

雷达与电子支援措施异步抗差航迹关联算法

衣晓 杜金鹏*

(海军航空大学 烟台 264001)

摘要: 针对雷达与电子支援措施(ESM)存在系统误差、航迹异步等复杂条件下的航迹关联问题, 该文提出一种基于区间序列离散度的异步抗差航迹关联算法。定义混合区间序列的离散信息度量, 给出系统误差的区间化方法, 通过计算区间离散度并利用经典分配法进行关联判定。与传统算法相比, 可在系统误差存在的前提下无需时域配准对异步航迹直接关联, 且对噪声分布不敏感。仿真结果表明, 所提算法具有良好的抗差性且不受目标运动位置的影响, 适用于传感器同地或异地配置等多种情况。

关键词: 雷达; 电子支援措施; 航迹关联; 系统误差; 异步航迹; 离散度

中图分类号: TN953; V271.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)07-1947-07

DOI: 10.11999/JEIT200250

Asynchronous Anti-bias Track Association Algorithm of Radar and Electronic Support Measurements

YI Xiao DU Jinpeng

(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: To address track association problem of radar and Electronic Support Measurements (ESM) under complex conditions such as system biases and asynchronous track, an asynchronous anti-bias track association algorithm based on discrete degree of interval sequence is proposed. The discrete information measurement of mixed interval sequence is defined and the interval method of system biases is given. The association determination is performed by calculating the interval discrete degree and using classical assignment method. Compared with the traditional algorithm, the asynchronous track can be directly correlated without time-domain registration in the presence of system errors and it is not sensitive to noise distribution. The simulation results show that the algorithm has good robust performance and is not affected by the target moving position. The algorithm can be applied to the configuration of sensors at same or different sites.

Key words: Radar; Electronic Support Measurements (ESM); Track association; System bias; Asynchronous track; Discrete degree

1 引言

雷达与电子支援措施(Electronic Support Measurements, ESM)航迹关联是异类传感器航迹关联^[1]中的重要研究内容。由于ESM只能获取角度信息而无法获取距离信息, 因此航迹关联存在较大的不确定性。实际应用中系统误差的存在与航迹异步进一步增大了关联难度, 对算法有效性^[2,3]提出

了更高要求。

以统计学理论为基础, 文献[4]提出一种纯方位航迹关联算法, 文献[5]和文献[6]则采用模糊综合理论与统计原理相结合的方法, 分别提出一种适用于航迹量测点数目不同的3阈值、4阈值关联算法。以交叉定位原理为基础, 文献[7]根据雷达与ESM的几何位置建立航迹粗关联函数, 利用航迹历史信息建立关联代价矩阵, 通过代价最小实现航迹关联。然而, 当传感器存在系统误差时, 上述算法的性能会大幅下降。

为实现系统误差下的航迹关联, 文献[8]将系统误差下航迹的不确定性转化为区间问题, 建立灰色关联分析模型, 提出一种基于区间重合度的关联算法。文献[9]和文献[10]则分别提出一种基于角度统计量和位置统计量的最大似然准则关联算法。为进

收稿日期: 2020-04-07; 改回日期: 2020-11-01; 网络出版: 2020-12-09

*通信作者: 杜金鹏 jpdu_1409@163.com

基金项目: 国防科技卓越青年人才基金(2017-JCJQ-ZQ-003), 泰山学者工程专项经费(ts201712072)

Foundation Items: The Excellent Youth Scholar of the National Defense Science and Technology Foundation of China (2017-JCJQ-ZQ-003), The Special Fund for the Taishan Scholar Project (ts201712072)

一步降低系统误差的影响,文献[11]针对系统误差的统计特性进行建模,提出一种非线性最小二乘法来估计传感器偏差。文献[12]则使用统计理论分析系统偏差估计对关联的影响,利用直角坐标系下位置和速度分量构造关联统计量,提出一种伪线性滤波算法。文献[13]基于高斯随机矢量的统计特性,采用分级聚类的方法提取同源航迹进行关联。文献[14]在修正极坐标系下修正检验统计量,提出一种基于积分重合度的航迹对准关联算法,通过估计系统误差偏移量,对偏移量补偿后进行航迹关联。文献[15]在修正极坐标系下推导目标状态估计分解方程,采用真实状态对消的方法得到航迹矢量,采用矢量检验的方法实现航迹关联。

当目标位于雷达与ESM的基线及其延长线附近时,交叉定位误差会急剧增大,基于交叉定位原理的算法关联性能迅速下降。而基于统计学原理的算法假设之一为传感器量测噪声服从高斯分布,当噪声分布不满足高斯分布时,算法有效性会大打折扣。且对于异步航迹^[16],传统算法均是通过时域配准将航迹时刻统一得到等长航迹序列再进行关联。但时域配准时滤波误差会随时间迅速积累,影响关联效果。

本文将区间化航迹序列作为数据集处理,利用数据集离散程度判断两条航迹的相近程度。为解决航迹异步问题,定义混合区间序列离散度,不依托时间变量,可在系统误差下无需时域配准,对异步航迹进行直接关联;为解决系统误差问题,提出数据区间化方法,无需估计系统误差^[17],对先验信息要求低。且算法不受噪声分布和目标运动位置的影响,对传感器同地或异地配置均适用。

2 区间型数据集的离散度量

对任意区间型数据集 $X = \{[x_1^l, x_1^u][x_2^l, x_2^u] \cdots [x_n^l, x_n^u]\}$, 记区间中点和区间半径分别为 x_i^m, r_i , 定义

$$[\bar{x}^l, \bar{x}^u] = [\bar{x}^m - \bar{r}, \bar{x}^m + \bar{r}] \quad (1)$$

为区间型数据集的平均区间。

其中, $\bar{x}^m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^m$, $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$, $x_i^m = \frac{1}{2}(x_i^l + x_i^u)$, $r_i = \frac{1}{2}(x_i^u - x_i^l)$ 。

定义

$$V_q = \sqrt{s_q^2 / \bar{x}_q} \quad (2)$$

为区间型数据集的区间离散系数。

其中, $s_q^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [(x_i^l - \bar{x}^l)^2 + (x_i^u - \bar{x}^u)^2]$, $\bar{x}_q = \bar{x}^m + 2\bar{r}$ 。

对任意两个区间型数据集 $X = \{[x_1^l, x_1^u][x_2^l, x_2^u] \cdots [x_M^l, x_M^u]\}$ 和 $Y = \{[y_1^l, y_1^u][y_2^l, y_2^u] \cdots [y_N^l, y_N^u]\}$, 记 $(X, Y) = X \cup Y$ 为混合区间数据集, 定义

$$\Delta(X, Y) = \begin{cases} \max_{\prod_M^{nN}} V_q(X_{\prod_M^{nN}} \cup nY) \\ \quad + \max_{\prod_M^{nN}} V_q(X_{\prod_M^n}^c \cup Y_{\prod_N^m}), M \geq N \\ \Delta(Y, X), M < N \end{cases} \quad (3)$$

为混合区间数据集的离散度。

其中, $n = \text{INT}^u[M/N]$, $\text{INT}^u[x]$ 表示不大于 x 的最大整数; $m = M \bmod N$, $y \bmod x$ 表示 y 除以 x 的余数; $X \cup Y$ 为集合“并”运算。对区间型数据集 $X = \{[x_1^l, x_1^u][x_2^l, x_2^u] \cdots [x_p^l, x_p^u]\}$, 有 $nX = \{[nx_1^l, nx_1^u][nx_2^l, nx_2^u] \cdots [nx_p^l, nx_p^u]\}$; $X_{\prod_p^q} = \{[x_j^l, x_j^u][x_j^l, x_j^u] \in X, j = 1, 2, \dots, q\}$; π_p^q 表示从数据集 X 的 p 个元素中任取 q 个元素; $X_{\prod_p^q}^c = X - X_{\prod_p^q}$; V_q 为区间离散系数。

3 基于区间序列离散度的航迹关联算法

3.1 问题描述

假设位于公共笛卡尔坐标系中的两部传感器 s 和 w (s 为雷达, w 为ESM) 对目标进行定位跟踪, 雷达位于 (x_s, y_s) 处, ESM位于 (x_w, y_w) 处。雷达对目标 i 的状态估计向量记为 \hat{X}_s^i , 包含距离估计 $\hat{\rho}_s^i$ 和方位角估计 $\hat{\theta}_s^i$, ESM对目标 j 的状态估计向量记为 \hat{X}_w^j , 只包含方位角估计 $\hat{\theta}_w^j$ 。根据最大系统误差对角度估计值 $\hat{\theta}_s^i$ 和 $\hat{\theta}_w^j$ 进行区间化处理, 所得区间型数据记为 $\tilde{\theta}_s^i$ 和 $\tilde{\theta}_w^j$, 计算区间离散度 λ_{ij} 。由于离散度表征数据离散程度^[18], λ_{ij} 越小说明航迹 i, j 为同源航迹的可能性越大, 故利用经典分配法构建目标函数, 求解航迹关联最优解即可。

3.2 系统误差区间化

在2维平面坐标中某目标的真实距离和方位角分别为 ρ, θ , 雷达测量距离和方位角的最大系统误差分别记为 $\Delta\rho_m^s, \Delta\theta_m^s$, ESM测量方位角的最大系统误差记为 $\Delta\theta_m^w$, 则 k 时刻各传感器的测量值为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\rho}_s &= \rho + \Delta\rho_s + v_\rho^s, \Delta\rho_s \in [-\Delta\rho_m^s, \Delta\rho_m^s] \\ \hat{\theta}_s &= \theta + \Delta\theta_s + v_\theta^s, \Delta\theta_s \in [-\Delta\theta_m^s, \Delta\theta_m^s] \\ \hat{\theta}_w &= \theta + \Delta\theta_w + v_\theta^w, \Delta\theta_w \in [-\Delta\theta_m^w, \Delta\theta_m^w] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, $v_\rho^s, v_\theta^s, v_\theta^w$ 为雷达在距离和方位角上的随机量测误差以及ESM在方位角上的随机量测误差。

假设以ESM传感器为参考中心, 则可直接将系统误差下ESM传感器的角度观测数据转化为区间型数据 $\tilde{\theta}_w = [\theta_w^l, \theta_w^u] = [\hat{\theta}_w - \Delta\theta_m^w, \hat{\theta}_w + \Delta\theta_m^w]$ 。当雷达与ESM同地配置时, 将系统误差下雷达的角

度观测数据转化为以ESM传感器为中心的区间型数据 $\hat{\theta}_s = [\theta_s^l, \theta_s^u] = [\hat{\theta}_s - \Delta\theta_m^s, \hat{\theta}_s + \Delta\theta_m^s]$ 。

当雷达与ESM异地配置时, 如图1所示。

雷达观测值 $(\hat{\rho}_s, \hat{\theta}_s)$ 可能的分布区域 G 是由目标真实位置根据最大系统误差外推得到的阴影区域, 区域顶点记为 C_1, C_2, C_3, C_4 。同理, 由阴影区域 G

其中, $\mathbf{X} = [x_{C_1}, x_{C_2}, x_{C_3}, x_{C_4}]$, $\mathbf{Y} = [y_{C_1}, y_{C_2}, y_{C_3}, y_{C_4}]$, $\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_s + \Delta\rho_m^s & 0 & \hat{\rho}_s - \Delta\rho_m^s & 0 \\ 0 & \hat{\rho}_s + \Delta\rho_m^s & 0 & \hat{\rho}_s - \Delta\rho_m^s \end{bmatrix}$,

$$\Phi = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}_s + \Delta\theta_m^s) & \sin(\hat{\theta}_s - \Delta\theta_m^s) & 0 & 0 \\ \cos(\hat{\theta}_s + \Delta\theta_m^s) & \cos(\hat{\theta}_s - \Delta\theta_m^s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin(\hat{\theta}_s - \Delta\theta_m^s) & \sin(\hat{\theta}_s + \Delta\theta_m^s) \\ 0 & 0 & \cos(\hat{\theta}_s - \Delta\theta_m^s) & \cos(\hat{\theta}_s + \Delta\theta_m^s) \end{bmatrix}。$$

进一步得到以ESM传感器为中心的角度转换测量值

$$\hat{\theta}_i = \arctan \frac{x_{C_i} - x_w}{y_{C_i} - y_w}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

将系统误差区间化处理后的区间型数据记为

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_s &= [\theta_s^l, \theta_s^u], \theta_s^l = \min \{ \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3, \hat{\theta}_4 \}, \\ \theta_s^u &= \max \{ \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3, \hat{\theta}_4 \} \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 航迹关联判定

设在第 k 个处理周期内, 雷达与ESM上报的航迹数目分别为 m_s, m_w , 来自雷达与ESM的每条航迹包含的航迹点数目分别为 n_s^i, n_w^j 。根据系统误差的不同, 采用3.2节方法对雷达和ESM航迹序列进行坐标转换和区间化处理, 雷达和ESM区间化航迹序列集合分别记为 $\zeta_s = \{ \tilde{\varphi}_s^1, \tilde{\varphi}_s^2, \dots, \tilde{\varphi}_s^{m_s} \}$, $\zeta_w = \{ \tilde{\varphi}_w^1, \tilde{\varphi}_w^2, \dots, \tilde{\varphi}_w^{m_w} \}$, 其中, $\tilde{\varphi}_s^i = \{ \tilde{\theta}_s^i(1), \tilde{\theta}_s^i(2), \dots, \tilde{\theta}_s^i(n_s^i) \}$, $i = 1, 2, \dots, m_s$, $\tilde{\varphi}_w^j = \{ \tilde{\theta}_w^j(1), \tilde{\theta}_w^j(2), \dots, \tilde{\theta}_w^j(n_w^j) \}$, $j = 1, 2, \dots, m_w$ 。

对雷达上报的第 i 条航迹与ESM上报的第 j 条航迹计算区间离散度

$$\lambda_{ij} = \Delta(\tilde{\varphi}_s^i, \tilde{\varphi}_w^j) \quad (8)$$

令

$$\vartheta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{航迹 } i \text{ 与航迹 } j \text{ 关联} \\ 0, & \text{航迹 } i \text{ 与航迹 } j \text{ 不关联} \end{cases} \quad (9)$$

则将航迹关联问题转化为2维分配问题

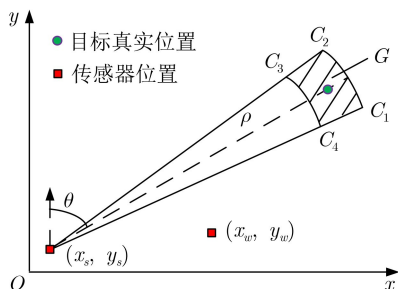


图1 系统误差示意图

中任意位置点的观测值 $(\hat{\rho}_s, \hat{\theta}_s)$ 外推得到的分布区域必定包含目标真实位置, 该区域由区间 $[\hat{\rho}_s - \Delta\rho_m^s, \hat{\rho}_s + \Delta\rho_m^s]$ 和 $[\hat{\theta}_s - \Delta\theta_m^s, \hat{\theta}_s + \Delta\theta_m^s]$ 共同确定, 记该区域顶点为 C_1', C_2', C_3', C_4' , 则有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix} = \mathbf{\Gamma} \cdot \Phi + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} &\min_{\vartheta_{ij}} \sum_i \sum_j \vartheta_{ij} \lambda_{ij} (k) \\ &\sum_{j=1}^{m_w} \vartheta_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, m_s \\ &\sum_{i=1}^{m_s} \vartheta_{ij} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, m_w \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

分配问题是约束条件下求解目标函数最值的问题, 此类2维分配问题存在匈牙利算法、拍卖算法等经典解决方法, 此处不再赘述。算法流程图如图2所示。

4 仿真实验与分析

4.1 仿真环境

假设雷达与ESM传感器的位置坐标分别为 $(0, 0)$ 和 $(100 \text{ km}, 0)$, 采样时间间隔均为 $T = 0.1 \text{ s}$, 目标持续观测时间为 20 s 。雷达与ESM的随机测量误差为 $v_\rho^s = 100 \text{ m}$, $v_\theta^s = 0.3^\circ$ 和 $v_\theta^w = 0.4^\circ$ 。雷达与

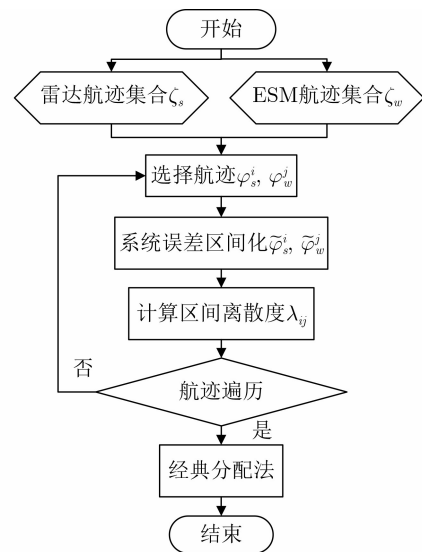


图2 算法流程图

ESM的最大系统误差为 $\Delta\rho_m^s = 1000\text{ m}$, $\Delta\theta_m^s = 0.5^\circ$ 和 $\Delta\theta_m^w = 0.5^\circ$, 进行100次Monte Carlo仿真实验。

场景1: 采用匀速直线运动模型随机生成20个目标, 目标初始位置在区域 $[0, 100\text{ km}] \times [0, 100\text{ km}]$ 中均匀分布, 初始方向在 $0 \sim 2\pi\text{ rad}$ 内随机分布, 初始速度在 $200 \sim 400\text{ m/s}$ 内随机分布, 持续运动时间为25s。

场景2: 分别采用匀加速直线、变加速直线、匀速圆周运动模型随机生成20个目标, 直线运动目标初始位置和圆周运动目标圆心均在区域 $[0, 100\text{ km}] \times [0, 100\text{ km}]$ 中均匀分布, 目标持续运动时间为25s。其中, 直线运动目标的初始方向在 $0 \sim 2\pi\text{ rad}$ 内随机分布, 初始速度在 $200 \sim 400\text{ m/s}$ 内随机分布, 加速度在 $-1 \sim 1\text{ m/s}^2$ 内随机分布, 匀加速目标加速度保持不变, 变加速目标每1秒的加速度均改变; 匀速圆周运动目标半径 r 在 $500 \sim 800\text{ m}$ 内随机分布, 角速度 w 在 $0.04\pi \sim 0.08\pi\text{ rad/s}$ 内随机分布。

4.2 算法性能比较与分析

图3为不同方位角随机测量误差下算法的性能对比图。可以看出, 文献[9]和文献[14]算法正确关联率随方位角量测随机误差的增大呈现反常的上升趋势, 而本文算法和文献[13]算法变化不大。这是因为同源航迹的数据分布和航迹矢量类簇比较集中, 量测随机误差相对于非同源航迹的离散度或类间距较小, 对本文算法和文献[13]算法产生的影响较小。而文献[9]和文献[14]算法构造的关联统计量均服从非中心卡方分布, 根据分布性质, 随着雷达或ESM测角随机误差的增大, 非中心参数减小, 算法正确关联率会增大。

在场景1中改变最大系统误差, 如表1所示, 各算法关联结果如表2所示。可以看出, 随着系统误差的增大, 文献[9]和文献[14]算法的正确关联率明显下降, 而本文算法与文献[13]算法一直保持较高的正确关联率。由于本文算法以目标观测值为区间中点, 系统误差为区间半径, 从数值大小而言, 通常情况下的系统误差数值远小于目标观测数值, 系统误差对离散度大小的影响相对较弱; 而文献[13]采用真实状态对消的方法消除了系统误差对航迹关联的影响, 故两种算法均可保持较佳的关联结果。

对场景1与场景2中多种目标运动模型进行仿真, 比较本文算法关联结果, 如表3所示。

可以看出, 本文算法对多种目标运动模型均保持较佳的关联效果。由于离散度刻画航迹数据点的离散程度, 相较于简单运动模型, 复杂运动模型会导致航迹的不规则, 但航迹的规则与否对坐标数值在数轴上的分布影响较小, 故本文算法对复杂运动模型也适用。

4.3 异步航迹关联有效性分析

图4为不同采样率之比下算法的性能对比图。可以看出, 随着采样率之比增大, 时间同步过程中需要滤波插值的点数增加, 滤波误差快速积累, 文献[9], 文献[13]和文献[14]算法的正确关联率均呈现明显的下降趋势。而本文算法只对数据集离散特征求解, 不要求观测时刻统一, 故不受采样率之比的影响, 可直接处理异步与系统误差并存下的航迹关联问题。

表4为系统误差存在的前提下本文算法对异步航迹的关联结果。可以看出, 由于离散度的求解并

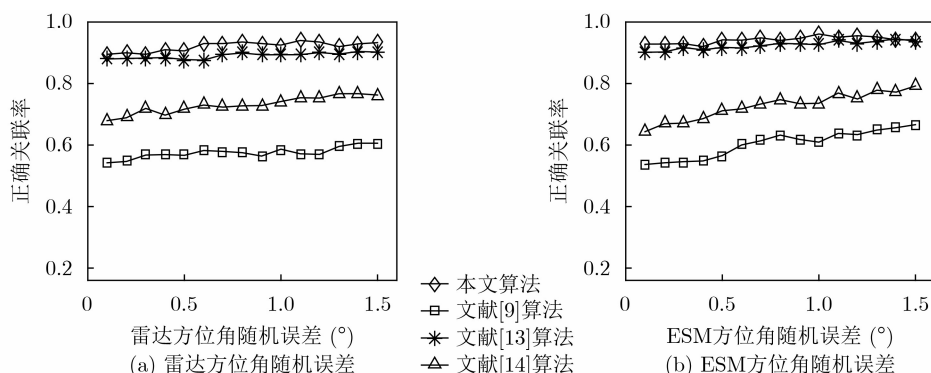


图3 方位角量测误差下的正确关联率对比

表1 雷达与ESM最大系统误差取值表

实验编号	1	2	3	4	5	6
$\Delta\theta_m^s (^\circ)$	0.5	0.5	1.0	1.5	0.5	0.5
$\Delta\theta_m^w (^\circ)$	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.5
$\Delta\rho_m^s (\text{m})$	500	1000	500	500	500	500

表 2 不同系统误差下的算法关联率对比

实验编号	本文算法			文献[9]算法			文献[13]算法			文献[14]算法		
	E_c	E_e	E_s	E_c	E_e	E_s	E_c	E_e	E_s	E_c	E_e	E_s
1	0.937	0.056	0.007	0.743	0.075	0.182	0.936	0.028	0.036	0.866	0.023	0.111
2	0.932	0.060	0.008	0.698	0.049	0.253	0.935	0.033	0.032	0.858	0.024	0.118
3	0.914	0.054	0.032	0.504	0.175	0.321	0.900	0.044	0.056	0.817	0.078	0.105
4	0.892	0.056	0.052	0.445	0.243	0.312	0.881	0.058	0.061	0.772	0.026	0.202
5	0.944	0.047	0.009	0.506	0.090	0.404	0.937	0.023	0.040	0.840	0.048	0.112
6	0.933	0.056	0.011	0.456	0.234	0.310	0.925	0.038	0.037	0.787	0.051	0.162

表 3 不同目标运动模型下的正确关联率

目标运动模型	匀速直线运动	匀加速直线运动	变加速直线运动	匀速圆周运动
正确关联率	0.931	0.928	0.923	0.917

未利用时间信息，故开机时延并未对正确关联率产生明显影响；而由于离散度属于统计学度量，其度量精度与数据点数目有关，故采样周期越长，数据量越少，正确关联率有所下降。

4.4 目标数目与噪声分布的影响

图5为不同目标数目下算法的性能对比图。可以看出，本文算法和文献[13]算法受目标数目的影响较小，文献[14]算法正确关联率有所下降，文献[9]算法正确关联率大幅下降。这是因为目标数目增加时，文献[14]算法所用映射空间中目标曲线重合度下降，导致关联效果下降；而文献[9]算法是统计学算法，对噪声独立性和分布形式有严格要求，当目标过于密集，量测协方差无法忽略时，算法性能将受到明显影响。

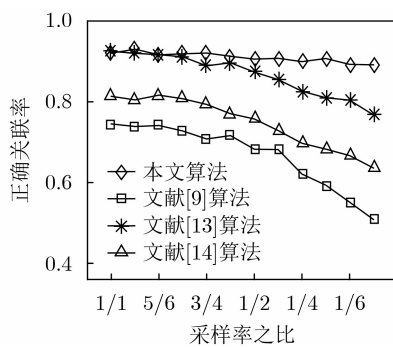


图 4 不同采样率之比下的正确关联率对比

表 4 不同采样周期和开机时延的正确关联率

ESM开机时延(s)	雷达, ESM采样周期(时间间隔)(s)		
	$t_1=0.1, t_2=0.3$	$t_1=0.3, t_2=0.5$	$t_1=0.5, t_2=1.1$
$\Delta t=0.1$	0.913	0.913	0.834
$\Delta t=0.2$	0.922	0.891	0.844
$\Delta t=0.3$	0.928	0.890	0.820
$\Delta t=0.4$	0.927	0.881	0.831

表5为本文算法在不同噪声下的关联结果。可以看出，噪声分布形式对本文算法几乎没有影响，考虑到实际噪声分布形式的多样性与不确定性，对噪声分布不敏感的特点使本文算法具有更好的适用性。

4.5 目标运动位置的影响

将横纵坐标轴范围为[-100 km, 200 km], [0 km, 200 km]的矩形区域划分成600个10 km × 10 km的单元区域，每个单元区域随机产生20个匀速直线运动目标，计算各单元区域正确关联率，结果如图6所示。可以看出，当目标位于雷达与ESM的基线及其延长线附近时，文献[10]算法的关联效果急剧下降；而本文算法在各区域内均能有效关联，克服了目标靠近基线时关联性能迅速下降的不足。

当目标位于雷达与ESM的基线及其延长线附近时，两条测向线重合，无法进行交叉定位。此时特殊的角度会导致部分三角函数值不存在，或使交叉定位公式计算结果为0/0型不定式。故雷达与ESM连线区域交叉定位精度低的问题会导致基于

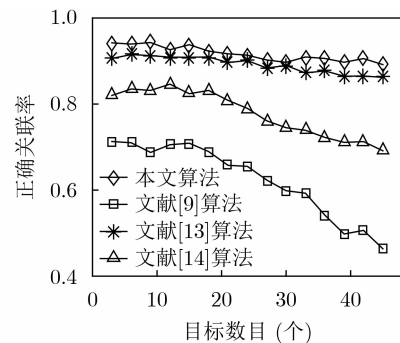


图 5 不同目标数目时的正确关联率对比

表 5 不同噪声分布的正确关联率

噪声分布形式	高斯分布	瑞利分布	指数分布	均匀分布
正确关联率	0.926	0.920	0.914	0.934

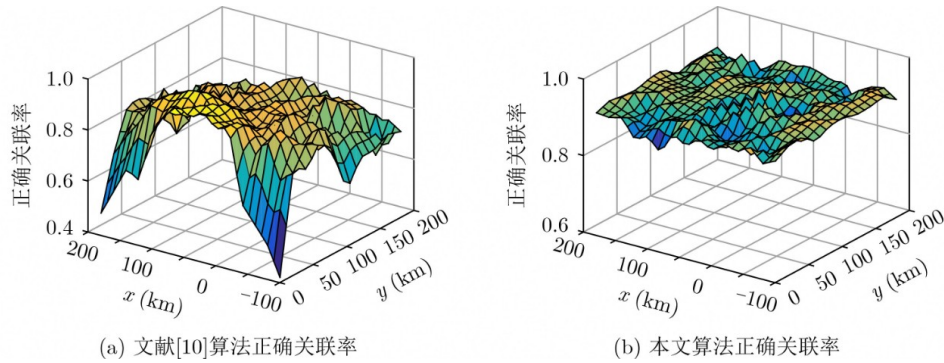


图6 正确关联率随目标运动位置的变化

交叉定位原理的文献[10]算法在该区域的关联效果较差。

5 结束语

本文提出一种基于区间序列离散度的异步抗差航迹关联算法,给出系统误差区间化方法和混合区间序列离散度的具体度量指标。与传统算法相比,无需时域配准,可在系统误差下直接对异步不等速率航迹进行准确关联。算法对噪声分布不敏感,不受目标与观测平台相对位置的影响,可适用于传感器同地或异地配置等多种情况。且算法不需要对系统误差进行估计,具有良好的抗差性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 124–146.
HE You, WANG Guohong, GUAN Xin, *et al.* Information Fusion Theory with Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 124–146.
- [2] TU Yongjun, HUANG Gaoming, LI Jinghui, *et al.* Performance analysis of radar and ESM track association algorithms[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 130–134: 1925–1928. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.1925](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.1925).
- [3] WANG Guohong, MAO Shiyi, and HE You. Analytical performance evaluation of association of active and passive tracks for airborne sensors[J]. *Signal Processing*, 2003, 83(5): 973–981. doi: [10.1016/s0165-1684\(02\)00500-5](https://doi.org/10.1016/s0165-1684(02)00500-5).
- [4] OFFER C R. Performance of bearing-only ESM-radar track association[C]. Proceedings of the 9th IET Data Fusion & Target Tracking Conference, London, UK, 2012: 1–6. doi: [10.1049/cp.2012.0409](https://doi.org/10.1049/cp.2012.0409).
- [5] WANG Guohong, MAO Shiyi, HE You, *et al.* Triple-threshold radar-to-ESM correlation algorithm when each radar track is specified by different number of measurements[J]. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(4): 177–181. doi: [10.1049/ip-rsn:20000094](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20000094).
- [6] WANG Guohong, HE You, MAO Shiyi, *et al.* Quadri-threshold algorithm of co-located radar-to-ESM correlation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2000, 13(2): 86–90.
- [7] 陈中华, 王国宏, 刘德浩, 等. 基于几何法的雷达与ESM航迹关联算法[J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 10–12, 22. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2012.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2012.04.003).
CHEN Zhonghua, WANG Guohong, LIU Dehao, *et al.* Radar-ESM track correlation based on geometric method[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(4): 10–12, 22. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2012.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2012.04.003).
- [8] 关欣, 彭彬彬, 衣晓. 基于区间重合度的雷达与ESM航迹关联算法[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(1): 61–67. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011).
GUAN Xin, PENG Binbin, and YI Xiao. Track association algorithm of radar and ESM based on the interval overlap ratio[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, 15(1): 61–67. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.011).
- [9] 宋振宇, 张翔宇, 张光秩. 系统误差对异地配置的雷达和ESM航迹关联的影响[J]. 电光与控制, 2014, 21(3): 42–46. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2014.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2014.03.010).
SONG Zhenyu, ZHANG Xiangyu, and ZHANG Guangyi. Effect of systematic errors on radar-to-ESM track association at different sites[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(3): 42–46. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2014.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2014.03.010).
- [10] 张翔宇, 王国宏, 王娜, 等. 系统误差下异地配置的雷达和电子支援测量航迹关联[J]. 电光与控制, 2012, 19(3): 30–35, 43. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2012.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2012.03.007).
ZHANG Xiangyu, WANG Guohong, WANG Na, *et al.* Track association of radar and ESM sensors with systematic errors at different sites[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(3): 30–35, 43. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2012.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2012.03.007).
- [11] ZHANG Feihu and KNOLL A. Systematic error modeling and bias estimation[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 729. doi: [10.3390/s16050729](https://doi.org/10.3390/s16050729).
- [12] WANG Guohong, ZHANG Xiangyu, and TAN Shuncheng. Effect of biased estimation on radar-to-ESM track

- association[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2012, 23(2): 188–194. doi: [10.1109/JSEE.2012.00024](https://doi.org/10.1109/JSEE.2012.00024).
- [13] 李保珠, 张林, 董云龙, 等. 基于航迹矢量分级聚类的雷达与电子支援措施抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1310–1316. doi: [10.11999/JEIT180714](https://doi.org/10.11999/JEIT180714).
- LI Baozhu, ZHANG Lin, DONG Yunlong, et al. Anti-bias track association algorithm of radar and electronic support measurements based on track vectors hierarchical clustering[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1310–1316. doi: [10.11999/JEIT180714](https://doi.org/10.11999/JEIT180714).
- [14] 关欣, 彭彬彬, 衣晓. 修正极坐标系下雷达与ESM航迹对准关联[J]. 航空学报, 2017, 38(5): 320668. doi: [10.7527/S1000-6893.2016.0287](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2016.0287).
- GUAN Xin, PENG Binbin, and YI Xiao. Track alignment-association of radar and ESM in MPC[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(5): 320668. doi: [10.7527/S1000-6893.2016.0287](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2016.0287).
- [15] 李保珠, 关键, 董云龙. 基于航迹矢量检测的雷达与电子支援设施抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 123–129. doi: [10.11999/JEIT180303](https://doi.org/10.11999/JEIT180303).
- LI Baozhu, GUAN Jian, and DONG Yunlong. Anti-bias track association algorithm of radar and electronic support measurements based on track vectors detection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 123–129. doi: [10.11999/JEIT180303](https://doi.org/10.11999/JEIT180303).
- [16] ZHU Hongyan and WANG Chen. Joint track-to-track association and sensor registration at the track level[J]. *Digital Signal Processing*, 2015, 41: 48–59. doi: [10.1016/j.dsp.2015.03.012](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2015.03.012).
- [17] 左燕, 陈志猛, 蔡立平. 基于约束总体最小二乘的单站DOA/TDOA联合误差校正与定位算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1317–1323. doi: [10.11999/JEIT180655](https://doi.org/10.11999/JEIT180655).
- ZUO Yan, CHEN Zhimeng, and CAI Liping. Single-observer DOA/TDOA Registration and passive localization based on constrained total least squares[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1317–1323. doi: [10.11999/JEIT180655](https://doi.org/10.11999/JEIT180655).
- [18] 衣晓, 杜金鹏. 基于分段序列离散度的异步航迹关联算法[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 323694. doi: [10.7527/S1000-6893.2020.23694](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2020.23694).
- YI Xiao and DU Jinpeng. Asynchronous track-to-track association algorithm based on discrete degree of segmented sequence[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(7): 323694. doi: [10.7527/S1000-6893.2020.23694](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2020.23694).
- 衣 晓: 男, 1976年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线传感器网络、多源信息融合。
- 杜金鹏: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为数据关联。
- 责任编辑: 陈 倩