

基于三角稳定的海上目标航迹抗差关联算法

崔亚奇, 熊伟, 顾祥岐

(海军航空大学信息融合研究所, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对现有航迹抗差关联算法缺乏对海上目标航迹特点和规律的考虑、实际应用效果差的问题, 根据典型的实测数据对比分析结果, 结合海上目标位置变化慢、空间拓扑关联稳定的特点, 以三角形稳定结构为基础, 设计了适用于海上目标航迹的抗差关联算法。首先, 构建拓扑三角形, 通过三角形匹配系数和航迹图匹配系数进行阈值判断, 得到航迹对的关联系数。其次, 保留其中最大关联系数, 构建航迹对关联系数矩阵。最后, 采用最大关联系数和阈值判别原则, 输出关联航迹。实测数据验证结果表明, 所提算法成功实现了所有航迹的有效关联, 明显优于对比算法, 具有较强的稳定性和鲁棒性, 可有效解决实际中海上目标航迹关联问题, 实用性强。

关键词: 海上目标; 航迹关联; 三角稳定; 雷达组网

中图分类号: TN 953, TN 957

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2020.10.10

Anti-bias association algorithm for marine target track based on triangular stability

CUI Yaqi, XIONG Wei, GU Xiangqi

(Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the problems of the existing track anti-bias association algorithms lack the consideration of the characteristics and principal of the marine target track and the poor practical application effect, according to the comparative analysis results of typical measured data, combined with the characteristics of slow change of marine target position and stable spatial topology association, and based on the triangle stable structure, the anti-bias association algorithm for marine target track is designed. Firstly, the topological triangle is constructed, and the threshold is determined by the triangle matching coefficient and the track map matching coefficient, and the correlation coefficient of the track pair is obtained. Secondly, the maximum correlation coefficient is retained and the track pair correlation coefficient matrix is constructed. Finally, the maximum correlation coefficient and threshold discrimination principle are used to output the associated track. The experimental results show that the proposed algorithm achieves the effective correlation of all tracks, which is obviously better than the comparison algorithms, and has strong stability and robustness. It can effectively solve the problem of track association of maritime targets in practice, and has strong practicability.

Keywords: marine target; track association; triangular stability; radar network

0 引言

为确保海上安全, 维护国家海洋权益, 迫切需要对远洋热点海域和海上时敏目标进行持续跟踪监视, 而要实现这一预警探测任务, 仅依靠单一的手段或单个探测平台是远不可能的, 唯有通过多源信息融合, 充分综合利用多种探测

手段或多个探测平台, 才可能实现^[1-3]。

作为多源信息融合的核心关键技术, 航迹关联是航迹融合、属性融合的前提和基础, 其结果对最终海上态势的正确性、可读可辩性具有直接和重要的影响^[4-5]。然而为实现远海远洋预警探测, 需进一步联合多种手段、增加信源数量、扩大信源分布范围, 此时多源信息融合系统所要处理海

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2020-03-22; 网络优先出版日期: 2020-05-25。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20200525.1032.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61790554)资助课题

引用格式: 崔亚奇, 熊伟, 顾祥岐. 基于三角稳定的海上目标航迹抗差关联算法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(10): 2223-2230.

Reference format: CUI Y Q, XIONG W, GU X Q. Anti-bias association algorithm for marine target track based on triangular stability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(10): 2223-2230.

上目标航迹的来源及其上报路径将会更加多样、不同信源航迹空间差异将会进一步增大,给航迹关联算法的抗差抗差能力提出了更高的要求和挑战^[6-10]。

目前国内外学者在航迹抗差关联方面已经开展了大量的研究,并取得了一定的研究成果^[11-23]。根据研究思路 and 实现方法,可把现有抗差关联方法分为两大类:图像抗差关联^[11-17]和拓扑抗差关联^[18-23]。其中,图像抗差关联^[11-17]需要把航迹矢量图转换为航迹标量图,并采用图像相关方法进行处理,导致该类算法计算复杂、计算量大,实时处理难度大,实际效果也难以保证。而拓扑抗差关联^[18-23]则利用航迹间相对位置、相对航向等几乎不受空间误差影响的拓扑不变量信息,通过计算拓扑序列或构建拓扑结构,来实现航迹抗差关联,具有计算速度快、性能稳定等优点。典型的拓扑关联算法见文献^[18-23]。其中,文献^[18]利用传感器到各目标的径向划分来构建参照拓扑矩阵,并采用模糊信息处理方法对拓扑矩阵距离进行综合,从而建立航迹关联矩阵,实现单个航迹关联,但该算法仅适用于存在平移误差的航迹关联问题。文献^[19]采用各目标航迹点所构成的三角形作为拓扑结构元构建相似度,依据局部相似度做出航迹对关联判决,由于仅依靠单个航迹点信息,同时缺乏对测量误差的考虑,存在实际应用关联效果差的问题。文献^[20-23]通过高斯随机矢量统计特性推导出一种基于距离分级聚类的机载雷达航迹抗差关联算法。

虽然现有航迹抗差关联算法类型多样、成果丰富,并且在仿真情况下关联性能也表现良好,但是均缺乏对海上目标航迹关联问题的针对性考虑,特别是多运动平台上报航迹关联问题。在问题建模、算法设计、算法推导等各个环节均存在与实际情况不匹配的问题,致使采用现有算法解决海上目标航迹关联问题时,实际应用效果较差。针对上述问题,本文根据海上目标航迹实际特点,考虑到拓扑抗差关联的优良特性,研究设计与实际问题相匹配的拓扑抗差关联算法,以保证算法的实际运用效果。

1 算法原理

不同的数据特征,需要不同的处理算法,要确保算法的有效性和实用性,必须因地制宜地根据数据特征,研究设计与问题相匹配的处理算法。因此,本文首先基于实测数据对海上目标航迹特点进行分析挖掘,在此基础上,研究设计适应海上目标航迹特点的航迹抗差关联算法。

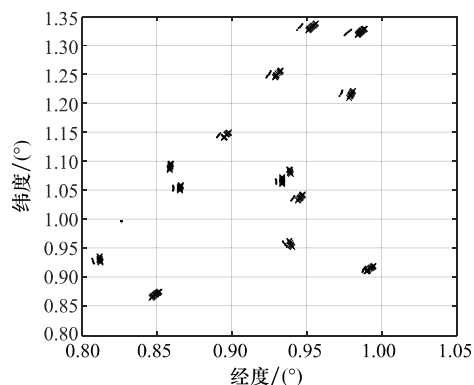
1.1 海上目标航迹特点

重点区域海上目标航迹大多由海空运动平台探测上报,如图 1 所示。

通过对比分析典型实测数据,发现运动平台探测上报的海上目标航迹具有如下特点:

特点 1 海上目标分布稀疏,从整个区域来看,一定时间滑窗内海上目标航迹段呈粗点状分布。

特点 2 不同雷达航迹存在明显空间差异,且差异大小基本呈现局部一致性。



·: 运动探测平台1上报航迹; ×: 运动探测平台2上报航迹。

图 1 典型运动平台探测上报航迹

Fig. 1 Detection track reported by typical moving platform

特点 3 不同雷达航迹的整体形态和内部空间拓扑关系具有相似性和一致性。

根据海上目标航迹特点 2,在一定时间和空间范围内,可假设对应于同一目标的不同雷达航迹点存在旋转和平移空间差异,并满足如下模型:

$$\begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ y^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, θ 为旋转参数; τ_x 和 τ_y 分别为 X 和 Y 方向平移参数。

1.2 算法基本原理

根据海上目标航迹特点 3,可基于海上目标航迹构建拓扑结构,并通过度量拓扑结构间的相似性,来实现拓扑结构的匹配,进而实现拓扑结构中海上目标航迹的抗差关联。结合海上目标航迹特点 1,可考虑把时间滑窗内的航迹段视为结构空间中的点元素,并作为基本元素来构建拓扑结构。

基于航迹段点元素,可构建的拓扑结构包括线段、三角形、四边形、五边形等。其中线段结构具有组合数量少的优点,但结构的唯一性比较弱,即线段结构相似难以大概率判定结构中航迹关联。而三角形结构继承了三角形的稳定性,具有灵敏度高和唯一性强的优点,但存在组合数量多的缺点。其他四边形、五边形以及更复杂结构存在组合数量过多、甚至组合爆炸的严重缺点,相对于三角形结构,其唯一性并没有明显提升,同时拓扑结构间相似度量的计算复杂度更高。

综上所述,相比其他拓扑结构,三角形拓扑具有唯一性强、相似计算简单的显著优点,因此可基于时间滑窗内航迹段构建三角形拓扑,并通过一定方法手段避免过多拓扑生成,来实现海上目标航迹的抗差关联。

2 算法步骤

本文所提的基于三角稳定的海上目标航迹抗差关联算法主要包括以下 4 个步骤。

步骤 1 拓扑三角形构建:任取同一雷达三条目标航迹,构建拓扑三角形,计算边的长度,作为拓扑三角形特征。

步骤 2 三角形匹配:对不同雷达间任意两个拓扑三角形进行配对,生成所有可能的配对假设。计算每个假设

所对应三对边的相似程度,作为假设的三角形匹配系数,并通过阈值判断,直接舍弃不可能的假设。

步骤 3 航迹图匹配:分别估计各剩余假设对应的空间差异参数,求取空间差异修正后雷达间航迹的整体重合程度,作为假设的航迹图匹配系数,并通过阈值判断,进一步舍弃低于阈值的假设。

步骤 4 航迹关联:综合各个假设的三角形匹配系数和航迹图匹配系数,得到各假设所包含 3 个航迹对的关联系数。多个假设均有包含的航迹对,仅保留其中最大关联系数,并以此构建航迹对关联系数矩阵,采用最大关联系数和阈值判别原则,输出关联航迹。

需要说明的是,该算法处理需要各雷达至少包含 3 批目标,对雷达小于 3 批目标的情况,可通过对两部雷达间航迹逐一关联尝试的方法进行关联。

2.1 拓扑三角形构建

假设经过坐标变换,已把雷达上报航迹从经纬高坐标系转换到公共直角坐标系中,可表示为

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \mathbf{X} + \mathbf{w} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, \mathbf{X} 为雷达跟踪无噪声航迹点数据,包含 X 方向和 Y 方向位置; \mathbf{w} 为雷达跟踪航迹噪声,假设为零均值高斯白噪声,协方差 $\mathbf{R} = \text{diag}(R_x, R_y)$ 。

以雷达 1 航迹为例,构建拓扑三角形。设定时间滑窗,对滑窗内雷达任意 3 个不同航迹进行组合,构建拓扑三角形 $S_i^1 = \{\hat{\mathbf{X}}_{i_1}^1, \hat{\mathbf{X}}_{i_2}^1, \hat{\mathbf{X}}_{i_3}^1\}$ 。其中, $\hat{\mathbf{X}}$ 表示某一航迹在时间滑窗内航迹点的位置平均, S 和 $\hat{\mathbf{X}}$ 的上标均表示雷达序号, S 的下标表示所构建拓扑三角形序号, $\hat{\mathbf{X}}$ 的下标表示相应雷达航迹序号,具体计算方法为

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N_p} \sum_k \hat{x}(k) \\ \frac{1}{N_p} \sum_k \hat{y}(k) \end{bmatrix}, T_s \leq k \leq T_e \quad (3)$$

式中, T_s 和 T_e 分别为时间滑窗的左右边界; N_p 为时间滑窗内航迹点数量。根据式(3)可知, $\hat{\mathbf{X}}$ 的噪声 $\hat{\mathbf{w}}$ 仍为高斯白噪声,其协方差 $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{R}/N_p$ 。

进一步求取拓扑三角形的 3 个边长和相应的方差,作为拓扑三角形 S_i^1 的特征向量 \mathbf{Q}_i^1 。根据平面两点间的距离公式,可得

$$l(i_1, i_2) = \sqrt{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1 - \hat{w}_{x,i_1}^1 + \hat{w}_{x,i_2}^1)^2 + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1 - \hat{w}_{y,i_1}^1 + \hat{w}_{y,i_2}^1)^2} \quad (4)$$

对式(4)进行泰勒展开,可得

$$l(i_1, i_2) \approx \sqrt{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)^2 + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)^2} - \frac{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)(\hat{w}_{x,i_1}^1 - \hat{w}_{x,i_2}^1) + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)(\hat{w}_{y,i_1}^1 - \hat{w}_{y,i_2}^1)}{\sqrt{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)^2 + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)^2}} \quad (5)$$

令

$$\omega_l(i_1, i_2) = \frac{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)(\hat{w}_{x,i_1}^1 - \hat{w}_{x,i_2}^1) + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)(\hat{w}_{y,i_1}^1 - \hat{w}_{y,i_2}^1)}{\sqrt{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)^2 + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)^2}}$$

可得

$$l(i_1, i_2) \approx \sqrt{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)^2 + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)^2} - \omega_l(i_1, i_2) \quad (6)$$

式中, $\omega_l(i_1, i_2)$ 为一维的零均值高斯白噪声,其方差 $R_l(i_1, i_2)$ 为

$$R_l(i_1, i_2) = \frac{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)^2 (\bar{R}_{x,i_1}^1 + \bar{R}_{x,i_2}^1) + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)^2 (\bar{R}_{y,i_1}^1 + \bar{R}_{y,i_2}^1)}{(\hat{x}_{i_1}^1 - \hat{x}_{i_2}^1)^2 + (\hat{y}_{i_1}^1 - \hat{y}_{i_2}^1)^2} \quad (7)$$

根据式(6)和式(7),依次求取拓扑三角形 S_i^1 的 3 个边长及其方差,并根据边长对拓扑三角形类型进行判断,对等边、等腰三角形等病态拓扑三角形直接进行排除,仅保留各边具有明显差异的不等边拓扑三角形。其中拓扑三角形的两边满足

$$|l(i_1, i_2) - l(i_1, i_3)| \leq 2 \sqrt{R_l(i_1, i_2) + R_l(i_1, i_3)} \quad (8)$$

由式(8)可认为两边是相等的。需要说明的是,按照式(5),由于存在相同噪声,两个边差的均方差并不严格等于两个边各自均方差的和,这里采用近似。

对保留的不等边拓扑三角形各边按照从大到小的顺序进行排序,可得拓扑三角形 S_i^1 的特征向量 $\mathbf{Q}_i^1 = \{l_{i_1}^1, l_{i_2}^1, l_{i_3}^1, R_{i_1}^1, R_{i_2}^1, R_{i_3}^1\}$ 。与边相对应,重新对拓扑三角形的点进行排序,得到与拓扑三角形唯一对应的航迹编号序列,同样用 $S_i^1 = \{\mathbf{X}_{i_1}^1, \mathbf{X}_{i_2}^1, \mathbf{X}_{i_3}^1\}$ 表示。

2.2 三角形匹配

假设当前时间滑窗内雷达 1 和雷达 2 各自存在 n_1 和 n_2 条航迹,排除病态拓扑后,则雷达 1 和雷达 2 可分别构建 NC_1 和 NC_2 个拓扑三角形,其中 $NC_1 \leq C_{n_1}^3$, $NC_2 \leq C_{n_2}^3$ 。对两雷达间任意两个拓扑三角形进行假设配对 $\langle S_i^1, S_j^2 \rangle$,共可得到 $NC_1 \times NC_2$ 个不同的假设,所有假设配对构成的集合可表示为 $\Theta = \{\langle S_i^1, S_j^2 \rangle | 0 \leq i \leq NC_1, 0 \leq j \leq NC_2\}$ 。

由于空间的旋转平移差异并不会改变航迹间的拓扑关系,因而如果两部雷达的 3 个航迹对是一一对应的,即每个航迹对都源于同一目标,则相应假设配对的两个拓扑三角形间应该是全等的^[24-27]。根据逆否命题与原命题等价可知,如果假设配对内的两个拓扑三角形是不相等的,则其所包含的航迹对肯定不都是一一对应的。相应地,该假设配对也是错误的,因此通过三角形全等匹配,可以过滤消除大部分错误配对假设。

下面以假设配对 $\langle S_i^1, S_j^2 \rangle$ 为例,对假设配对的三角形匹配方法进行说明。根据 3 个边相等的三角形全等定理,构建如下的三角形匹配系数计算公式和阈值检验公式:

$$\alpha_{ij}^1 = \exp\left(-\frac{(l_{i_1}^1 - l_{j_1}^2)^2}{2(R_{i_1}^1 + R_{j_1}^2)}\right) \exp\left(-\frac{(l_{i_2}^1 - l_{j_2}^2)^2}{2(R_{i_2}^1 + R_{j_2}^2)}\right) \cdot$$

$$\exp\left(-\frac{(l_{i_3}^1 - l_{j_3}^2)^2}{2(R_{i_3}^1 + R_{j_3}^2)}\right) \quad (9)$$

$$\alpha_{ij} \geq \delta_1 \quad (10)$$

式中, $0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$, $\alpha_{ij}^1 t$ 在两拓扑三角形匹配情况下为三维正态分布, $t = 1 / \sqrt{(2\pi)^3 (R_{i_1}^1 + R_{j_1}^2)(R_{i_2}^1 + R_{j_2}^2)(R_{i_3}^1 + R_{j_3}^2)}$; δ_1

为三角形匹配阈值, 可按照匹配情况下 95% 置信概率边界将其设置为 $\exp(-6)$, 也可进一步根据实验进行调整。由于拓扑三角形的边已按照从大到小的顺序进行排列, 因此在式(9)中只需要对应次序的边进行相减即可。

采用式(9)和式(10)对 Θ 中各个假设配对进行三角形匹配, 如果假设配对的三角形匹配系数 α^1 满足式(10), 则认为假设配对是初步合理的, 需进一步进行空间差异参数一致性验证, 即进行航迹图匹配。如果不满足式(10), 则认为假设配对是错误的, 直接排除舍弃, 不再进行后续操作。

2.3 航迹图匹配

如果假设配对在满足三角形匹配的基础上, 还满足空间差异参数一致性约束, 则假设配对为真将是大概率事件, 即可以认为假设配对所包含的 3 个航迹对是关联的。其中, 空间差异参数一致性是指基于正确假设配对求取的空间差异参数, 还应适用于雷达子空间内的其他航迹, 即通过空间差异参数修正, 两雷达航迹应是基本重合的, 所对应的雷达航迹图也是匹配的。基于上述思路, 下面对假设配对的航迹图匹配方法, 即空间差异参数一致性验证方法, 进行具体说明。

利用假设配对 $\langle S_i^1, S_j^2 \rangle$ 内两个拓扑三角形对应的航迹点, 根据雷达间空间差异模型式(1), 可得

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{j_k}^2 \\ \hat{y}_{j_k}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{i_k}^1 \\ \hat{y}_{i_k}^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $k=1, 2, 3$ 表示拓扑三角形的 3 个顶点。

当 $k=1, 2, 3$ 时, 对式(11)中 3 个等式进行相加相减运算, 可得

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $a = x_{j_1}^2 + x_{j_3}^2 - 2x_{j_2}^2$, $b = y_{j_1}^2 + y_{j_3}^2 - 2y_{j_2}^2$, $c = x_{i_1}^1 + x_{i_3}^1 - 2x_{i_2}^1$, $d = y_{i_1}^1 + y_{i_3}^1 - 2y_{i_2}^1$ 。

对式(12)进行展开求和, 可得

$$a + b = (c + d) \cos \theta + (c - d) \sin \theta \quad (13)$$

利用三角函数的积化和差运算, 可得旋转参数的估计为

$$\hat{\theta} = \arcsin \frac{a + b}{\sqrt{(c + d)^2 + (c - d)^2}} - \vartheta \quad (14)$$

式中,

$$\vartheta = \arcsin \frac{c + d}{\sqrt{(c + d)^2 + (c - d)^2}} \quad (15)$$

当 $k=1, 2, 3$ 时, 对式(11)中 3 个等式相加, 并代入旋转估计 $\hat{\theta}$, 可得平移参数的估计为 δ_2 。

$$\begin{bmatrix} \hat{\tau}_x \\ \hat{\tau}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^3 \hat{x}_{j_k}^2 \\ \sum_{k=1}^3 \hat{y}_{j_k}^2 \end{bmatrix} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & -\sin \hat{\theta} \\ \sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^3 \hat{x}_{i_k}^1 \\ \sum_{k=1}^3 \hat{y}_{i_k}^1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

实际中, 两部雷达经过标校, 存在的系统误差不会太大, 根据实测历史数据, 可设定雷达 1 和雷达 2 航迹点间旋转和平移可能范围, 对求得空间差异参数过大的配对, 直接舍弃。

利用估计出的空间差异参数, 根据雷达间空间差异模型式(1), 对雷达 1 时间滑窗内的所有航迹数据进行修正, 并根据空间栅格化公式:

$$\mathbf{D} = [d_{lm}] \quad (17)$$

$$\begin{cases} d_{lm} = d_{lm} + 1, & \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \in G(d_{lm}) \\ d_{lm} = d_{lm}, & \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \notin G(d_{lm}) \end{cases} \quad (18)$$

$$G(d_{lm}) = \{(x_0 + g(l-1), y_0 + g(m-1)), (x_0 + lg, y_0 + mg)\} \quad (19)$$

把雷达 1 同一子空间矢量航迹转化为标量航迹图 \mathbf{D}_{ij}^1 , 下标 i 和 j 表示在 $\langle S_i^1, S_j^2 \rangle$ 拓扑三角形配对假设。对于雷达 2 航迹, 无需修正, 直接根据空间栅格化式(17)~式(19), 求解得到航迹图 \mathbf{D}^2 。其中, (x_0, y_0) 为空间左下角边界点的坐标; (x, y) 为航迹点坐标; g 为航迹图单个像素的距离分辨率; $G(d_{lm})$ 为第 l 行第 m 列像素对应的空间范围, 用左下右上边界点表示, d_{lm} 为第 l 行第 m 列像素的强度, 对应 $G(d_{lm})$ 内存在的航迹点数量, 初始值为 0。

借鉴图像配准中互相关系数的定义, 求取假设配对 $\langle S_i^1, S_j^2 \rangle$ 的航迹图匹配系数公式为

$$\alpha_{ij}^2 = \frac{\sum_l \sum_m D_{ij}^1(l, m) D^2(l, m)}{\sqrt{\sum_l \sum_m D_1(l, m)^2} \sqrt{\sum_l \sum_m D_2(l, m)^2}} \quad (20)$$

进而, 对得到的匹配系数进行阈值判断:

$$\alpha_{ij}^2 \geq \delta_2 \quad (21)$$

排除舍弃小于阈值的假设配对。其中, δ_2 为航迹图匹配系数阈值。 $0 \leq \alpha_{ij}^2 \leq 1$ 在两个航迹图完全匹配情况下, 互相关匹配系数为 1, 完全不匹配情况下, 匹配系数为 0, 因此可初步设置 $\delta_2 = 0.4$, 也可利用历史数据进一步优化设置。

2.4 航迹关联

综合三角形匹配系数和航迹图匹配系数, 可得假设配对的综合匹配系数为

$$f(\langle S_i^1, S_j^2 \rangle) = \lambda_1 \alpha_{ij}^1 + \lambda_2 \alpha_{ij}^2 \quad (22)$$

式中, λ_1 和 λ_2 为加权值。根据三角形匹配系数和航迹图匹配系数的可信度和稳定性进行设置, 系数的可信度高, 其权值就大。一般情况下可设权值相同, 均为 0.5, 如果雷达量

测误差小、航迹点波动小,可设 $\lambda_1 = 0.7, \lambda_2 = 0.3$; 如果雷达量测误差大,三角形匹配系数的准确性和可信性将会降低,可设 $\lambda_1 = 0.3, \lambda_2 = 0.7$ 。

由于假设配对是由 3 个航迹对直接组成的,航迹对的关联准确性直接决定了假设配对的匹配程度,因此可把假设配对的匹配系数作为所含航迹对的关联系数,进而可得 3 个航迹对的关联系数为

$$f(i_1, j_1) = f(i_2, j_2) = f(i_3, j_3) = f(\langle S_i^1, S_j^2 \rangle) \quad (23)$$

根据式(22),求取经过两次匹配过滤后所保留配对假设的综合匹配系数,进一步根据式(23),求取配对假设包含的所有航迹对的关联系数,并最终得到雷达间航迹关联矩阵:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n_2} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n_1 1} & f_{n_1 2} & \cdots & f_{n_1 n_2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式(24)中,如果两条航迹间没有对应的匹配拓扑三角形,其关联系数设置为 0。如果某一航迹对的关联系数可由多个不同配对假设得到,对应多个不同的关联系数,则仅保留其中最大的关联系数。

采用最大关联系数和阈值判别原则进行航迹关联判断^[28-31],其具体过程是:首先在矩阵 F 中找出最大元素 f_{lm} ,如果 $f_{lm} > \delta$,则判定航迹 l 与 m 为同一目标航迹。然后从矩阵 F 中划去 f_{lm} 所对应的行、列元素,得到新的降阶关联矩阵 F_1 ,但原矩阵的行、列号(即航迹号)不变,重复上述过程直到矩阵的最大元素小于 δ 。其中,参数 δ 是阈值,通常取 $\delta \geq 0.5$ 。

2.5 计算量分析

下面对比传统算法,对三角形方法的最大计算量进行分析。假设当前时间滑窗内雷达 1 和雷达 2 各自存在 n_1 和 n_2 条航迹,则传统方法需要计算任意两个航迹间的统计距离,其计算量近似为 $O(n_1 n_2)$ 。三角形方法需要首先计算任意拓扑三角形的边长和方差,计算量为 $O(C_{n_1}^3 + C_{n_2}^3)$ 。然后对拓扑三角形进行匹配,计算量为 $O(C_{n_1}^3 C_{n_2}^3)$ 。最后进行航迹图匹配,最大计算量为 $O(C_{n_1}^3 C_{n_2}^3)$ 。因此,总的计算量大致为 $O(C_{n_1}^3 C_{n_2}^3 + C_{n_1}^3 C_{n_2}^3 + C_{n_1}^3 + C_{n_2}^3) \approx O(C_{n_1}^3 C_{n_2}^3)$ 。设定 n_1 和 n_2 均为 10,则传统方法的计算量为 $O(100)$,三角形法的计算量为 $O(120 \times 120)$,计算量显著增加。因此,为缓解拓扑三角形构建过程中存在的组合爆炸问题,根据多雷达航迹间空间差异大小和目标分布密度,对多雷达共视海域进行划分,在产生的各个子空间中采用本文算法进行独立并行处理。同时,设置合理的阈值,尽早剔除无效无用的拓扑三角形。

3 算法验证

基于两部舰载导航雷达实测数据,结合海上目标航迹

特点,模拟典型实际场景,设计 3 种测试数据,并通过与典型拓扑关联算法^[15]进行性能比较,验证本文所提算法在实际运用中的有效性。

测试数据 1 雷达 1 航迹数据采用导航雷达实测数据,雷达 2 航迹数据通过对雷达 1 航迹数据添加平移误差 $\tau_{xy} = [500 \text{ m}, 800 \text{ m}]^T$ 、旋转误差 $\theta = 1^\circ$ 以及随机噪声,并去除某条航迹来产生,以验证常态环境下算法的性能。

测试数据 2 在测试数据 1 中,将雷达 2 与雷达 1 间的空间平移和旋转误差增大 3 倍,以验证算法对恶化环境的适应能力,检验算法的鲁棒性。

测试数据 3 雷达 1 与雷达 2 分别采用具有共视区域的两部导航雷达数据,进一步验证算法的工程实用性。

在测试数据 1 中,如图 2 所示,雷达 2 与雷达 1 航迹数据虽有一定偏离,但航迹关联关系是人工可辨的,本文算法对测试数据 1 的处理结果如表 1 所示,对比算法的处理结果如表 2 所示。

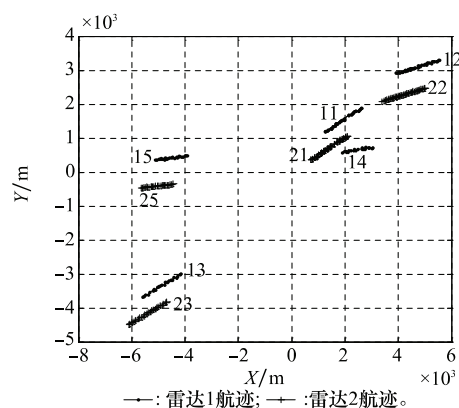


图 2 测试数据 1 中雷达原始航迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radar original track in test data 1

表 1 测试数据 1 下本文算法关联结果

Table 1 Correlation result of the algorithm in this paper under test data 1

参数	关联对(雷达 1—雷达 2)			
	15—25	13—23	11—21	12—22
X 平移误差估计/m	512.14	512.14	512.14	515.75
Y 平移误差估计/m	807.71	807.71	807.71	810.12
旋转误差估计/(°)	0.784	0.784	0.784	0.723

表 2 测试数据 1 下对比算法关联结果

Table 2 Correlation result of the comparison algorithm under test data 1

参数	关联对(雷达 1—雷达 2)			
	15—25	13—23	11—21	12—22
X 平移误差估计/m	534.67	542.81	558.72	566.57
Y 平移误差估计/m	868.24	878.50	878.95	884.71
旋转误差估计/(°)	0.751	0.719	0.707	0.683

对比表 1 和表 2,两种算法均成功实现了所有 4 对航迹的有效关联。但由于本文算法保有三角形的稳定性,其空间差异参数的估计精度优于对比算法,估计出的最好平移

误差为 $[512.14\text{ m}, 807.71\text{ m}]^T$,精度达到 97%,估计出的最好旋转误差为 0.784° ,精度达到 78%。经过测试数据 1 验证可知,在常态环境中,本文算法的关联性能与对比算法相同,空间差异参数估计精度优于对比算法。

如图 3 所示,在测试数据 2 中,由于空间误差较大,雷达 2 航迹数据与雷达 1 航迹数据完全偏离,人工直观上也难以给出雷达间航迹关联关系。本文算法对测试数据 2 的处理结果如表 3 所示,对比算法的处理结果如表 4 所示。对比表 3 和表 4,本文算法成功实现所有 4 对航迹的正确关联,对比算法仅能正确关联两对航迹。同时,本文算法的空间差异参数估计精度也明显优于对比算法,估计出的最好平移误差为 $[1\ 476.42\text{ m}, 2\ 353.41\text{ m}]^T$,精度达到 98%,估计出的最好旋转误差为 2.42° ,精度达到 80%。经过测试数据 2 验证可知,在恶化环境中,本文算法性能几乎不受影响,关联性能和空间差异参数估计精度均明显优于对比算法,具有较高的鲁棒性和稳定性。

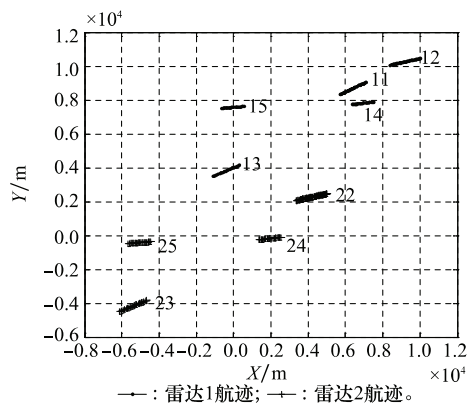


图 3 测试数据 2 中雷达原始航迹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of radar original track in test data 2

表 3 测试数据 2 下本文算法关联结果

Table 3 Correlation result of the algorithm in this paper under test data 2

参数	关联对(雷达 1—雷达 2)			
	13—23	15—25	14—24	12—22
X 平移误差估计/m	1 476.4	1 476.4	1 476.4	1 453.3
Y 平移误差估计/m	2 353.4	2 353.4	2 353.4	2 336.3
旋转误差估计/ $^\circ$	2.4	2.4	2.4	2.3

表 4 测试数据 2 下对比算法关联结果

Table 4 Correlation result of the comparison algorithm under test data 2

参数	关联对(雷达 1—雷达 2)	
	13—23	14—24
X 平移误差估计/m	1 248.3	1 264.0
Y 平移误差估计/m	2 281.1	2 291.7
旋转误差估计/ $^\circ$	2.1	2.0

本文算法对测试数据 3(见图 4)的处理结果如图 5 和表 5 所示,对比算法的处理结果如表 6 所示。对比表 5 和表 6 可知,除航迹 29 和航迹 210 外(在雷达 1 中均没有对应的

航迹),本文算法成功实现所有 8 对航迹的有效关联,对比算法仅成功关联 5 对航迹,可见本文算法关联性能更优。同时,由于受雷达间数据差异性的影响,不同匹配航迹对估计出的参数差异有一定差别,但这些差异并没有影响本文算法的关联结果,因而本文算法具有较强工程实用性。经实验验证,对于目标数量超过 20 的关联场景,本文算法的计算耗时超过 5 min,已无法工程应用,需要通过场景分割,进一步减少目标数量,提高计算效率。

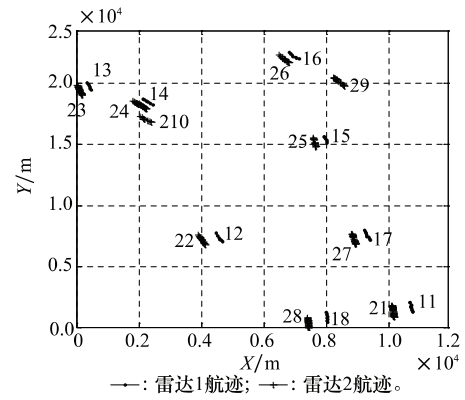


图 4 测试数据 3 中雷达原始航迹示意图

Fig. 4 Schematic diagram of radar original track in test data 3

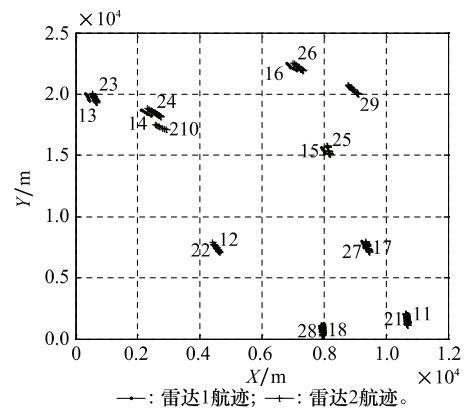


图 5 测试数据 3 下本文算法补偿后雷达航迹示意图

Fig. 5 Schematic diagram of radar track after algorithm compensation in this paper under test data 3

表 5 测试数据 3 下本文算法关联结果

Table 5 Correlation result of the algorithm in this paper under test data 3

雷达	关联对							
1	17	12	11	18	14	13	16	15
2	27	22	21	28	24	23	26	25

表 6 测试数据 3 下对比算法关联结果

Table 6 Correlation result of the comparison algorithm under test data 3

雷达	关联对				
1	17	12	11	18	14
2	27	22	21	28	24

综上所述可知,本文算法具有强稳定性和鲁棒性,可有效解决实际中的海上目标航迹关联问题,消除冗余航迹、提供统一态势,但对于密集目标环境来说,存在计算耗时显著增加的问题,需要研究提升算法的计算效率。

4 结 论

本文针对实际海上目标航迹特点,利用三角形拓扑结构的稳定特性,研究设计了适用于海上目标航迹的抗差关联算法。实测数据验证结果表明,无论是常态关联环境还是恶化关联环境,所提算法均能保持稳定有效的关联性能,对实际环境具有较强适应性和实用性。

为进一步扩展算法的适用范围,下一步将重点研究同时存在时间和空间误差的海上目标航迹关联问题,以期提高算法的广泛适用性。

参考文献:

- [1] 何友, 王国宏, 关欣. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
HE Y, WANG G H, GUAN X. Information fusion theory and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [2] 齐林, 王海鹏, 熊伟, 等. 基于先验信息的多假设模型中断航迹关联算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 732-739.
QI L, WANG H P, XIONG W, et al. Track segment association algorithm based on multiple hypothesis models with priori information[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(4): 732-739.
- [3] TESTA L A, PICKLE C D, BLACKMAN S S. A dempster-shafer approach to multi-sensor track association[C]//Proc. of the IEEE Aerospace Conference, 2016.
- [4] YANG M, WU Y W, JIA Y D. A hybrid data association framework for robust online multi-object tracking[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2017, 26(12): 5667-5679.
- [5] 刘根旺, 刘永信, 纪永刚, 等. 基于模糊双门限的高频地波雷达与 AIS 目标航迹关联方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(3): 557-562.
LIU G W, LIU Y X, JI Y G, et al. Track association for high-frequency surface wave radar and AIS based on fuzzy double threshold theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(3): 557-562.
- [6] 袁天, 陶建锋, 李兴成. 基于关联准则的主辨航迹欺骗干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(2): 273-279.
YUAN T, TAO J F, LI X C. Main lobe track deception jamming method based on association rule[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(2): 273-279.
- [7] TIAN W, WANG Y, SHAN X M, et al. Analytic performance prediction of track-to-track association with biased data in multi-sensor multi-target tracking scenarios[J]. Sensors, 2013, 13(9): 12244-12265.
- [8] HE X X, WANG T, LIU W, et al. Measurement data fusion based on optimized weighted least-squares algorithm for multi-target tracking[J]. IEEE Access, 2019, 7: 13901-13916.
- [9] XU Z J, LI J C, CHEN Y F. Survey of track association of radar and AIS[C]//Proc. of the 2nd International Conference on Image, Vision and Computing, 2017.
- [10] ZHANG X Y, TAN S C. Effect of biased estimation on radar-to-ESM, track association[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(2): 188-194.
- [11] ZHU H, WANG M L, YUEN K V, et al. Track-to-track association by coherent point drift[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, 24(5): 634-647.
- [12] ZHU H Y, WANG W, WANG C. Robust track-to-track association in the presence of sensor biases and missed detections[J]. Information Fusion, 2016, 27: 33-40.
- [13] LI P, GE H W, WANG W H. Track association for B-spline Gaussian mixture PHD filter using shape information[C]//Proc. of the 3rd Information Technology & Mechatronics Engineering Conference, 2017.
- [14] ZHANG Y J, LEI M. PHD track association algorithm based on measurement partition[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(4): 62-70.
- [15] SHENG H, ZHANG Y, CHEN J H, et al. Heterogeneous association graph fusion for target association in multiple object tracking[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 29(11): 3269-3280.
- [16] LI X, HE C L, WU W, et al. An adaptive technique for track association against large bias[C]//Proc. of the 7th International Symposium on Computational Intelligence & Design, 2015.
- [17] 李保珠, 董云龙, 李秀友, 等. 基于 t 分布混合模型的抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1774-1778.
LI B Z, DONG Y L, LI X Y, et al. Anti-bias track association algorithm based on t-distribution mixture model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(7): 1774-1778.
- [18] GENG W D, WANG Y Q, DONG Z H. Single-group-target data association and track maintenance[M]//Group-target Tracking. Singapore: Springer, 2017: 85-98.
- [19] 杨哲, 韩崇昭, 李晨, 等. 基于目标之间拓扑信息的数据关联方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2357-2360.
YANG Z, HAN C Z, LI C, et al. Data association based on target topology[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2357-2360.
- [20] 齐林, 熊伟, 何友. 基于距离分级聚类的机载雷达航迹抗差关联算法[J]. 电子学报, 2018, 46(6): 198-204.
QI L, XIONG W, HE Y. Anti-bias track association algorithm for aircraft platforms based on distance hierarchical clustering[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(6): 198-204.
- [21] QI L, DONG K, LIU Y, et al. Anti-bias track-to-track association algorithm based on distance detection[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(2): 269-276.
- [22] QI L, HE Y, DONG K, et al. Multi-radar anti-bias track association based on the reference topology feature[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(3): 366-372.
- [23] 齐林, 刘瑜, 任华龙, 等. 空基多雷达航迹抗差关联算法[J]. 航空学报, 2018, 39(3): 321691-1-321691-9.

- QI L, LIU Y, REN H L, et al. Air-platform multi-radar anti-bias tracks association algorithm[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2018, 39(3): 321691-1-321691-9.
- [24] ZHU H, LEUNG H, YUEN K V. A joint data association, registration, and fusion approach for distributed tracking[J]. *Information Sciences*, 2015, 324: 186-196.
- [25] TOKTA A, HOCAOGLU A K. A fast track to track association algorithm by sequence processing of target states[C]// *Proc. of the 21st International Conference on Information Fusion*, 2018.
- [26] ZHU H Y, WANG C. Joint track-to-track association and sensor registration at the track level[J]. *Digital Signal Processing*, 2015, 41: 48-59.
- [27] YUAN T, KRISHNAN K, CHEN Q, et al. Object matching for inter-vehicle communication systems-an IMM-based track association approach with sequential multiple hypothesis test[J]. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(12): 3501-3512.
- [28] WANG K D, GE Y. Real-time flight test track filtering and association using Kalman filter and QDA classifier[C]// *Proc. of the International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 2017: 675-685.
- [29] XIE Y F, HUANG Y, SONG T L. Iterative joint integrated probabilistic data association filter for multiple-detection multiple-target tracking[J]. *Digital Signal Processing*, 2017, 72: 232-243.
- [30] CHONG C Y, MORI S, BARKER W H, et al. Architectures and algorithms for track association and fusion[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, 15(1): 5-13.
- [31] MORI S, BARKER W, CHONG C Y, et al. Track association and track fusion with nondeterministic target dynamics[J]. *IEEE Trans. on Aerospace & Electronic Systems*, 2002, 38(2): 659-668.

作者简介:

崔亚奇(1987-),男,讲师,博士,主要研究方向为深度学习、多传感器信息融合。

E-mail:cui_yaqi@126.com

熊伟(1978-),男,教授,博士,主要研究方向为多传感器信息融合。

E-mail:xiongweimail@tom.com

顾祥岐(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为雷达数据处理、信息融合。

E-mail:guxiangqi1314@163.com