

地波雷达与自动识别系统目标点迹最优关联算法

张 晖^① 刘永信^{*①} 张 杰^② 纪永刚^② 郑志强^①

^①(内蒙古大学电子信息工程学院 呼和浩特 010021)

^②(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

摘 要: 为了提高海洋探测精度和范围, 针对高频地波雷达(HFSWR)和自动识别系统(AIS)目标点迹的融合利用问题, 该文提出一种基于 JVC(Jonker-Volgenant-Castanon)的点迹分状态全局最优关联算法。首先, 通过判断高频地波雷达和 AIS 点迹的径向速度, 将点迹分为准静态目标和动态目标。接着, 选取径向速度和点迹间的球面距离为特征参数, 对不同状态下目标点迹分别进行径向速度和位置间球面距离粗关联。最后, 使用相对距离比的平均值进行关联效果的评价, 通过选择合适的关联门限参数, 使用 JVC 算法实现高频地波雷达和 AIS 的点迹最优关联。实验结果表明: 该算法在关联相同点迹对数的情况下, 关联精度高于最近邻(NN)算法和 Munkres 关联法, 关联用时少于最近邻算法和 Munkres 关联法。通过近 3 年内 3 组不同时刻实测目标点迹的验证, 该算法可以满足关联的实用性和实时性要求。

关键词: 高频地波雷达; 自动识别系统; 数据关联; 最优关联; JVC(Jonker-Volgenant-Castanon)算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)03-0619-06

DOI: 10.11999/JEIT140678

Target Point Tracks Optimal Association Algorithm with Surface Wave Radar and Automatic Identification System

Zhang Hui^① Liu Yong-xin^① Zhang Jie^② Ji Yong-gang^② Zheng Zhi-qiang^①

^①(College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

^②(First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to solve the problem that of High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR) and Automatic Identification System (AIS) target point tracks fusion, a point tracks association algorithm using Jonker-Volgenant-Castanon (JVC) global optimal matching for different status is proposed. Firstly, the HFSWR and AIS target point tracks are divided into the quasi-static and dynamic data by the radial velocity. Then the radial velocity and spherical distance are selected as the feature parameters, and the different status data are respectively pre-associated by the radial velocity and spherical distance. Finally, the average of relative distance ratio is used to evaluate the effect of association. According to the selection of threshold parameter, the HFSWR and AIS point tracks are optimal associated with the JVC algorithm. The experimental results indicate that the proposed algorithm, in the condition of equal number point tracks associated, is superior to the Nearest Neighbor (NN) algorithm and Munkres association algorithm in the association accuracy, and the associate time is less than the NN algorithm and Munkres association. Moreover, three different time data gained from the target traits measured in nearly three years demonstrate that the feasibility and real-time of the proposed method.

Key words: High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR); Automatic Identification System (AIS); Data association; Optimal association; Jonker-Volgenant-Castanon (JVC) algorithm

1 引言

海洋是国民经济可持续发展的战略空间, 也是国家安全的重要屏障。卫星、航空、舰载及岸基雷达、舰船自动识别系统(Automatic Identification

System, AIS)是目前海上船只目标的主要探测手段。AIS 能提供合作舰船的经度、纬度、速度、对地航向、船号、船的长度和宽度等信息, 且定位精度较高。高频地波雷达(High Frequency Surface Wave Radar, HFSWR)可实时监控监测并跟踪船只, 但空间分辨率较低, 定位精度低于 AIS。利用高频地波雷达与 AIS 点迹数据融合信息, 可以有效提高海上船只目标的探测范围和精度。对于某一

2014-05-21 收到, 2014-09-22 改回

国家自然科学基金(61362002)和海洋公益性科研专项(200905029)资助课题

*通信作者: 刘永信 yxliu@imu.edu.cn

刻的目标点迹融合, 必须准确地判断雷达和 AIS 点迹的对应关系, 有效地判断哪些目标点迹信息是来自同一个目标的信息。

现有的雷达和 AIS 的融合应用主要分为两种: 点迹融合^[1,2]和航迹融合^[3,4]。点迹融合主要关注某一时间点的目标分布情况, 航迹融合则关注某一时间段的目标航迹情况。本文主要针对雷达和 AIS 点迹融合展开研究。国内外雷达和 AIS 的目标点迹融合主要集中在最近邻(Nearest Neighbor, NN)算法^[5]、统计分析法^[6,7]、反向传播(Back Propagation, BP)神经网络关联法^[8]和模糊关联法^[9]等算法。文献[5]将高频地波雷达数据与 AIS 和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)点迹数据使用最近邻算法进行关联, 评估高频地波雷达的船只探测跟踪精度。文献[6]和文献[10]在分析雷达和 AIS 融合理论的基础上, 提出协方差矩阵计算方法, 同时针对融合中数据不一致问题, 做了详细的分析。文献[7]通过对高频雷达探测中大量不同类型船只径向距离和径向速度等统计数据进行分析, 以 AIS 统计数据作为参考, 从统计数据整体上评估雷达测试精度。文献[8]对 AIS 和雷达点迹间利用 BP 神经网络进行关联做了研究准备工作。文献[9]使用一种基于最大隶属度关系的改进模糊互相关算法融合大量的雷达和 AIS 观测数据。文献[11]通过高频地波雷达和 AIS 信息的融合比对提出一种雷达天线校正算法。文献[2]和文献[12]通过径向速度、径向距离和方位角进行地波雷达与 AIS 点迹间的关联, 取得了很好的关联效果。上述工作为地波雷达和 AIS 点迹关联提供了方法借鉴和参考。

JVC(Jonker-Volgenant-Castanon)分配是由 Jonker, Volgenant 和 Castanon 3 人共同提出的一种线性分配算法, 常用于解决数据关联中的最优关联计算问题。针对实际应用环境中高频地波雷达

和 AIS 目标点迹密集分布下的关联问题, 本文借鉴多传感器的全局最优关联算法^[13], 将 JVC 算法引入目标点迹关联中, 以点迹间的球面距离作为代价函数, 以相对平均距离比作为评价指标, 进行最优球面距离的关联优化, 实现高频地波雷达和 AIS 点迹的全局最优关联, 从而为密集环境中的雷达和 AIS 目标点迹关联提供了一种新的实用算法。

2 数据源及数据预处理

实验时间为 2011 年 10 月 31 日, 实验区在中国某海域, 经纬度范围 $35.0^{\circ}\sim 40.0^{\circ}\text{N}$, $117.5^{\circ}\sim 123.0^{\circ}\text{E}$ 。实验数据包括覆盖实验区的高频地波雷达和 AIS 目标点迹数据。

高频地波雷达提供的目标点迹信息有探测频率、经度、纬度、径向速度、角度(与雷达主波束之间夹角)、探测距离。AIS 信息包括经度、纬度、速度、对地航向、船号、船的长度和宽度等信息。鉴于不同运动状态的船只的 AIS 信息更新频率不同, 选择高频地波雷达探测时间的前后 5 min 的 AIS 数据, 从中选取雷达探测时间最近更新的 AIS 目标点迹信息作为该时刻的 AIS 目标点迹。

2011 年 10 月 31 日 09:18:50 时刻高频地波雷达目标点迹如图 1 所示, AIS 目标点迹如图 2 所示。该时刻, 高频地波雷达共探测到 336 个目标点迹, AIS 共探测到 836 个。从图 1 和图 2 中可以看出, AIS 监测的范围大于高频地波雷达, 图 2 中经纬度在 $35.0^{\circ}\sim 37.0^{\circ}\text{N}$ 和 $117.5^{\circ}\sim 119.0^{\circ}\text{E}$ 范围内的目标属于高频地波雷达所探测不到的区域, 为了减少后续数据处理的复杂度, 提前对 AIS 数据进行粗处理, 对于监测范围属于 $35.0^{\circ}\sim 37.0^{\circ}\text{N}$, $117.5^{\circ}\sim 119.0^{\circ}\text{E}$ 的 AIS 目标不进行关联分析。

3 基于 JVC 的分状态数据关联算法

常用的数据关联算法有最近邻算法、全局最近邻算法、联合概率数据关联(Joint Probability Data

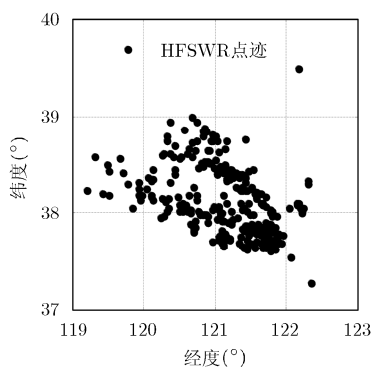


图1 2011年10月31日高频地波雷达目标点迹分布

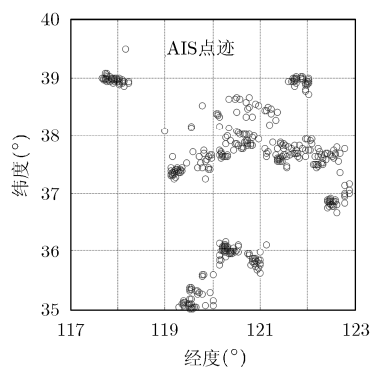


图2 2011年10月31日AIS目标点迹分布

Association, JPDA)算法、多假设跟踪算法(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)等^[13]。高频地波雷达和 AIS 点迹数据探测范围不同,属于不同类别传感器之间的数据关联,点迹信息并不存在一一对应关系,干扰点不能通过杂波模型进行分析,JPDA 和 MHT 算法无法应用。最近邻算法适用于点迹稀疏的情况下进行点迹关联,在点迹密集地区容易发生误关联。全局最近邻算法从全局考虑,寻找全局代价最小的最优关联,常见的最优关联算法中 Munkres 和 JVC 算法的最优分配效果优于拍卖算法, JVC 算法的容错性优于 Munkres 算法和拍卖算法^[14]。JVC 算法在获得一一关联最优解的同时保持算法的高计算效率^[13],通过对数据的深入分析,采用分状态 JVC 最优关联算法进行高频地波雷达与 AIS 目标点迹关联。

3.1 特征向量的选择及计算

高频地波雷达的空间分辨率较低,如果高频地波雷达和 AIS 点迹仅以位置数据关联,在局部点迹密集区域,很容易造成误关联。为了提高关联的准确性,减少误关联,采用径向速度和距离作为关联的特征参数。

3.1.1 径向速度的计算 高频地波雷达点迹数据中提供径向速度, AIS 点迹数据中未提供径向速度,采用式(1)计算 AIS 速度在径向角度的速度投影。

$$V_{AISR,i} = \cos(\text{cog}_i - w_0) \times \text{sog}_i \quad (1)$$

其中 cog_i 为 AIS 点迹的对地航向, sog_i 为 AIS 点迹的航速, w_0 为雷达主波束角度。

3.1.2 点迹间球面距离的计算 高频地波雷达和 AIS 采用两点间的球面距离来进行关联,高频地波雷达与 AIS 两点间的球面距离 Dist 采用式(2)进行计算。

$$\begin{aligned} & \text{Dist}(\text{lat}_{\text{HF SWR}}, \text{lon}_{\text{HF SWR}}, \text{lat}_{\text{AIS}}, \text{lon}_{\text{AIS}}) \\ &= R \times \arccos(\cos(\text{lat}_{\text{HF SWR}} \times \pi \times 180) \\ & \quad \times \cos(\text{lat}_{\text{AIS}} \times \pi \times 180) \times \cos(\text{lon}_{\text{HF SWR}} \\ & \quad \times \pi \times 180 - \text{lon}_{\text{AIS}} \times \pi \times 180) + \sin(\text{lat}_{\text{HF SWR}} \\ & \quad \times \pi \times 180) \times \sin(\text{lat}_{\text{AIS}} \times \pi \times 180)) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 R 为地球近似半径, lon , lat 为高频地波雷达与 AIS 点迹的经度和纬度。

3.2 点迹分状态数据关联算法流程

在数据关联过程中,关联门限的选择至关重要,选择合适的关联门限,有助于对来自同一目标的不同传感器的点迹进行关联。船只在静止状态和运动状态下,由于运动速度的不同,雷达距离测量误差也会有所差别,因此本算法首先将准静止状态和运动状态的船只进行分类,采用不同的距离关联门限

进行预关联,再分别使用 JVC 算法进行分状态最优距离关联。分状态数据关联算法流程如图 3 所示。

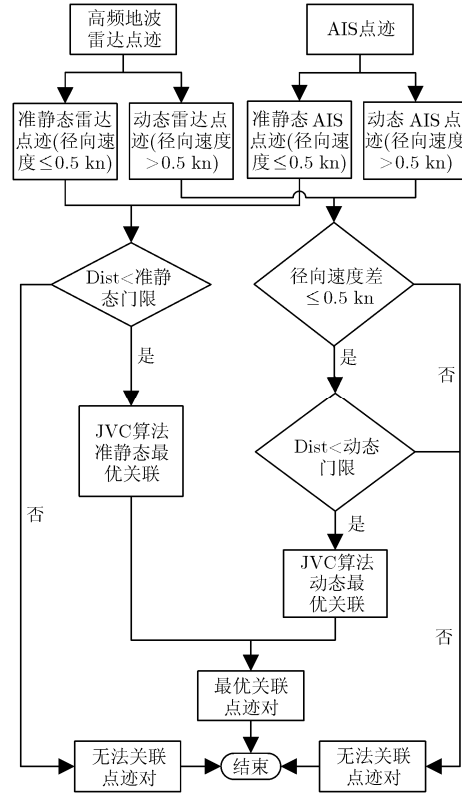


图3 分状态数据关联算法流程图

算法选取速度是否 $\leq 0.5 \text{ kn}$ 来区分准静态和运动点迹, AIS 准静态点迹所占的比例较高。准静态下,关联门限以式(3)实现,关联门限与高频地波雷达点的径向距离成比例,比例系数为 K_1 。点迹距离雷达的径向距离越远,探测误差越大,关联门限越大。

$$D_{\text{max}_{\text{QS},i}} = K_1 \times S_{R,i} \quad (3)$$

其中 $D_{\text{max}_{\text{QS},i}}$ 为准静态下第 i 个雷达点的关联门限值, $S_{R,i}$ 为第 i 个雷达点的径向距离。

运动状态下,以高频地波雷达动态点迹遍历 AIS 点迹,首先进行速度关联,对于径向速度差小于 0.5 kn 的点迹进一步判断距离门限是否符合关联要求^[8],运动状态下的关联门限以式(4)实现,动态情况下的关联门限与径向距离和径向速度有关,距离和径向速度越大,测量误差越大,关联门限值越大。

$$D_{\text{max}_{\text{D},i}} = K_2 \times S_{R,i} + K_3 \times V_{R,i} \quad (4)$$

其中 $D_{\text{max}_{\text{D},i}}$ 为动态下第 i 个雷达点的关联门限值, $V_{R,i}$ 为第 i 个雷达点的径向速度, K_2 为距离比例参数, K_3 为径向速度比例参数。

3.3 基于 JVC 最优距离匹配算法实现

JVC 算法的模型是指在 $c[i, j] - u[i] - v[j] \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 的条件下求

$$Y_{\max} = \max \left(\sum_{i=1}^m u[i] + \sum_{j=1}^n v[j] \right) \quad (5)$$

其中 $c[i, j]$ 为代价函数, 算法选择高频地波雷达和 AIS 两点间的球面距离作为代价函数, $u[i]$ 和 $v[j]$ 分别代表行变量和列变量的分配代价, 分别代表在最优解的过程中变量改变所导致的目标值的变化量^[15]。最优解的求解过程就是寻找最佳的一对一点迹关联, 使得关联点迹间的总球面距离最短。

在文献[16]的基础上, 将 JVC 算法应用于高频地波雷达和 AIS 的点迹关联中, JVC 算法最优距离匹配主要步骤为:

步骤 1 将所有高频地波雷达点迹信息输入到先进先出的队列, 选择队首的点迹信息开始处理。

步骤 2 寻找与该高频地波雷达点迹距离最小的两个 AIS 点迹。

步骤 3 计算两个 AIS 点迹的分配代价, 初始分配代价为 0, 计算当前两条最佳匹配点迹的差值。

步骤 4 分配高频地波雷达点迹到距离最小的 AIS 点迹, 如果匹配成功, 为已匹配 AIS 点迹的高频地波雷达点迹重新计算新的分配代价; 如果该点迹已与其他点迹匹配, 则重新计算分配代价, 为冲突的点迹重新寻找最优匹配。

步骤 5 继续下一点迹的匹配, 直到所有雷达点迹匹配完毕或小于迭代阈值时, 算法结束。

4 参数选择及算法验证

4.1 参数选择

关联算法的门限需要设置合适的参数 K_1, K_2, K_3 , 以达到匹配数与配对距离的平衡, 采用试探法来选择各关联门限参数。考虑到随着雷达点迹径向距离的不同, 雷达的测距误差会有明显的差别^[2]。对于关联效果的评价, 选择点迹间的相对距离比值的平均值作为主要评价因子。相对距离比计算如式(6)所示:

$$RDist_i = Dist_i / S_{R,i} \quad (6)$$

其中 $Dist_i$ 为第 i 个关联雷达点迹与关联 AIS 点迹间的球面距离。经过测算在径向距离为 200 km 时, 两点间的距离可以达到 19 km^[2], 选择 0.095 作为相对距离比的平均值的参考上限。

4.1.1 准静态门限参数 K_1 的选择 如表 1 所示, 随着 K_1 值的逐步增大, 准静态下相对距离比的平均值和关联点数也逐步增加, 当 $K_1=0.29$ 时, 相对距离比的平均值迅速增大到 0.1104, 考虑到准静态下的误差距离值较小, 选择 $K_1=0.28$ 。

表 1 K_1 的取值对准静态关联的影响

K_1 取值	相对距离比的平均值	速度差的平均值 (kn)	关联对数
0.22~0.26	0.0774	0.2663	15
0.27~0.28	0.0884	0.2531	16
0.29	0.1104	0.2743	18

4.1.2 动态门限参数 K_2 的选择 考虑到径向距离对距离的测算影响较大, 所以选择 K_2 作为影响动态关联的主要因素。选择 $K_3=0$ 时, 随着 K_2 的增加, 动态关联情况变化如表 2 所示, 当 $K_2=0.20$ 时, 相对距离比的平均值变化较大, 增大到 0.0974, 超出 0.095, 所以选择 $K_2=0.19$, 由 K_3 进行微调。

4.1.3 动态门限参数 K_3 的选择 确定参数 K_2 后, 对 K_3 的参数进行调整, K_3 变化对关联情况的影响如表 3 所示。当 $K_3=0.15$, 相对距离比的平均值增大到 0.1012, 但是关联对数无明显变化, 因此选择 $K_3=0.11$ 。

表 2 K_2 的取值对动态关联的影响

K_2 取值	相对距离比的平均值	速度差的平均值 (kn)	关联对数
0.18	0.0781	0.2432	43
0.19	0.0896	0.2408	44
0.20	0.0974	0.2438	47

表 3 K_3 的取值对动态关联的影响

K_3 取值	相对距离比的平均值	速度差的平均值 (kn)	关联对数
0.05	0.0916	0.2456	50
0.11~0.14	0.0950	0.2712	51
0.15	0.1012	0.2716	52

4.2 算法验证及比较

分别采用最近邻算法、Munkres 算法、分状态 JVC 关联算法对 2011 年 10 月 31 日 09:18:50 时的 336 个雷达目标点迹和 443 个 AIS 点迹进行点迹关联比较。

最近邻算法在阈值选取较小的时候关联效果较好。但当阈值增大时, 最近邻算法关联效果会明显变差, 关联 51 对时, 关联如图 4 所示, 图中实线连接表示实线两端的雷达点迹和 AIS 点迹为关联点迹对。

Munkres 关联算法采用式(4)计算关联门限, 关联效果如图 5 所示, 关联 51 对时, 相对距离比的平均值为 0.1159。

分状态 JVC 关联算法关联效果如图 6 所示, 在

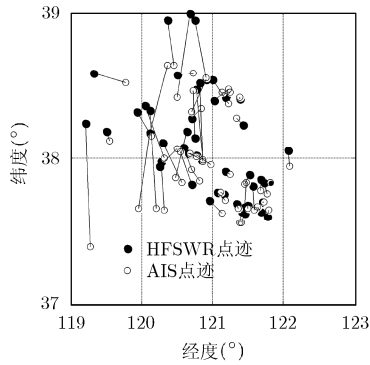


图4 最近邻算法关联效果

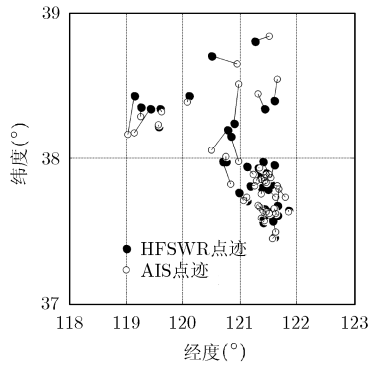


图5 Munkres算法关联效果

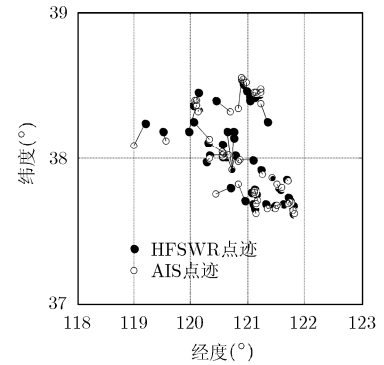


图6 分状态JVC关联效果

关联 51 对的情况下, 相对距离比的平均值为 0.0950。

在同样关联 51 对点迹的情况下, 各算法关联结果比较如表 4 所示。最近邻算法关联的相对距离比的平均值最大, Munkres 算法次之, 分状态 JVC 关联算法最小, 同时分状态关联算法计算时间也明显优于最近邻和 Munkres 算法。

表 4 3 种数据关联算法的比较

关联算法	相对距离比的平均值	速度差的平均值(kn)	关联对数	算法运行时间 (s)
最近邻算法	0.1761	0.2356	51	17.4
Munkres 算法	0.1140	0.2098	51	22.2
基于 JVC 最优匹配的分状态关联算法	0.0950	0.2712	51	10.9

4.3 算法实用性和实时性

为了验证算法的实用性, 分别采用 2012 年 4 月 23 日 10:10:45 时和 2013 年 9 月 6 日 09:18:45 时的两组实验数据, 进行分状态 JVC 数据关联验证, 其中 2012 年 4 月 23 日的的数据共包含 273 个雷达点迹和 474 个 AIS 点迹; 2013 年 9 月 6 日共包含 262 个雷达点迹和 874 个 AIS 点迹。

算法的实验结果如表 5 所示, 选择相对距离比的平均值的比值不大于 0.095 的最大关联情况作为关联条件, 分状态 JVC 数据关联算法可以保持约 15% 的关联比例, 对于 273 个雷达点迹和 474 个 AIS 点迹的数据关联, 在硬件环境为 Intel Core i3 CPU @3.3 GHz 处理器和 4 G 内存的普通计算机上可以在 10 s 内完成, 满足数据关联的实时性要求。

5 结束语

本文针对高频地波雷达与 AIS 点迹信息融合应用问题, 将线性分配 JVC 算法应用于雷达与 AIS 点迹的最优匹配中, 实现了点迹间距离的最优化匹

表 5 不同获取时刻的数据关联情况

实验数据 采集时间	关联比例 (%)	相对距离比的平均值	速度差的平均值 (kn)	算法运行时间 (s)
2011 年 10 月 31 日	15.2	0.0950	0.2712	10.9
2012 年 4 月 23 日	19.9	0.0940	0.3272	9.6
2013 年 9 月 6 日	15.6	0.0933	0.3120	9.4

配, 解决了点迹密集分布环境下的数据关联。在关联过程中, 为了提高运算速度和匹配精度, 通过径向速度的判断将点迹信息划分为准静态和动态点迹, 对于不同状态的点迹分别进行 JVC 最优匹配, 有效实现了分状态下目标点迹的最优关联。实验结果表明, 该算法在同样关联 51 对点迹的情况下, 关联精度高于最近邻算法和 Munkres 法, 关联用时少于最近邻法和 Munkres 法, 为地波雷达与 AIS 目标点迹关联提供了一种可行的方法。但是, 由于雷达的目标定位精度较低, 雷达与 AIS 的点迹关联比例较低, 下一步可以考虑进一步融合高精度的 SAR 图像数据进行船只点迹目标融合探测, 以便提高海洋探测的精度和范围, 同时可以起到校准雷达精度的作用。

参 考 文 献

- [1] Dobson C, Hostenstein K, Smith M, et al. Monostatic vessel detection statistics from the CODAR SeaSonde[C]. Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, San Diego, United States, 2013: 1-4.
- [2] Ji Y G, Zhang J, Meng J M, et al. Point association analysis of vessel targets detection with SAR, HFSWR and AIS[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(9): 73-81.
- [3] Habtemariam B K, Tharmarasa R, Meger E, et al. Measurement level AIS/radar fusion for maritime surveillance[C]. Proceedings of the SPIE Defense, Security, and Sensing symposium, Maryland, USA, 2012, 83930I: 1-8.
- [4] Chen J and Xie L. Research of Kalman filtering in ship

- track[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Information and Safety: Improving Multimodal Transportation Systems-Information, Safety, and Integration, Wuhan, China, 2013: 2464-2469.
- [5] Gurgel K W, Schlick T, Horstmann J, *et al.* Evaluation of an HF-radar Ship detection and tracking algorithm by comparison to AIS and SAR data[C]. Proceedings of the International Waterside Security Conference (WSS), Marina di Carrara, Italy, 2010: 1-6.
- [6] Kazimierski W and Stateczny A. Fusion of data from AIS and tracking radar for the needs of ECDIS[C]. Proceedings of the Signal Processing Symposium, 2013, Serock, Poland, 2013: 1-6.
- [7] Dzvonkovskaya A and Rohling H. HF radar performance analysis based on AIS ship information[C]. Proceedings of the 2010 IEEE Radar Conference, Washington DC, USA, 2010: 1239-1244.
- [8] Hu X R and Lin C C. A preliminary study on targets association algorithm of radar and AIS using BP neural network[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 1441-1445.
- [9] Liu C, Lin B, Liu X M, *et al.* Fuzzy correlation algorithm for multi-target fusion of automatic identification system and radar[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2013, 10(12): 2826-2830.
- [10] Kazimierski W. Problems of data fusion of tracking radar and AIS for the needs of integrated navigation systems at sea[C]. Proceedings of the 14th International Radar Symposium, Dresden, Germany, 2013: 270-275.
- [11] 田文龙, 李高鹏, 许荣庆. 利用自动识别系统信息进行高频地波雷达天线阵校正[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5): 1065-1069.
- Tian W L, Li G P, and Xu R Q. High frequency surface wave radar antenna array alibration using automatic identification system data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1065-1069.
- [12] 纪永刚, 张杰, 王祎鸣, 等. 双频率高频地波雷达船只目标点迹关联与融合处理[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(2): 266-271.
- Ji Y G, Zhang J, Wang Y M, *et al.* Ship detection point association surface and fusion with dual-frequency HF wave radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(2): 266-271.
- [13] 盛卫东, 林两魁, 安玮, 等. 基于全局最优的被动多传感器多目标轨迹关联算法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(7): 1621-1625.
- Sheng W D, Lin L K, An W, *et al.* A passive multisensor multitarget track association algorithm based on global optimization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1621-1625.
- [14] Kadar I, Eadan E R, and Gassner R R. Comparison of robustized assignment algorithms[C]. Proceedings of the Aerospace Defence Sensing and Control (AeroSense) Conference, Orlando, FL, USA, 1997: 240-249.
- [15] Jonker R and Volgenant A. A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems[J]. *Computing*, 1987, 38(4): 325-340.
- [16] Malkoff D B. Evaluation of the Jonker-Volgenant-Castanon (JVC) assignment algorithm for track association[C]. Proceedings of the Aerospace Defence Sensing and Control (AeroSense) Conference, Orlando, FL, USA, 1997: 228-239.
- 张 晖: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为图像处理、多传感器数据融合等.
- 刘永信: 男, 1955 年生, 教授, 研究方向为图像处理、多传感器数据融合等.
- 张 杰: 男, 1963 年生, 研究员, 研究方向为海洋遥感探测等.