的长短轴参数,即可生成椭圆目标散布区方程。记目标测向交叉定位的坐标为 (x_T, y_T) ,则点落在椭圆内的判据可记为

$$(x - x_T)^2 / L_a^2 + (y - y_T)^2 / L_b^2 < 1 \quad (32)$$

考虑目标运动态势,散布区将存在一定的方

向性,即目标散布椭圆将存在一定的旋转角度 α 。对于带旋转角度 α 的椭圆来说,点落在椭圆内的通用判据可记为

$$[(x - x_T) \cos \alpha + (y - y_T) \sin \alpha]^2 / L_a^2 + [(x - x_T) \sin \alpha - (y - y_T) \cos \alpha]^2 / L_b^2 < 1 \quad (33)$$

式中,旋转角度 α 可以由目标当前时刻与下一时刻预测位置信息进行差分计算得到。

$$\alpha = \arctan[(y_T - y'_T) / (x_T - x'_T)] \quad (34)$$

综上,算法 1 给出了所提算法设计思想及步骤伪码。

算法 1 多角度关联下的鬼点识别与剔除

Alg. 1 Ghost recognition and remove based on multiple angel association

输入:巡飞弹位置集、装订探测参数集、观测量集

输出:目标关联点位

Step 1: 构建视域地图,确定有效点位

根据巡飞弹当前位置与探测参数,构建视域地图,根据式(8)确定初级模糊可定位视域边界

根据式(19)~(23)、式(26)确定定位模糊区

Step 2: 构建能量积累矩阵,进行一级点位粗剔除

划分视域栅格地图,结合定位模糊区确定栅格尺寸,根据式(28)确定索引计算规则

根据式(29)对处于地图边缘的栅格索引进行填充处理,设计栅格遍历规则

结合 Hough 变换思想,生成能量积累矩阵,设计疑似目标簇确认判据,提取疑似目标点位

Step 3: 构建预测跟踪门,进行关联点位二级精剔除

结合定位误差分析及目标运动特性,根据式(31)、式(34)计算椭圆预测跟踪门参数

设计点落在椭圆内通用判据,剔除一级疑似目标点位中未落在跟踪门内的点位,获取精剔除点位,即为算法输出目标关联点位

3 仿真实验

3.1 仿真条件

在仿真设计中,设定 4 枚巡飞弹在悬停状态下对 6 个敌方目标实施机动跟踪,选取文献[14]作为对比算法,验证所提算法的有效性和优越性。巡飞弹配载红外探测载荷的前向探测距离为 $r = 5000$ m,采样周期 $T = 0.1$ s,测向误差为 $\delta(\theta_1) = \delta(\theta_2) = 0.1^\circ$ 。每个周期的杂波均匀、随机地分布在巡飞弹视域空间内,记给定单位杂波数为 $\lambda = 5$,单位面积杂波参数为 $\rho = \lambda \times 10^{-6}$,即每 1×10^{-6} m² 内产生 λ 个杂波。假定巡飞弹悬停跟踪位置为: [0 m, 500 m, 7 000 m]、[900 m, 600 m,

7 000 m]、[2 000 m, 850 m, 7 000 m]、[3 000 m, 500 m, 7 000 m],目标机动模式包括直线运动和转弯运动,初始时刻运动参数见表 1,具体多目标跟踪任务场景设定如图 7 所示。选取最优子模式分配(optimal sub-pattern assignment, OSPA)距离作为多目标跟踪精度评价指标,其实质是衡量估计结果同真实情况之间的差异度。具体地,选取 OSPA 指标计算的截止参数为 100 m,阶数为 1^[18~19]。

表 1 任务场景下多目标初始运动参数

Tab. 1 Initial motion parameters of multiple targets in task scenarios

序号	初始位置/m	初始速度/(m/s)
1	[800, -1 500, 8 000]	[50, 10, 0]
2	[200, -2 800, 7 900]	[60, 30, 4]
3	[710, -250, 7 850]	[80, 5, 2]
4	[400, -1 800, 8 050]	[75, 10, -4]
5	[2 800, -2 700, 7 800]	[-80, -8, 1]
6	[0, -1 000, 7 950]	[80, -20, -2]

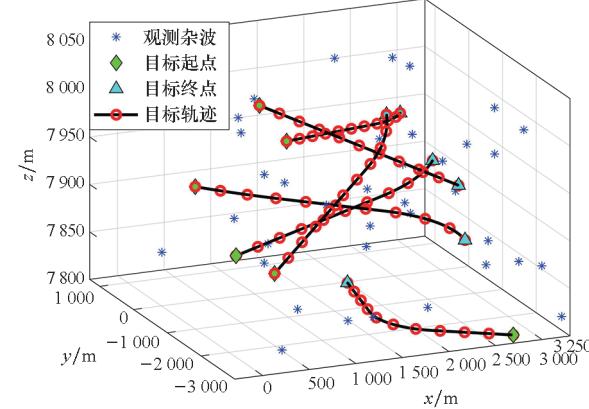


图 7 多机动目标跟踪任务设定

Fig. 7 Task setting of multi-maneuvering targets tracking

3.2 仿真结果

图 8~9 分别呈现了系统整体跟踪性能的 OSPA 距离与各轴跟踪分量的轨迹对比结果,跟踪性能及误差统计见表 2。从跟踪精度来看,所提算法在各轴分量跟踪误差及全程 OSPA 距离上均显著优于传统方法。具体而言,所提算法一级跟踪 OSPA 距离为 2.640 m,二级跟踪 OSPA 距离为 1.018 m,整体跟踪精度提升了约 61.44%。值得关注的是,在相同实验场景下,文献[14]对比算法的平均 OSPA 距离为 7.644 m,本文算法通过双级优化使整体跟踪精度提升 86.68%,证明了

所提的双级鬼点剔除与目标跟踪算法在复杂多目标场景下的有效性与优越性。

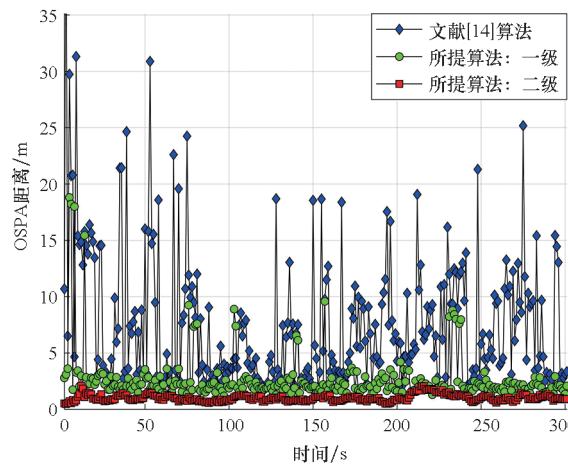
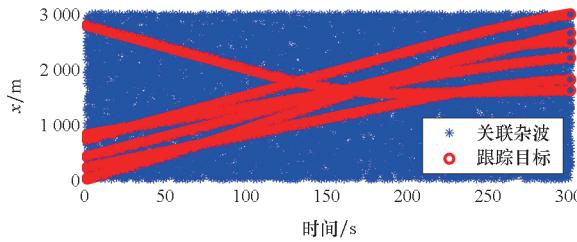


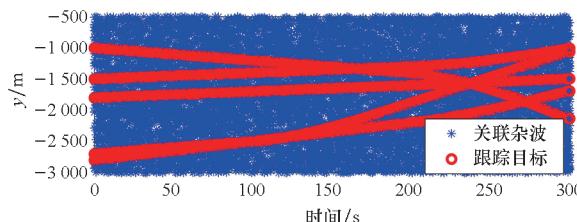
图 8 全程 OSPA 性能结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of OSPA performance results throughout the entire process



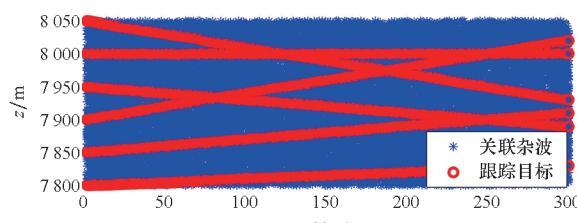
(a) x 轴跟踪分量

(a) Tracking components in x -axis



(b) y 轴跟踪分量

(b) Tracking components in y -axis



(c) z 轴跟踪分量

(c) Tracking components in z -axis

图 9 多目标跟踪结果示意图

Fig. 9 Schematic diagram of multi-target tracking results

为验证所提算法多级目标剔除策略的有效性,选取时刻 $t = 100$ s 作为典型场景进行分析,该时刻下多目标剔除及跟踪效果见图 10~12,表 3

表 2 多目标跟踪性能及误差统计

Tab. 2 Multi-target tracking performance and error statistics

单位: m

参试算法	x	y	z	OSPA 距离
文献[14]算法	3.377	4.520	5.821	7.644
所提算法: 一级	0.856	1.293	1.592	2.640
所提算法: 二级	0.437	0.767	0.212	1.018

给出了不同算法下的鬼点剔除效能与统计结果。具体地,图 10 为离散时刻下多目标跟踪场景示意,黑色实线表示理论目标轨迹,红色空心圆圈代表栅格地图下符合能量阈值筛选的一级疑似目标,绿色实心圆表征通过预测跟踪门下二级剔除目标。图 11 重点展示了二级预测跟踪门下的疑似目标簇剔除过程,红色点表示落入二级预测门内的有效目标,可观察到一级剔除已有效去除部分虚假点,但仍可能存在符合点簇生成规则的疑似目标。为此,二级处理阶段基于目标运动特性构建预测跟踪门(见图 12),对跟踪门外疑似目标点簇进行二级剔除。其中,菱形标记表示上一时刻跟踪门中心,黄色空心圆为当前时刻预测中心,

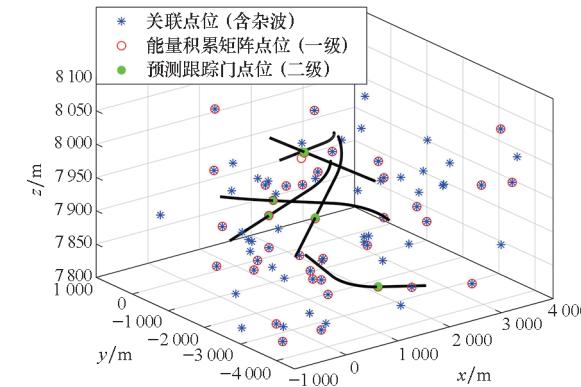


图 10 离散时刻下多目标跟踪场景

Fig. 10 Multi-target tracking scene at a discrete time

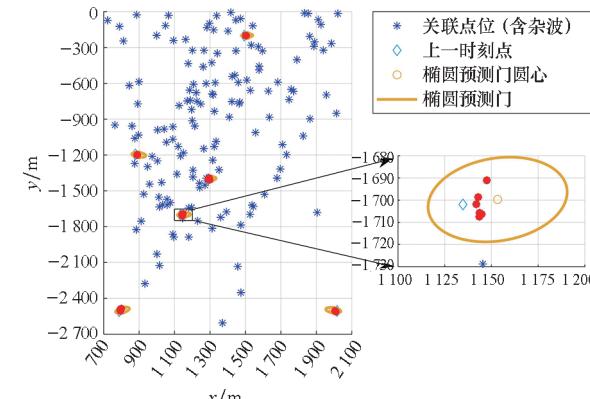
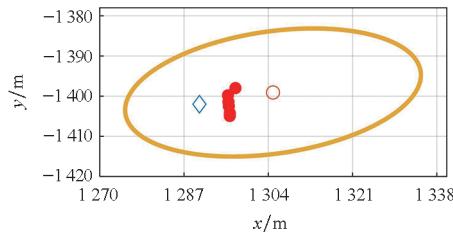


图 11 离散时刻下二级预测门跟踪场景

Fig. 11 Tracking scene of the second-order prediction gate at a discrete time

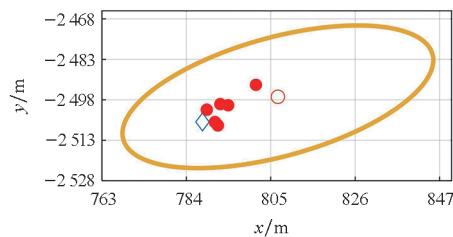
gate at a discrete time

红色点表示通过二级验证的有效目标。表3的量化对比数据显示,视域内包含杂波的关联点位总数约为1476,一级能量积累矩阵剔除至约592,一级剔除率达59.890%;二级预测跟踪门剔除至约122,二级剔除率为91.734%。从跟踪有效性



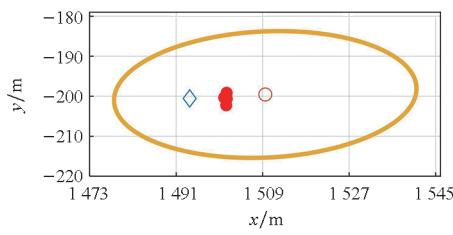
(a) 目标 1

(a) Target 1



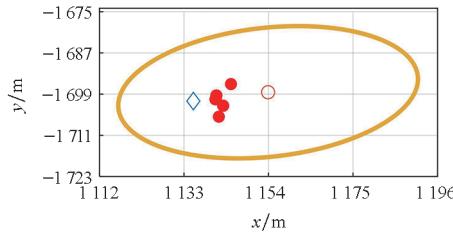
(b) 目标 2

(b) Target 2



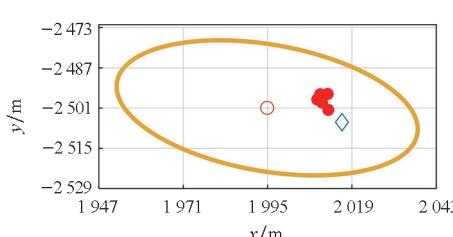
(c) 目标 3

(c) Target 3



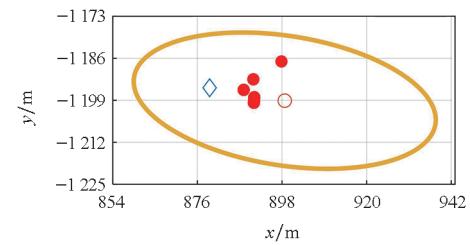
(d) 目标 4

(d) Target 4



(e) 目标 5

(e) Target 5



(f) 目标 6

(f) Target 6

图 12 预测门内各目标跟踪结果

Fig. 12 Tracking results of targets in prediction gates

表 3 多弹协同多目标鬼点剔除效能

Tab. 3 Multi-missile cooperation multi-target ghost point elimination performance

参试算法	花费时间/s	点位数量	点位剔除比/%
文献[14]算法	0.43	150	89.837
所提算法:一级	0.11	592	59.890
所提算法:二级	0.51	122	91.734

的角度来看,各级算法均在不同程度上实现了虚假关联目标剔除。在时间复杂度维度,所提算法增加了18.6%的计算开销(从0.43 s增至0.51 s),鬼点剔除率从89.837%提升至91.734%,目标跟踪精度提升约86.68%,该性能证明了在虚假关联点位和杂波耦合环境下所提算法的有效性与优越性。

除此之外,为了探究算法设计中不同栅格尺寸下所提算法的影响,图13给出了不同参数变化下的算法性能对比结果。由图分析可知,栅格尺寸过小,积累单元的点位能量积累不足,

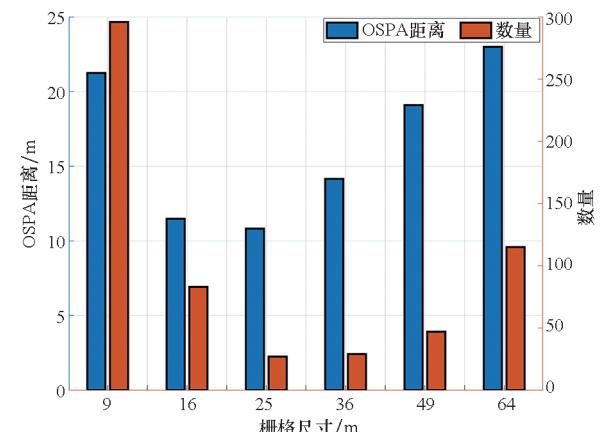


图 13 不同栅格尺寸下点位剔除性能对比

Fig. 13 Comparison of point removal performance under different grid sizes

容易造成有效关联点位丢失,出现目标漏检的同时带来更大的遍历压力。栅格尺寸过大时,积累单元里可能会涵盖杂波或虚假关联点位,导致目标点位虚检率过高,最终影响目标跟踪精度和点位剔除效率。因此,在算法设计中需结合定位误差进行参数装订,有利于提高算法的鲁棒性和精度。

4 结论

针对多目标被动无源跟踪中因大量虚假关联鬼点导致的跟踪精度下降问题,提出了一种基于角度量测与目标运动特性融合的双级鬼点剔除与目标跟踪算法。算法采用“先关联后估计”跟踪策略,通过分析角度量测噪声与目标定位误差之间的映射关系,构建了视域栅格地图及能量积累矩阵,并基于鬼点几何分布特征设计了有效的剔除判据,完成了鬼点一级粗剔除。同时,结合目标定位模糊区及目标运动特性,利用运动参数辨识构建了预测跟踪门,实现了鬼点二级精剔除。实验结果表明,所提算法显著提升了目标跟踪精度,鬼点剔除率达到91.734%,有效解决了多目标跟踪中的虚假关联问题。

参考文献(References)

- [1] 李天成, 谢昱昕, 李固冲, 等. 面向多目标跟踪的数据关联方法研究综述[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(1): 10–31.
LI T C, XIE Y X, LI G C, et al. A survey on data association approaches to multi-target tracking [J]. Radar Science and Technology, 2025, 23 (1): 10 – 31. (in Chinese)
- [2] 李猛, 王智, 李元实, 等. 角度传感器网络多目标定位的数据关联算法[J]. 电子学报, 2014, 42 (10): 1887–1893.
LI M, WANG Z, LI Y S, et al. Data association in multi-target localization using bearing-only sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(10): 1887 – 1893. (in Chinese)
- [3] 朱青松, 谭安胜, 王新为, 等. 舰载无人机双机无源定位机理与战术运用分析[J]. 电光与控制, 2015, 22(8): 23–28.
ZHU Q S, TAN A S, WANG X W, et al. Principle and tactics application analysis of passive location of dual shipborne UAVs [J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(8): 23 – 28. (in Chinese)
- [4] 钟建林, 刘方, 石章松, 等. 基于测向交叉定位的空舰导弹协同攻击方法[J]. 航空兵器, 2019, 26(4): 47–53.
ZHONG J L, LIU F, SHI Z S, et al. Coordinated attack method for air-to-ship missiles based on beam-crossing locating [J]. Aero Weaponry, 2019, 26 (4): 47 – 53. (in Chinese)
- [5] QIAN M H, CHEN W, SUN R S. A maneuvering target tracking algorithm based on cooperative localization of multi-UAVs with bearing-only measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 9516911.
- [6] 李松洲, 周荻, 杜润乐, 等. 多传感器多目标被动跟踪的“鬼点”形成条件[J]. 兵工学报, 2022, 43 (12): 3103–3112.
LI S Z, ZHOU D, DU R L, et al. Conditions for forming ghost nodes in multi-sensor multi-target passive tracking [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(12): 3103 – 3112. (in Chinese)
- [7] FENG R Y, DE GREEF E, RYKUNOV M, et al. Multipath ghost recognition and joint target tracking with wall estimation for indoor MIMO radar [J]. IEEE Transactions on Radar Systems, 2024, 2: 154 – 164.
- [8] 谭安胜, 朱青松, 王新为, 等. 舰载无人机双机无源定位有效区分析模型[J]. 电光与控制, 2015, 22(9): 1–6.
TAN A S, ZHU Q S, WANG X W, et al. An effective area analysis model for passive locating of dual shipborne UAVs [J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(9): 1 – 6. (in Chinese)
- [9] 李彬彬, 冯新喜, 王朝英, 等. 排除虚假交叉定位点的新方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 190–193.
LI B B, FENG X X, WANG C Y, et al. A new method for eliminating false intersection points [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(3): 190 – 193. (in Chinese)
- [10] 姜亦武, 王明宇, 陈锋莉. 基于距离门限判决的交叉定位假点剔除算法[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 46–48.
JIANG Y W, WANG M Y, CHEN F L. Algorithm of false location elimination based on range threshold judgment in cross-localization [J]. Modern Radar, 2008, 30 (8): 46 – 48. (in Chinese)
- [11] KU B, LEE Y, HONG W, et al. Suppressing ghost targets via gating and track history in Y-shaped passive linear array sonars [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1605 – 1616.
- [12] HOFFMANN F, CHARLISH A, KOCH W. Trajectory optimization for multi-platform bearing-only tracking with ghosts [C]// Proceedings of 2016 19th International Conference on Information Fusion (FUSION), 2016: 39 – 44.
- [13] 蒋雯, 刘真, 王彦平, 等. 基于Hough变换的被动雷达交叉定位虚假点剔除方法[J]. 信号处理, 2023, 39(11): 1978 – 1986.
JIANG W, LIU Z, WANG Y P, et al. A false points eliminating method in passive radar cross-location based on Hough transform [J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(11): 1978 – 1986. (in Chinese)
- [14] 盛丹, 王国宏, 于洪波. 基于Hough变换的测向交叉定位系统多目标跟踪技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(5): 651 – 664.
SHENG D, WANG G H, YU H B. Multi-target tracking in triangulation system based on Hough transform [J]. Science in

- China: Information Sciences, 2016, 46(5): 651–664. (in Chinese)
- [15] 康莉, 谢维信, 黄敬雄. 基于模糊 Hough 变换的被动传感器系统航迹起始方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11): 1803–1805.
- KANG L, XIE W X, HUANG J X. Track initialization algorithm based on fuzzy Hough transform for passive sensor systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(11): 1803–1805. (in Chinese)
- [16] 丁树宇, 刘伟峰, 文成林. 基于预测判定和无味滤波多目标无源跟踪算法[J]. 控制工程, 2016, 23(1): 153–160.
- DING S Y, LIU W F, WEN C L. Multi-target passive tracking based on prediction judge and unscented filtering[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(1): 153–160. (in Chinese)
- [17] BEKIROGLU K, AYAZOGLU M, LAGO A C, et al. Hankel matrix rank as indicator of ghost in bearing-only tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(6): 2713–2723.
- [18] LI G C, LI G, HE Y. Labeled multi-bernoulli filter based multiple resolvable group targets tracking with leader-follower model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(5): 6683–6694.
- [19] DE MELO F E, MASKELL S. A CPHD approximation based on a discrete-Gamma cardinality model [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(2): 336–350.