

# 高频地波雷达海杂波背景下的船只目标检测研究进展

王祎鸣<sup>1,2</sup>, 张 杰<sup>1</sup>, 纪永刚<sup>1</sup>, 毛兴鹏<sup>2</sup>

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对高频地波雷达目标检测的海杂波干扰问题, 分为目标处于海杂波谱区之内和之外两种情况综述了海杂波背景下的目标检测方法。对于海杂波谱区内目标检测的难题, 介绍了一种基于现场海态同步观测信息的检测新思路以及初步验证结果。对国内外相关研究进展的归纳总结和新思路的提出, 为深入研究相关方法, 解决海杂波干扰下的目标检测问题提供了重要的参考。

**关键词:** 高频地波雷达; 海杂波; 海态; 目标检测

中图分类号: TN958.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)09-0140-05

doi: 10.11759/hyxx20151216002

高频地波雷达<sup>[1]</sup>(简称: 地波雷达)作为一种新型的海洋探测雷达, 辐射的高频电磁波沿着海面传播不受地球曲率的影响, 实现对海面的超视距监测。地波雷达主要有两大应用方向, 一是海上目标探测, 能够获取海上船只和低空飞机等目标的距离、速度、方位等信息; 二是海洋动力参数监测, 能够探测表面流、浪、风等海洋动力参数。相较于传统的现场布放式测量仪器, 地波雷达具有监测范围大的优势; 相较于星载可见、红外等遥感仪器, 地波雷达具有可全天候、连续观测的优势。

在地波雷达目标探测应用中, 海面回波常叠加在目标信号上, 形成影响目标探测的杂波, 因而将其称为“海杂波”。由雷达发射的高频电磁波与海浪谐振产生的强一阶回波构成了海杂波的主要成分, 尤其是在雷达孔径受限及海表面流的作用下, 该海杂波尖峰在频谱中被进一步展宽, 构成了对船只目标探测的主要干扰。当船只的径向速度落入海杂波谱区域时, 对应的船只运动速度称为“盲速”, 相应的海杂波谱区域称为检测盲区<sup>[2-4]</sup>, 这给海面移动目标监视监测带来了更大的挑战。

本文将探讨地波雷达海杂波(特指一阶海杂波)对目标检测的干扰问题, 综述实现在其背景下的目标检测方法。特别地, 针对地波雷达海杂波谱区域内目标检测难题, 介绍了一种基于现场海态同步观测信息的检测思路和最新的研究进展。

## 1 海杂波背景下的目标检测方法

### 1.1 检测背景描述

作为传播媒介的海洋中始终存在与雷达波长尺

度相近的海浪, 产生高频电磁波谐振散射, 因此雷达探测期间海杂波随时存在。另一方面, 船只目标的运动状态决定了其在雷达回波谱中, 会存在与展宽的海杂波多普勒谱区重合和非重合两种情况, 因此需要分别讨论。

图 1 为实测的 4.7 MHz 地波雷达回波多普勒谱, 目标位置以 A、B、C、D 表示, 一阶海杂波谱区(即正负一阶海杂波谱)用点划线和双箭头标出。目标 A、B、C 位于海杂波谱区域外, 在设置目标检测阈值时, 海杂波易抬高基底, 导致对邻近弱目标的漏警。目标 D 由于其径向速度引起的多普勒频移落入海杂波谱中, 所以其回波与一阶海杂波谱重合, 阈值和目视解译均难以实现检测。

### 1.2 海杂波谱外目标检测方法

目标在雷达回波谱中与海杂波不重合, 但与海杂波谱邻近, 海杂波对目标探测的影响主要是抬高了检测背景的基底, 易导致虚警和弱小目标的漏警。目前, 大部分研究通过先抑制海杂波再检测目标的思路。

国内外开展了大量的地波雷达海杂波抑制研究,

收稿日期: 2015-12-16; 修回日期: 2016-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(61501131, 61171180); 国家海洋公益性科研专项项目(201505002)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 61501131, No. 61171180; Marine scientific research special funds for public welfare, No. 201505002]

作者简介: 王祎鸣(1981-), 男, 山东烟台人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事超视距雷达目标探测研究, E-mail: 467744980@qq.com; 毛兴鹏, 通信作者, 教授, 主要从事超视距雷达抗干扰技术研究, E-mail: mxp@hit.edu.cn

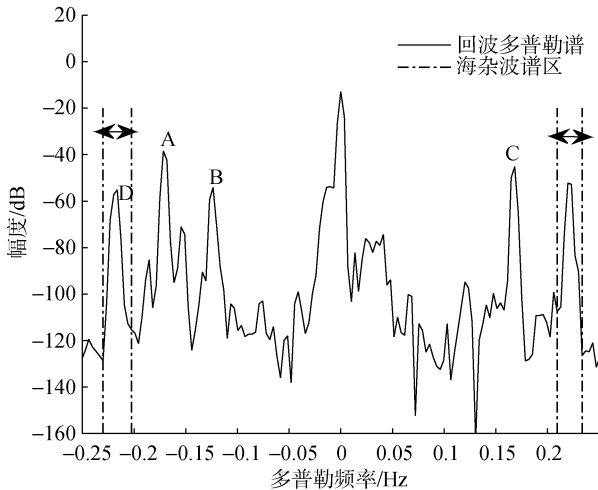


图1 地波雷达回波多普勒谱

Fig. 1 Received Doppler spectrum of the high frequency surface wave radar

主要有子空间分解类<sup>[5-11]</sup>、模型预测<sup>[12-15]</sup>、对消类<sup>[16-21]</sup>、多尺度分解类<sup>[22-25]</sup>等方法。子空间分解类方法将回波投影到海杂波子空间的空集抑制海杂波,但在海杂波与目标多普勒频率接近时,难以实现区分,而且两者的奇异值也存在不确定性,因此主要适合于海杂波大奇异值或者频率范围明确的情况。另外,目前空间分解多利用将雷达信号正交投影到海杂波子空间空集的方式,如海杂波与目标空间非完全正交,则效果下降,将来需要考虑非正交的投影方法。另外,构造数据矩阵的维数选择决定了子空间分解的抑制效果,还需开展相关参数优化的研究。模型预测的方法分为线性和非线性建模两类,通过建立的海杂波模型实现海杂波的预测和对消,对模型的准确性要求较高。线性建模难以准确刻画海杂波在多数情况下的复杂性,而基于混沌理论或神经网络的非线性预测方法,尚存在模型参数的自适应选择问题(嵌入维数,训练样本数等)。对消类分为时域和谱图对消,时域对消通过正弦信号幅度、相位及频率的估计,循环迭代抵消海杂波分量,需解决的是短时间内信号参数的高精度估计问题。谱图对消则要求海杂波幅度分布具有沿谱图多普勒和距离项相似或者缓变的特点。多尺度分解类有基于信号分解的时频方法(S方法、小波变换等)和图像形态学元素分析的方法,通过变化尺度(多普勒、频率、时间、距离和重复率)分离目标和海杂波,实现目标检测的目的。但要求雷达回波经变换分解后,能够体现出目标和海杂波的显著差异,因此结合两者的特性差异选择变换的种类和尺度,将是提高该类方

法性能的有效途径。

采用上述海杂波抑制方法后,进行恒虚警 CFAR (Constant False Alarm Rate) 阈值处理得到目标检测门限,实现去除海杂波影响后的检测。但上述方法主要适用于海杂波谱区外的目标检测,并不能解决处于海杂波内的目标检测问题。

### 1.3 海杂波谱内目标检测方法

由于目标处于海杂波谱内,目标与海杂波的频率、距离甚至幅度相一致,依靠时域、频域或空域等单一域的信号差异难以有效发现和鉴别目标。

针对海杂波内的目标检测问题,文献[26]利用海杂波正负一阶峰的包络相关性,通过最小均方自适应对消检测可能落入一阶海杂波的目标。文献[27]利用海杂波功率在相邻距离多普勒单元沿方位向的相关性,通过待检测单元与相间隔单元的相关值与检测阈值的比较检测目标。但在海流切变的情况下,利用邻近单元格的回波数据作为参考效果不佳,可能会引起目标漏检或虚警的情况。

不同于利用海杂波的相关性实现目标检测的方法,文献[28]利用船只目标和海杂波的空域回波差异,通过设置密集的空域滤波凹陷,实现波束内海杂波频谱含量的抑制,发现落入海杂波中的目标。

可以看出,面对海杂波内的目标检测问题时,目前有上述两类具有代表性的思路,但有效的方法不多,仍然是待解决的难题。

## 2 海杂波谱内目标检测的新思路

造成海杂波谱内目标检测困难的原因可归结为在两者回波谱相重合的情况下,难以得到任何单一回波的真实形态,缺少必要的参考信息。

本质上,海杂波是由雷达电磁波与海面相互作用产生的回波。现场海态观测手段如浮标、海流计、风速风向仪等能够提供观测区域内的风、浪、流等海态信息。如果在关注的海域内,同步获取这些海态信息,并利用这些信息构造海杂波<sup>[29]</sup>,获得海杂波的相关特征,这必将有利于海杂波内的目标检测。研究表明,地波雷达探测区域内与海杂波具有近似多普勒频率的目标会对海杂波谱产生影响。而如果将这种影响合理地利用,则可以作为海杂波中船只目标检测的依据。因而,发展基于现场海态信息的海杂波内目标检测方法,成为一种地波雷达海杂波内目标检测研究的新思路。研究路线如图2所示。

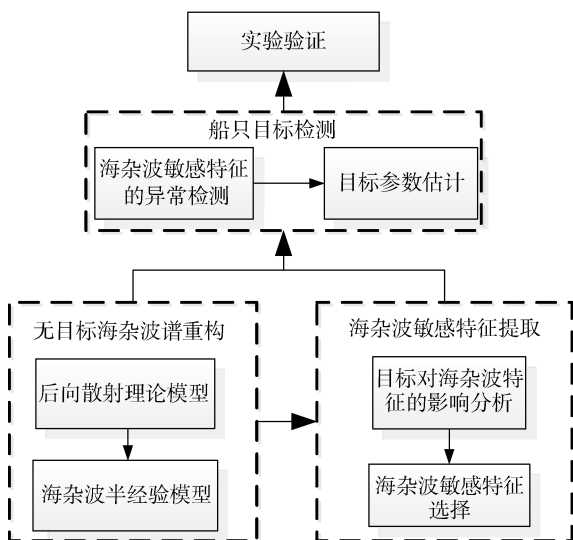


图 2 研究路线图

Fig. 2 Research roadmap

采用同步数据进行初步验证, 实验数据于 2014 年 4 月在渤海海域开展的海上合作船只目标多手段同步探测期间获取, 现场观测的海流、风场信息分别由海上测量船“意兴号”搭载安德拉海流计和风速风向仪定点测量, 海浪谱则由该船布放波浪浮标获取。测量点的海流流速是 0.1 m/s, 流向为北偏东 20°; 风速是 6.30 m/s, 风向为 235°; 通过海浪谱求得的海浪浪高为 0.71 m。现场测量手段准确度较高, 风速误差在±0.8 m/s, 海流流速误差在±0.03 m/s 均低于地波雷达对这些参数的反演误差, 所以以此为模型输入构造的回波谱能够反映海面的实际情况。由图 3 可见, 重构的无目标回波与实测不含目标的海杂波几乎重合(见右侧尖峰), 而与实测含目标海杂波差别较大(见左侧尖峰), 重构的无目标回波谱<sup>[30]</sup>能够作为较好的参考。地波雷达同步探测数据由 8 阵元接收, 相干积累时间 291 s, 经解调和相干积累后, 多普勒分辨率 0.003 4 Hz。提取海杂波一阶谱的频率范围特征, 作为异常检测的敏感特征。图 3 给出了一艘货船(通过 AIS 广播船舶自身识别信息)进入海杂波谱区情况下的雷达实测回波谱与基于现场海态数据重构的无目标回波谱。该船径向航速为-24.7 km/h, 在雷达谱中多普勒频率为-0.215 5 Hz。从图中可以看出在海杂波谱区的目标回波导致雷达左一阶海杂波较重构的无目标海杂波展宽 0.006 8 Hz。该展宽量超过了检测门限, 表示敏感特征存在异常, 据此检测到目标的存在。由目标在雷达回波多普勒谱中的位置得到的目标速度较实测值误差为 0.09 km/h, 实

现了较高准确度的速度估计。

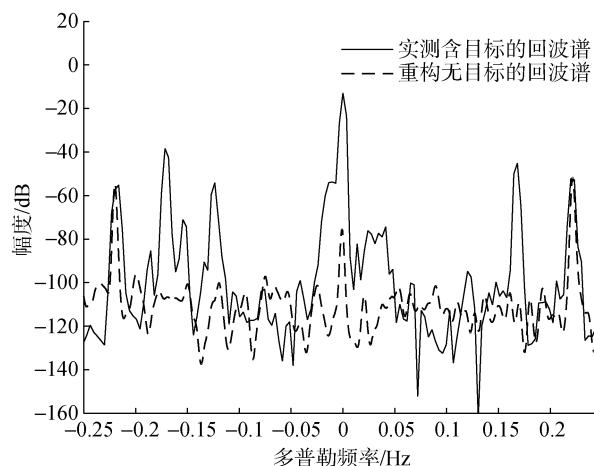


图 3 含目标的回波谱及重构无目标的回波谱

Fig. 3 Doppler spectrum with target and reconstructed spectrum without target

### 3 总结与展望

综合分析, 在地波雷达海杂波背景下的船只目标检测研究中, 传统上采取先抑制海杂波再恒虚警阈值检测的思路。为进一步降低虚警, 提高目标检测能力, 国内外发展了一系列的海杂波抑制算法。但是, 从有关的研究进展来看, 目前海杂波谱内的目标尚未有有效的检测方法, 仍是一个具有挑战性的难题。

将现场海态同步观测用于地波雷达海杂波谱内的目标检测, 对造成海杂波的现场海面状况有了必要的了解和知识, 相当于丰富了目标检测的信息量, 将能够提高对目标的检测能力。发展基于现场海态同步观测的目标检测方法, 成为解决地波雷达海杂波内目标检测难题的新思路。将来还可针对诸如模型重构、谱特征(谱能量、峰值比、频移等)挖掘等问题开展深入研究。

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): 86-92.  
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): 86-92.
- [2] Leong H, Ponsford A. The effects of sea clutter on the performance of HF surface wave radar in ship detection[C]//IEEE. 2008 IEEE Radar Conference. Rome:

- IEEE, 2008: 1-6.
- [3] Gurgel K W, Schlick T. HF radar wave measurements in the presence of ship echoes-problems and solutions[C]//IEEE. Europe Oceans 2005 (Volume: 2). Brest: IEEE, 2005, 2: 937-941.
- [4] 凡俊梅, 焦培南, 肖景明. 海洋杂波对高频雷达检测海面上低速目标的影响[J]. 电波科学学报, 1997, 12(2): 205-210.  
Fan Junmei, Jiao Peinan, Xiao Jingming. The sea clutter effect on the low Doppler target detection by HF radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1997, 12(2): 205-210.
- [5] Ponsford T, Reza D. System and method for spectral generation in radar[P]. US Patent: 6822606, 2004.
- [6] Zhao Zhiguo, Chen Jianwen, Bao Zheng. A method to estimate subspace via Doppler for ocean clutter suppression in skywave radars[C]// IEEE. Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar (Volume: 1). Chengdu: IEEE, 2011, 1: 145-148.
- [7] Martin W Y, Rafaat H, and Le-Ngoc S. A Singular Value Decomposition (SVD) Based Method for Suppressing Ocean Clutter in High Frequency Radar[J]. IEEE Trans S P, 1993, 41(3): 1421-1422.
- [8] 鲁晓倩, 孙荣. 修正 Hankel 矩阵 SVD 用于多模环境杂波对消研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(3): 26-29.  
Lu Xiaoqian, Sun Rong. A study on clutter cancellation method based on modified hankel matrix singular value decomposition[J]. Modern Radar, 2012, 34(3): 26-29.
- [9] 赵志国, 陈建文, 鲍拯, 等. OTHR 海杂波抑制典型方法综合性能评估[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(6): 1270-1274.  
Zhao Zhiguo, Chen Jianwen, Bao Zheng, et al. Performance evaluation of ocean clutter suppression approaches in OTHR[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(6): 1270-1274.
- [10] 陈俊斌, 卢琨, 刘兴钊. 天波雷达短驻留时间下海杂波抑制的改进算法[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38: 95-97.  
Chen Junbin, Lu Kun, Liu Xingzhao. An improved ocean clutter cancellation algorithm with short dwells in sky-wave radars[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38: 95-97.
- [11] 赵志国, 陈建文, 鲍拯. 一种改进的 OTHR 自适应海杂波抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 909-914.  
Zhao Zhiguo, Chen Jianwen, Bao Zheng. Modified adaptive ocean clutter suppression approach in OTHR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 909-914.
- [12] Khan R H. Ocean-clutter model for high-frequency radar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(2): 181-188.
- [13] Zhou Gongjian, Jin Yonggao, Dong Huachun, et al. HF radar sea clutter rejection by nonlinear projections[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2005, 16(4): 733-737.
- [14] Wang Quande, Wen Biyang. Active learning artificial neural networks ensemble for HF ground wave radar sea clutter predicting[C]//IEEE. International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, 2009. Wuhan: IEEE, 2009: 1-4.
- [15] 王泉德, 文必洋. 高频地波雷达海杂波神经网络选择集成预测[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 31(12): 2801-2805.  
Wang Quande, Wen Biyang. High frequency ground wave radar sea clutter predicting based on artificial neural network selection and ensembling[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 31(12): 2801-2805.
- [16] 陈多芳, 陈伯孝, 秦国栋. 岸 - 舰双基地波超视距雷达图像域海杂波抑制方法[J]. 电子学报, 2010, 38(2): 387-392.  
Chen Duofang, Chen Baixiao, Qin Guodong. Sea clutter suppression in image domain for coast-ship bistatic SWOTHR[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2): 387-392.
- [17] Root B T. HF radar ship detection through clutter cancellation[C]// IEEE. Proceedings of the 1998 IEEE Radar Conference. Dallas: IEEE, 1998: 281-286.
- [18] 杨炼, 孙合敏, 潘新龙. 基于扩展 Prony 算法的海杂波循环对消法[J]. 现代雷达, 2011, 33(6): 53-57.  
Yang Lian, Sun Hemin, Pan Xinlong. Ocean clutter iteration cancellation based on extended prony algorithm[J]. Modern Radar, 2011, 33(6): 53-57.
- [19] 仇永斌, 张宁, 张树春. 双基地高频地波雷达海杂波抑制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(1): 71-77.  
Qiu Yongbin, Zhang Ning, Zhang Shuchun. Ocean clutter suppression for a bistatic HF ground wave radar[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(1): 71-77.
- [20] 钱文振, 纪永刚, 王祎鸣, 等. 一种改进的地波雷达邻近距离单元格一阶海杂波对消方法[J]. 海洋科学进展, 2013(1): 138-144.  
Qian Wenzhen, Ji Yonggang, Wang Yiming, et al. An improved first order sea clutter cancellation method of adjacent range cell for HF SWR [J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 138-144.
- [21] 王祎鸣, 毛兴鹏, 张杰, 等. 高频地波雷达海杂波的边界约束循环对消[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(2): 278-284.  
Wang Yiming, Mao Xingpeng, Zhang Jie, et al. Boundary-constrained sea clutter circulation cancellation by high-frequency surface wave radar[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(2): 278-284.

- [22] Jangal F, Saillant S, Helier M. Wavelet contribution to remote sensing of the sea and target detection for a high-frequency surface wave radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(3): 552-556.
- [23] Grosdidier S, Baussard A. Ship detection based on morphological component analysis of high-frequency surface wave radar images[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6(9): 813-821.
- [24] Wei Yinsheng, Tan Shanshan. Signal decomposition of HF radar maneuvering targets by using S2-method with clutter rejection[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(2): 167-172.
- [25] Li Yang, Ji Zhenyuan, Xie Junhao, et al. Detection of HF first-order sea clutter and its splitting peaks with image feature: results in strong current shear environment[C]//Springer Berlin Heidelberg. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (Volume: 7517). Brno: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 503-514.
- [26] 雷志勇, 文必洋, 程丰. 基于自适应对消法检测一阶 Bragg 峰内目标的研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(3): 365-366.
- Lei Zhiyong, Wen Biyang, Cheng Feng. Target detection in first order Bragg peaks with adaptive cancellation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(3): 365-366.
- [27] Gupta A, Fickenscher T. Improved correlation detector for HF Surface Wave Radar[C]//IEEE. 2011 IEEE Radar Con (RADAR). Kansas: IEEE, 2011: 212-216.
- [28] Wang Yiming, Mao Xingpeng, Zhang Jie, et al. Ship target detection in sea clutter of HFSWR based on spatial blind filtering [C]//IET. 2015 IET Radar Con. Hangzhou: IET, 2015: 1668-1672.
- [29] 王祎鸣, 张杰, 纪永刚, 等. 利用现场海态观测信息的地波雷达一阶海杂波内的目标检测方法. 海洋科学进展[J]. 2015, 33(2): 239-245.
- Wang Yiming, Zhang Jie, Ji Yonggang, et al. Ship detection in first order sea clutter of HFSWR using sea state measuring data[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(2): 239-245.
- [30] Grosdidiers, Gaussard A, Khenchaf A. HFSW radar model: Simulation and measurement[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(9): 3539-3549.

## Progress in research on HFSWR target detection under a background of sea clutter

WANG Yi-ming<sup>1, 2</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, JI Yong-gang<sup>1</sup>, MAO Xing-peng<sup>2</sup>

(1. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Received:** Dec. 16, 2015

**Key words:** high frequency surface wave radar; sea clutter; sea state; target detection

**Abstract:** In view of the sea clutter interference problem of target detection in high-frequency ground wave radar, ship targets that fell inside and outside of the sea clutter spectrum were reviewed. To solve the detection problem of a target falling inside the sea clutter, a novel detection idea based on sea state synchronous observation information was introduced and preliminarily verified. The related research progress at home and abroad was summarized and a new idea was suggested, which provided an important reference for developing a more effective ship detection method under the interference of sea clutter.

(本文编辑: 李晓燕)