

# 基于弧段检测的高频地波雷达特定目标航迹跟踪方法研究

张玲<sup>1</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 姜羲<sup>1</sup>, 纪永刚<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东省高校海洋机电装备与仪器重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 本文对现有的高频地波雷达目标跟踪方法进行了概述, 提出了一种地波雷达目标长时连续跟踪的方法, 基本思想是: 充分挖掘航迹弧段特征, 基于特征对船只运动建模, 并结合杂波背景进行融合决策。进一步, 为了达到长时间连续跟踪的需求, 借鉴深度学习的思想, 利用新获取的弧段数据对算法估计结果不断递归校正, 使得随着获取数据的增加跟踪越准确。该方法适用于杂波环境且在航道附近存在众多干扰船只的情况下对机动目标航迹的实时稳定跟踪, 为高频地波雷达在复杂干扰环境下特定目标持续跟踪提供理论基础和方法指导, 为充分发挥地波雷达在海上监视监测中的作用提供技术支撑。

**关键词:** 高频地波雷达; 目标跟踪; 目标检测; 船只航迹; 弧段检测

中图分类号: TN91 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)06-0133-06

doi: 10.11759/hyxx20151010001

高频地波雷达由于具有超视距、监测面积大、全天候等优点, 在监测我国专属经济区、维护国家权益方面具有重要作用, 具有早期预警并实时跟踪特定船只的能力<sup>[1-3]</sup>。地波雷达工作在复杂干扰环境中, 存在着电离层、海杂波、地杂波和射频干扰等有色噪声和非平稳干扰等噪声成分。如何在复杂干扰环境中有效地检测并持续跟踪到感兴趣的特定船只目标是地波雷达信号处理中需要解决的关键问题, 这个问题的解决可以充分发挥地波雷达的全方位优势, 对于地波雷达海上目标实时探测至关重要。在高频地波雷达船只目标航迹跟踪方面, 大体方法可分为三类: 分别是基于船只运动模型的方法、不基于模型的方法和两种相结合的方法。

但是传统的地波雷达船只航迹跟踪方法都存在一些缺点, 很难用于目标连续实时跟踪, 需要发展一种新的适用于复杂干扰环境下船只航迹的稳定实时跟踪方法, 以解决目前地波雷达船只持续跟踪的难题。本文的主要工作是对目前高频地波雷达目标探测领域的研究现状和几种典型方法进行讨论分析, 并对目标探测方面的新方法和待解决的问题进行总结和展望。

## 1 高频地波雷达

高频地波雷达利用短波(3~30 MHz)在导电海洋表面绕射传播衰减小的特点, 采用垂直极化天线辐射电波, 能超视距探测海平面视线以下出现的舰船、

飞机、冰山和导弹等运动目标, 作用距离可达 300 km 以上。同时, 高频地波雷达利用海洋表面对高频电磁波的一阶散射和二阶散射机制, 可以从雷达回波中提取风场、浪场、流场等海况信息, 实现对海洋环境大范围、高精度和全天候的实时监测。

目前, 加拿大、美国、德国、俄罗斯和日本等国家都开展了高频地波雷达系统的研制。比较典型的是由雷声公司与加拿大国防部联合研制的 SWR-503 岸基高频表面波雷达。国内, 哈尔滨工业大学在大型阵列式雷达系统方面、武汉大学在便携式雷达方面、西安电子科技大学在地波雷达信号处理方面、国家海洋局第一海洋研究所在地波雷达集成应用方面相继开展了广泛的研究。

各个单位在雷达的体系结构, 软硬件系统方面积累了相当的基础, 并建设了多个实验场, 基于实验场开展了目标跟踪、海态反演等研究, 以期实现高频地波雷达的业务化目标。例如哈工大在威海搭建了高频地波雷达试验场, 并且已经投入运行, 如图 1 所示。

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2016-1-24

基金项目: 国家自然科学基金(41506114; 61132005); 海洋公益性科研专项项目(201505002)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41506114, No.61132005; National Marine Technology Program for Public Welfare, No.201505002]

作者简介: 张玲(1978-), 女, 山东临沂人, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能信息处理, E-mail: zljiao@163.com, 电话: 0532-66781562



图1 威海高频地波雷达试验场

Fig. 1 HF ground wave radar testing station in WeiHai

## 2 高频地波雷达航迹跟踪方法

在高频地波雷达船只目标航迹跟踪方面, 学界提出了一些方法, 大体可分为三类: 分别是基于船只运动模型的方法、不基于模型的方法和两种相结合的方法。

### 2.1 基于模型的方法

基于模型的船只目标航迹跟踪方法需要已知船只运动模型, 然后基于回波数据对船只运动的位置、速度等参数进行估计, 从而得到船只运动轨迹。文献[4-8]提出了基于概率假设密度的方法, 该方法存在的问题是算法只给出了目标存在的概率信息, 需要进一步结合峰值检测及航迹提取才能得出目标的航迹信息。文献[9-10]提出了基于粒子滤波的方法, 但该方法概率密度函数不容易确定, 需要大量的采样近似计算, 对于非高斯问题需要采取近似方法, 精度受损。基于模型的这类方法存在一个难点是模型需要事先假定已知, 而在实际应用中, 船只模型很难确定。因此, 就需要对船只运动做些限定, 例如匀速运动、匀加速运动、变加速运动等, 这在实际应用中很受限制。目前提出的船只运动模型都需要严格的假定条件, 而地波雷达探测的是一片海域, 存在众多船只的多种运动形式, 仅靠一个模型很难刻画, 即使基于多目标联合建模手段估计出一些船只的航迹, 还需要进一步判断才能提取出特定船只的航迹信息。

### 2.2 不基于模型的方法

不基于模型的方法常用的有最近邻、聚类<sup>[11-16]</sup>, 在检测出点迹的基础上利用最近邻等规则设定距离、速度等波门, 在波门内的点即认为是一个航迹。文献[17-19]提出的动态规划法也不基于运动模型,

对雷达回波数据形成的 R-D 谱上特定距离-多普勒单元进行幅值累加, 然后取阈值判断是否构成船只航迹。不基于模型的方法缺点是: 如果周围有多个点容易关联错误; 适合高斯白噪声环境, 而海洋观测环境中除了高斯白噪声, 还存在非高斯、非平稳噪声; 船只机动, 即速度突变情况下跟踪存在困难。为了提高跟踪性能, 最近邻法通常还要与其他方法相结合, 归结为第三类方法。

### 2.3 两者相结合的方法

单纯的基于模型和不基于模型都存在缺陷, 因此, 有文献提出结合两者的优点来对单一算法进行改进。例如, 最近邻与其他方法相结合的一类方法, 最近邻与运动模型相结合<sup>[20-22]</sup>及最近邻与联合概率数据互联相结合的方法<sup>[23]</sup>。该类方法在船只目标机动性不强且没有太多干扰船只存在的情况下有较好的跟踪效果, 否则容易出现关联错误或航迹断裂, 反映在船只目标上就是特定目标跟踪错误或丢失, 即目标的持续跟踪存在困难, 所以该类方法在复杂干扰环境下跟踪性能不稳定, 实际应用中存在很大局限。

### 2.4 三种方法的比较

将三种方法的局限性进行比较, 结果见表 1。

表 1 三种方法总结

Tab. 1 Summary of three methods

方法	局限性
基于模型法	模型需要事先假定, 而在实际应用中, 模型很难确定。
不基于模型法	非高斯、非平稳环境中性能不稳定。
两者结合法	对机动性较强的目标实现持续跟踪存在困难。

## 3 基于弧段检测的新方法研究

现有的航迹跟踪方法大多是利用回波数据直接进行研究, 不能满足地波雷达实际需求的主要原因是没有利用已经形成的航迹弧段特征对跟踪结果进行校正, 缺少一种递归策略保证随着数据量的增加跟踪性能得到提升。为此本文提出了基于弧段检测的高频地波雷达特定目标航迹跟踪方法, 用深度学习进行反馈与校正, 与现有方法有着本质的区别。这里的弧段是指之前对感兴趣船只目标跟踪过程中形成的一段航迹, 为先验信息, 特定船只即为与先验

弧段信息匹配的感兴趣船只。

### 3.1 算法的基本思想

基于弧段检测的高频地波雷达特定目标航迹跟踪方法的基本思想是：基于弧段数据训练特定船只运动模型的深度学习网络，以适应地波雷达探测环境复杂多变以及船只机动的实际情况。

此外，为了提高特定船只的跟踪准确性，采用模型预测与船只属性融合决策的方法。基于弧段检测的航迹跟踪方法已知信息是特定船只的一个航迹弧段，弧段的得来可以来源于之前跟踪的结果，或者历史上存储的特定船只的弧段信息。

基于弧段检测的航迹跟踪方法是一种新的思路，在深度挖掘弧段特征的基础上，利用弧段之间的加强学习策略不断增强跟踪效果，克服了传统方法存在航迹断裂和关联错误的问题。该方法的优化机制是随着观测数据的增多，学习效果逐渐得到校正。能够提高地波雷达尽快锁定特定船只的能力。

### 3.2 技术研究路线

为了实现航迹的持续跟踪，解决跟踪错误和航迹断裂的问题，本文将对基于弧段数据的高频地波雷达特定目标航迹跟踪方法进行探讨，其技术研究路线如图 2 所示，下面将对相关技术进行介绍。

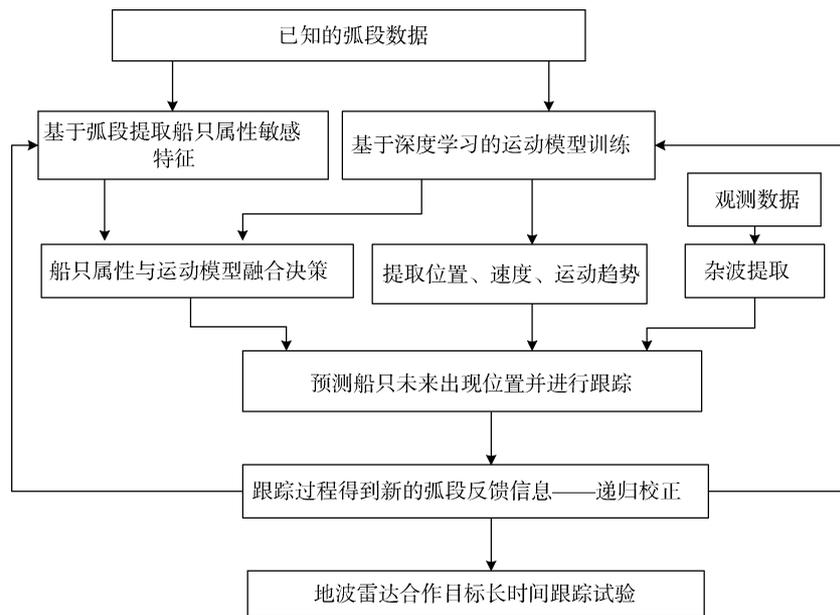


图 2 技术研究路线流程图

Fig. 2 Flowchart of the technical research

#### 3.2.1 基于弧段提取对船只属性敏感的特征

弧段特征与船只属性是关联的，不同类型的船只呈现出的航迹弧段特征不同，准确提取敏感特征是能够跟踪特定船只的前提。基于弧段数据可以提取船只的关键特征参数：(1)从数据本身的强度可以反映船只的尺寸、吨位等信息；(2)从弧段的斜率可以预测船只下一时刻的运动趋势；(3)从弧段的分形特征可以判断一类船只的运动属性，例如是大型商船、军舰还是小型船只。该特征是船只关键属性的综合反映，例如斜率、转向角和转向速度等都会体现在其中，对于一类特定船只的断续弧段其自相似特征是匹配的。弧段的分形特征可以作为船只类型的特定标识，反映船只的运动轨迹和规律，因此通过分形

特征可以对特定船只目标进行识别。

#### 3.2.2 基于深度学习的船只运动模型训练

基于高频地波雷达特定船只的初始航迹弧段的数据，通过构建具有很多隐层的深度学习模型，我们可以从弧段数据中学习更有用的深层次特征，从而训练出包含船只位置、速度、转向角、偏航角和舵角等诸多参数信息的船只实时运动模型。深度学习是一种贪婪学习机制，充分挖掘数据隐含的特征，提炼出深层次的信息。深度学习网络构建的基本流程为：(1)首先由观测数据通过初步分析获得信噪比信息，以便大致确定高频地波雷达此时的工作环境情况和观测方程中的噪声水平；(2)由观测数据训练观测方程，观测方程是状态的体现，由第一步已经

获得了噪声的大致范围，所以这一步重点是获得观测方程的模型参数；(3)训练状态方程，根据船只运动特性初步可以确定状态方程的阶数和参数个数，由深度学习算法获得参数的估计值；(4)通过多层神经网络学习之后得到含有多个参数的描述船只运动的非线性模型。基于此模型可以对船只未来运动航迹进行预测。

### 3.2.3 弧段特征与模型预测结果进行融合决策

单纯利用船只运动模型对未来的航迹进行预测会存在较大的误差，因为高频地波雷达探测大片的区域，如果在航道上船只密集，干扰船只很多，所以航迹之间会存在很大的干扰，因此，如果结合基于弧段特征得到的船只属性参数进行融合决策，得到的航迹跟踪结果会准确的多。考虑是在模型预测的基础上增加距离、速度和船只属性的多维波门，在此波门内的点才作为特定船只的未来可能出现的点迹。这样综合考虑船只的位置、速度、尺寸、运动趋势和自相似等特征对船只未来状态进行初步预测。

### 3.2.4 杂波提取

根据地波雷达回波数据分析信号与噪声成分，基于雷达系统参数可以大致确定海杂波位置，经过傅里叶变换等方法分析射频干扰的存在。杂波提取是为了确定地波雷达所处的探测环境情况，利用杂波特点结合之前的特征提取对船只未来运动状态进行综合判断。

### 3.2.5 预测船只未来出现位置并进行跟踪

由已知弧段的航迹数据通过多种方式获得了多重特征，其中有从航迹数据直接提取的舰船属性特征和基于模型预测的运动特征，需要针对不同属性的数据源进行融合。基于第 3 步得到的初步融合结果得到船只出现的大概位置，但这个位置会存在较大误差，因为还没有考虑杂波特性。结合运动模型中的位置、速度和运动趋势等参数以及杂波特性对特定船只未来的精确位置和运动状态进行融合决策。这一融合策略尤其适用于地波雷达探测区域在航线附近存在众多干扰船只的情形。当感兴趣船只在跟踪丢失了一段时间时，获取船只丢失时刻的位置、速度和运动趋势，并结合杂波特性分析判断此时船只丢失是由于船只机动、切向运动还是受海杂波、射频干扰的影响，以便尽快锁定特定船只航迹。具体的研究思路如图 3 所示。图中融合决策中心的任务就是综合船只的各种特征和杂波特点对船只未来状态进行预测。

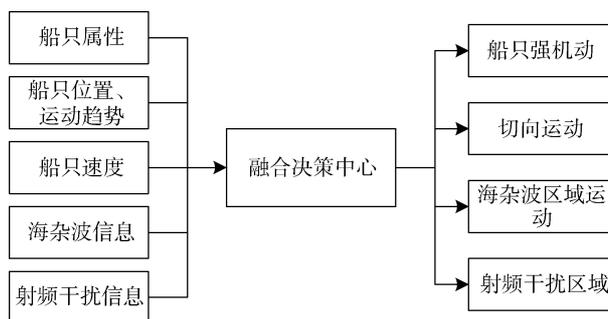


图 3 融合决策示意图

Fig. 3 Diagram of the fusion decision

## 4 总结与展望

综上所述，现有的航迹跟踪方法在特定目标航迹跟踪方面存在不稳定、精度低的缺点。虽然能解决简单观测环境下的某一类航迹跟踪问题，但真正应用于高频地波雷达实际探测时不能很好的满足要求。因此算法的稳定性，即在复杂干扰环境下持续跟踪特定船只的能力仍然是一个具有挑战性的难题。本文提出的航迹跟踪新方法为复杂环境下高频地波雷达特定船只目标的航迹跟踪提供新的理论依据和技术支撑，为提高地波雷达持续跟踪特定船只的能力提供有效的方法。

参考文献：

- [1] 王瑞富, 孔祥超, 纪永刚, 等. 基于 GIS 的高频地波雷达回波信号的表达处理与显示[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 1-2.  
WANG Ruifu, KONG Xiangchao, JI Yonggang, et al. Expression and display of echo signal of HF surface wave radar based on GIS[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 1-2.
- [2] 范陈清, 张杰, 王际朝, 等. 基于雷达水位计的海浪波高信息提取算法及其精度评价[J]. 海洋科学, 2014, 38(6): 1-4.  
FAN Chenqing, ZHANG Jie, WANG Jichao, et al. Extraction algorithm and accuracy evaluation of ocean wave height based on radar water gauge measurement[J]. Marine Sciences, 2014, 38(6): 1-4.
- [3] Chang G H, Li M, Zhang L, et al. Measurements of ocean surface currents using shipborne High-Frequency radar[C]//IEEE. Proc. IEEE Radar Conference. Cincinnati: IEEE Publisher, 2014: 1067-1070.
- [4] 林再平, 周一宇, 安玮. 改进的概率假设密度滤波多目标检测前跟踪算法[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(5): 475-480.

- LIN ZaiPing, ZHOU YiYu, AN Wei. Improved multi-target track-before-detect using probability hypothesis density filter[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(5): 475-480.
- [5] 杨峰, 王永齐, 梁彦, 等. 基于概率假设密度滤波方法的多目标跟踪技术综述[J]. *自动化学报*, 2013, 39(11): 1944-1956.  
YANG Feng, WANG YongQi, LIANG Yan, et al. A Survey of PHD Filter Based Multi-target Tracking[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1944-1956.
- [6] Mahler R. The multisensor PHD filter: I. General solution via multitarget calculus[C]//IEEE. Proc. SPIE 7366, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVIII. USA: SPIE Publisher, 2009: 73360E-73360E-12.
- [7] Tong H S, Zhang H, Meng H D, et al. Multitarget tracking before detection via probability hypothesis density filter[C]//IEEE. Proc. IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan: IEEE Publisher, 2010: 1332-1335.
- [8] Habtemariam B K, Tharmarasa R, Kirubarajan T. PHD filter based track-before-detect for MIMO radars[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(3): 667-678.
- [9] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 雷达微弱目标检测前跟踪算法综述[J]. *现代雷达*, 2013, 35(4): 45-52.  
ZHAN Lixiao, TANG Ziyue, ZHU Zhenbo. An Overview on Track-before-detect Algorithms for Radar Weak Targets[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(4): 45-52.
- [10] 陈志敏, 薄煜明, 吴盘龙, 等. 基于新型粒子群优化的粒子滤波雷达目标跟踪算法[J]. *兵工学报*, 2012, 33(1): 83-88.  
CHEN Zhimin, BO Yuming, WU Panlong, et al. A Particle Filter Radar Target Tracking Algorithm Based on Novel Particle Swarm Optimization[J]. *Information and Control*, 2012, 33(1): 83-88.
- [11] Perera L P, Oliveira P, Guedes Soares C. Maritime Traffic Monitoring Based on Vessel Detection, Tracking, State Estimation, and Trajectory Prediction[J]. *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 1188-1200.
- [12] 徐惠钢, 徐本连, 朱继红, 等. 基于蚁群聚类的多目标跟踪航迹起始方法[J]. *南京理工大学学报*, 2011, 35(6): 773-779.  
XU Huigang, XU Benlian, ZHU Jihong, et al. Track Initiation Method for Multi-target Tracking Based on Ant Colony Clustering[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 35(6): 773-779.
- [13] 鹿传国, 冯新喜, 孔云波, 等. 基于形态学和 Hough 变换的航迹起始研究[J]. *兵工学报*, 2013, 34(6): 704-710.
- LU Chuanguo, FENG Xinxi, KONG Yunbo, et al. Research on Track Initiation Based on the Hough Transform and Morphology[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(6): 704-710.
- [14] Bell K L, Baker C J, Smith G E, et al. Fully Adaptive Radar for Target Tracking Part II: Target Detection and Track Initiation[C]//IEEE. Proc. IEEE Radar Conference. Cincinnati: IEEE Publisher, 2014: 309-314.
- [15] 夏栋, 叶灵伟, 王守权, 等. 基于确定参数 Hough 变换的航迹起始[J]. *现代雷达*, 2014, 36(2): 42-46.  
XIA Dong, YE Lingwei, WANG Shouquan, et al. Track Initiation Based on Fixed Parameters' Hough Transform[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(2): 42-46.
- [16] Ponsford A M, Wang J. A review of high frequency surface wave radar for detection and tracking of ships[J]. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 2010, 18(3): 409-428.
- [17] 李涛, 吴嗣亮, 曾海彬, 等. 基于动态规划的雷达检测前跟踪新算法[J]. *电子学报*, 2008, 36(9): 1824-1828.  
LI Tao, WU Siliang, ZENG Haibin, et al. A New Radar Track-Before-Detect Algorithm Based on Dynamic Programming[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(9): 1824-1828.
- [18] Grossi E, Lops M, Venturino L. A Novel Dynamic Programming Algorithm for Track-Before-Detect in Radar Systems[J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2013, 61(10): 2608-2619.
- [19] 张鹏, 张林让. 一种用于高脉冲重复频率雷达的 TBD 检测算法[J]. *西北工业大学学报*, 2014, 32(2): 273-278.  
Zhang Peng, Zhang Linrang. A Track-Before-Detect Algorithm for High Pulse Repetition Frequency Radar[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(2): 273-278.
- [20] Roarty H J, Rivera L E, Handel E, et al. Performance evaluation of SeaSonde high-frequency radar for vessel detection[J]. *Mar Technol Soc J*, 2011, 45(3): 14-24.
- [21] Huang X J, Wen B Y, Ding F. Ship detection and tracking using multi-frequency HFSWR[J]. *IEICE Electronics Express*, 2010, 7(6): 410-415.
- [22] Maresca S, Braca P, Horstmann J, et al. Maritime surveillance using multiple high-frequency surface-wave radars[J]. *IEEE Trans on Geo and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 5056-5071.
- [23] Bar-Shalom Y, Daum F, Huang J. The probabilistic data association filter[J]. *IEEE Control Syst Mag*, 2009, 29(6): 82-100.

# Research on a specific target tracking method based on arc detection with HF surface wave radar

ZHANG Ling<sup>1</sup>, LIU Xu<sup>1</sup>, JIANG Yi<sup>1</sup>, JI Yong-gang<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Key Laboratory of Marine Mechanical and Electrical Equipment & Instruments of Shandong Provincial Universities, Qingdao 266100, China; 2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

**Received:** Oct. 10, 2015

**Key words:** HF surface wave radar; target tracking; target detection; ship trajectory; arc detection

**Abstract:** In this paper, the typical target tracking methods of high-frequency surface wave radar (HFSWR) are briefly summarized. Subsequently, a method of continuously tracking vessel targets using HFSWR is presented. The basis of this new method is to take full advantage of existing trajectory characteristics, establish a ship motion model based on characteristics and echo data, and make a fusion decision combined with clutter characteristics. Furthermore, in order to satisfy the need of continuous tracking over a long time, the idea of deep learning is applied and the estimation results are recursively corrected with new arc segment data. Therefore, the tracking is more accurate with more obtained data. This method realizes the real-time stable tracking of a maneuvering target trajectory in a cluttered environment even in a channel with a lot of ship interference. The method contributes to the theoretical basis and guidance of tracking specific targets with HFSWR continuously and stably and in complex environments with serious clutter/interference. Moreover, the method offers technical support to enable HFSWR play a significant role in maritime surveillance.

(本文编辑: 李晓燕)