

利用现场海态观测信息的地波雷达 一阶海杂波内目标检测方法^{*}

王祎鸣, 张 杰, 纪永刚, 楚晓亮, 常广弘

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:为解决地波雷达一阶海杂波内船只目标检测的难题,提出了一种利用风浪流等现场海态观测信息检测海杂波内目标的方法。该方法通过对比实测雷达回波谱和基于现场海态观测信息重构的无目标回波谱,发现实测雷达回波谱中一阶谱频率范围和左右峰值比等特征的异常变化,实现船只目标的检测。将该方法应用于实测地波雷达数据,并利用同步的船舶自动识别系统信息(AIS)对检测结果进行了验证,结果表明本文方法是一种有效的一阶海杂波内目标的检测方法。

关键词:地波雷达;一阶海杂波;目标检测;海态观测信息

中图分类号:TN958.93

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2015)02-0239-07

地波雷达^[1]是一种新型的海洋探测雷达,发射的电磁波沿着海面传播,因此不受地球曲率的影响,能够实现海上移动目标的超视距探测。其具有全天候、实时、大面积监测的优点,是实现船只监视监测的有效手段。地波雷达回波会受到多种杂波和噪声的影响,尤其是海杂波的一阶成份(称为一阶海杂波)幅度很强,对混叠在其中的船只目标探测干扰严重,甚至造成检测盲区^[2]。

在船只运动引起的多普勒频移与展宽的一阶海杂波谱相互重叠时,目标信号回波幅度往往低于一阶海杂波分量,使得目标被完全掩盖在海杂波中。此时,两者已经不能在频谱中区分,基于幅度阈值的检测方法也已失效,目标难以被发现。目前,消除海杂波对目标检测影响的方法主要有子空间分解^[3-5]、循环对消等^[6-7]。这些方法有利于提高一阶海杂波谱之外的目标的检测效果,但在目标信号与一阶海杂波重叠时,往往在抑制海杂波的同时也会将其中的目标信号一起去除,难以实现目标的正确检测。通过改变雷达的工作频率使海杂波在距离多普勒谱中的位置变化,可以使其与船只目标回波不再重合。但工作频率的变化又会造成目标散射特征的变化,也不是一种理想的解决方案。

我们在研究中发现,地波雷达探测区域内与一阶海杂波具有近似多普勒频率的目标会对一阶海杂波谱产生影响。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。利用浮标、海流计等现场观测手段获得该区域内的海态信息,可以重构无目标的雷达回波谱,通过与实测雷达回波谱的比较分析,有助于提高对实测海杂波谱中是否包含目标的识别能力。据此,本文提出了一种地波雷达一阶海杂波内的目标检测方法。首先,利用探测区域内的浮标、石油平台等提供的同步海流、风场和浪场等海态观测数据,准确地获取相应区域内的海态信息;然后,以现场海态观测信息为基础导出无目标的参考海杂波;最后,将其与实际测量得到的海杂波进行特征比较,基于特征异常实现船只目标的检测。

^{*} 收稿日期:2015-02-09

资助项目:国家海洋局海洋公益性行业科研专项——海上船只目标星-机-岛立体监视监测技术系统(201505002);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——基于现场观测的高频雷达海杂波分析与抑制研究(2013T04)

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方面研究。E-mail: 467744980@qq.com

(王 燕 编辑)

1 方法原理及处理流程

1.1 方法原理

地波雷达的海面回波频谱可以由单位面积内的雷达散射截面积 $\sigma(\omega)$ 来描述,其中 ω 为多普勒角频率。在深水中且忽略海水表面流的情况下,由 Barrick 推导的高频雷达一阶散射截面积方程^[8]为:

$$\sigma(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2m' \mathbf{k}_0) \delta(\omega - m'\omega_B) \quad (1)$$

式中, k_0 为发射电波波数; $\mathbf{k}_0$ 是指向散射元的电波波矢; ω_B 为 Bragg 角频率; m' 为多普勒频率的符号,正负分别代表海浪波列行进方向为朝向雷达或背离雷达; $S(\mathbf{k})$ 为波矢为 $\mathbf{k}$ 的海浪波列的海浪方向谱。通常 $S(\mathbf{k}) = S(k)G(\theta_w)$, 其中 $S(k)$ 为无向海浪谱, $G(\theta_w)$ 为方向函数,可表示为

$$G(\theta_w) = 4 \cos^s(\theta_w/2)/3\pi \quad (2)$$

式中, θ_w 为雷达波束方向与风向的夹角,可由正负一阶峰的比值进行反演; s 为方向分布系数,典型值为 4^[8]。

由式(1)可以看出,由于 δ 函数的限制作用,只有波长等于雷达发射电磁波波长的一半且传播方向恰好为朝向和背离雷达的两列海浪才会产生强烈的后向散射,从而在回波谱的 $\omega = \omega_B$ 和 $\omega = -\omega_B$ 的位置上形成两个一阶峰,且其幅度与海况有关。

海表面流的存在会引起正负一阶峰整体偏移其理论位置($\pm\omega_B$),且雷达回波谱中一阶峰的实际位置与理论位置之间的频差与海流径向流速之间满足如下关系

$$v_c = \omega_c \lambda / 4\pi \quad (3)$$

式中, λ 为电磁波波长; ω_c 为一阶峰位置与理论位置之间的角频率偏差。当考虑海流对一阶峰引起的频偏时,公式(1)中的 δ 函数可以表示为 $\delta(\omega - m'\omega_B - \omega_c)$ 。

通过上述原理分析可知,根据现场观测的海流、海浪和风场等海态信息,能够重构无目标时的雷达回波谱。图 1a 和图 1b 给出了径向流速为 0.4 m/s,风速为 10 m/s 且风向与雷达径向之间的夹角分别为 60° 和 120° 的两种情况下产生的雷达回波谱仿真结果。从图中可以看出,由于海流的存在,一阶峰已经偏离了理论位置(图中竖直虚线所示,图 2 同);而且随着风向的变化,正负一阶峰的相对幅度产生了较大的变化,峰值比由 -20 dB 变为 20 dB,变化幅度达 40 dB。

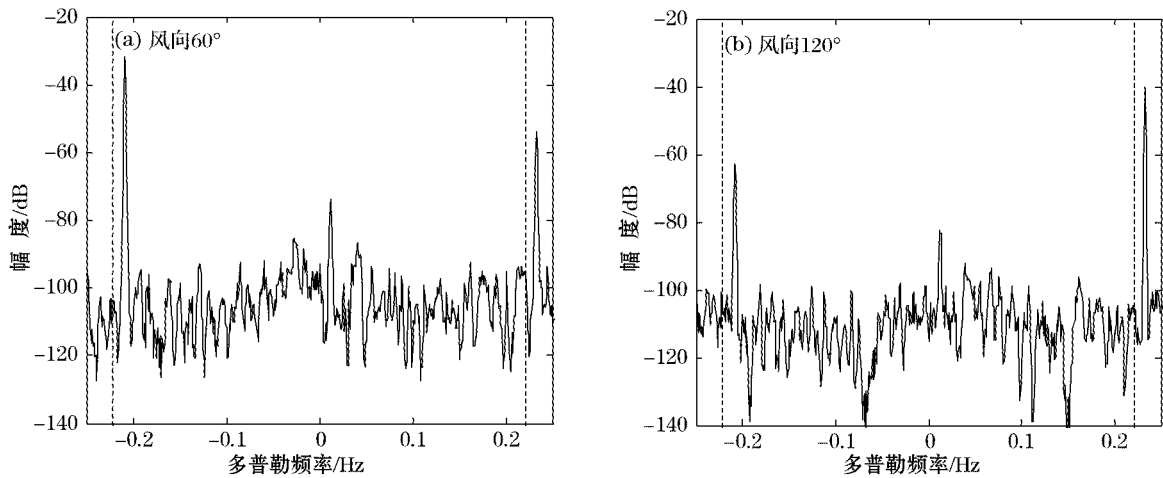


图 1 风向为 60° 和 120° 的仿真雷达回波谱

Fig. 1 Simulated radar spectra of 60° and 120° wind directions

当目标进入一阶海杂波谱范围内时,会引起一阶谱的变化。为分析目标对一阶谱的影响,仿真了目标开

始进入一阶谱区和目标完全进入一阶谱区时的回波谱。图 2a 中,粗虚线为无目标时的一阶谱仿真结果,实线为添加仿真目标后的一阶谱仿真结果。在此情况下,目标进入一阶谱区,但未与一阶峰完全重合,引起一阶峰的展宽,从而影响一阶峰值位置的判断,导致一阶峰频偏和谐宽的异常。图 2b 目标完全进入一阶谱区,此种情况下,目标会增大一阶峰位置处的幅值,导致正负一阶峰之间的幅度差异常。

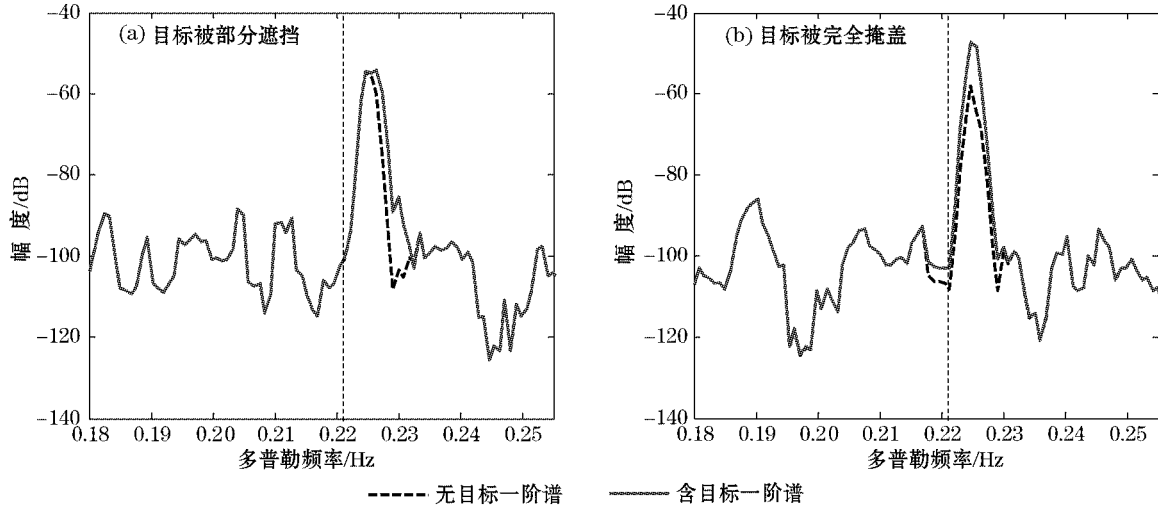


图 2 两种目标位于一阶谱区的仿真结果

Fig. 2 Simulated results of target in the first order spectrum under two scenarios

通过以上的仿真分析可以看出,当目标多普勒落入海杂波一阶谱区域内时,会导致雷达回波谱产生异常变化,主要表现在影响一阶谱频率范围、左右一阶谱峰值比等特征。因此,可以利用这种异常变化来判断一阶海杂波谱是否受到了目标的影响。

1.2 处理流程

基于以上方法原理的分析,可以给出一阶海杂波内船只目标检测的方法,该方法共包含 4 步:无目标回波谱重构、一阶谱特征参数提取、特征异常检测和目标参数估计,具体处理流程见图 3。

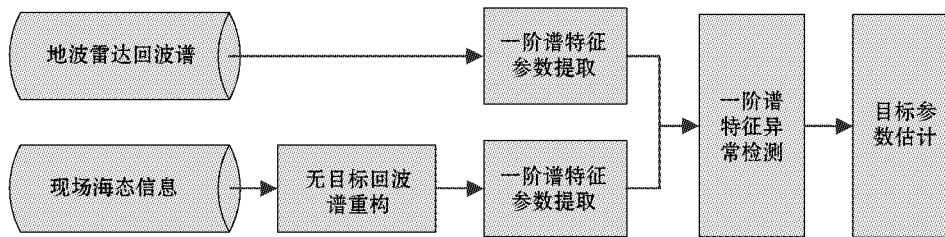


图 3 方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed method

1.2.1 无目标回波谱重构

根据实测的海流、海浪和风场等现场海态信息构造无目标时的雷达回波谱。首先根据实测海流确定其引起的一阶谱谱峰的频偏,得到一阶谱谱峰的实际位置及频率分布范围;然后根据实测风向与雷达波束方向获得方向分布函数;最后由实测的无向海浪谱及方向分布函数得到方向海浪谱,并根据一阶海杂波谱方程生成无目标情况下的雷达回波频谱。相关方法可参考文必洋等^[9]和 Grosdidiers 等^[10]的模拟与仿真部分的工作。

1.2.2 一阶谱特征参数提取

对实测回波谱数据和重构的雷达回波两种数据都要进行一阶谱特征提取,分别得到相应的参数。需要提取的一阶谱的特征参数包括正负一阶谱范围和正负一阶峰比值。其中正负一阶谱范围可用其边界上、下

限 f_L 和 f_R 表示,正一阶谱范围为 $[f_L^+, f_R^+]$,负一阶谱范围为 $[f_L^-, f_R^-]$ 。利用两个一阶谱峰的瞬时频率 f_{IF}^+, f_{IF}^- 对应的回波幅度 P_{IF}^+, P_{IF}^- 参数表示的正负一阶峰比值为

$$R = \frac{P_{IF}^+}{P_{IF}^-} \quad (4)$$

式中,正负一阶谱范围可根据基于信噪比的一阶谱区分离方法^[11]提取;瞬时频率及幅度等参数可利用 IF 方法实现^[12-13]。

1.2.3 一阶谱特征异常检测

基于实测回波谱数据和重构的雷达回波提取的一阶回波谱特征,分别对不同特征的异常检测做判别,综合多种特征的异常检测通过“或”运算给出最终的检测结果,判别一阶谱中是否存在目标。

$$A = A_f \parallel A_R \quad (5)$$

式中, A 为总体的异常检测结果; A_f 表示一阶谱频率范围异常检测结果; A_R 表示左右一阶谱峰值比异常检测结果。无异常,检测结果输出值为‘0’;有异常,输出值为‘1’。

考虑到重构误差以及实测回波谱中噪声等因素的影响,重构的回波谱不可能与实测回波谱完全相同,因此提取的一阶谱范围也不完全相同。对于一阶谱频率范围异常检测结果 A_f 的判别,可以参考实测一阶谱宽度与重构波形一阶谱宽度的差值,如果这个差值超过了设定的门限,则可判定出现一阶谱频率范围的异常。具体公式如下:

$$A_f = \begin{cases} 1, & |\Delta f^- - \Delta f^+| \geq \Delta f_T \\ 0, & |\Delta f^- - \Delta f^+| < \Delta f_T \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta f^- = (f_{R1}^- - f_{L1}^-) - (f_{R2}^- - f_{L2}^-) \quad (7)$$

$$\Delta f^+ = (f_{R1}^+ - f_{L1}^+) - (f_{R2}^+ - f_{L2}^+) \quad (8)$$

式中, f_{L1}^-, f_{R1}^- 表示实测数据负一阶峰的左右边界; f_{L1}^+, f_{R1}^+ 表示实测数据正一阶峰的左右边界; f_{L2}^-, f_{R2}^- 表示重构回波谱负一阶峰的左右边界; f_{L2}^+, f_{R2}^+ 表示重构回波谱正一阶峰的左右边界; $\Delta f^+, \Delta f^-$ 分别为实测和重构波形间正负一阶峰的宽度差。一阶谱频率范围的门限 Δf_T 参考雷达多普勒分辨率 Δf 和海流探测精度对应的多普勒偏移量 Δf_C ,即:

$$\Delta f_T = \Delta f + \Delta f_C \quad (9)$$

对于左右一阶峰值比 A_R 异常的判别,可根据公式(4)计算实测数据峰值比 R_1 和重构波形峰值比 R_2 的差与左右一阶峰值比门限确定,即:

$$A_R = \begin{cases} 1, & |R_1 - R_2| \geq \Delta R_T \\ 0, & |R_1 - R_2| < \Delta R_T \end{cases} \quad (10)$$

式中,门限 ΔR_T 可参考地波雷达风向探测精度确定,通常地波雷达探测精度优于 30° ^[14],对应的一阶峰值比误差约为 15 dB。当两个回波左右一阶峰值比差异超过了实际风向探测误差的正常范围时,表示存在异常。

1.2.4 目标参数估计

当检测到目标存在时需要对目标的参数,包括距离、速度和方位等进行估计。由于异常检测前已经获取多普勒谱的距离,因此如果确定此一阶谱存在异常,则表示当前的距离单元格内存在目标。目标的速度 V 可根据公式(11)来确定:

$$V = \frac{f_A \times \lambda}{2} \quad (11)$$

式中, f_A 为异常的多普勒频率位置; λ 为雷达波长。

目标的方位信息可利用在异常的多普勒频率位置,选择相对应的多通道雷达接收数据采用 DBF 测向或 MUSIC 超分辨率方法确定^[15]。

2 实测数据验证

地波雷达数据于 2014-04-14 在威海录取。地波雷达接收阵阵元数为 8,阵元间距 14.5 m,工作频率为 4.7 MHz,相干积累时间 291 s,频率分辨率 0.003 4 Hz,距离分辨率经插值后为 1.5 km。

现场观测的海流、风场和海浪信息分别由安德拉海流计、风速风向仪和波浪浮标提供。其中测量点的海流流速是 0.1 m/s , 流向为北偏东 20° (与雷达波束的径向夹角为 70°); 风速是 6.30 m/s , 风向为 235° (与雷达波束的径向夹角为 77°); 在模型重构过程中也使用了海浪谱信息, 通过海浪谱求得的海浪浪高为 0.71 m 。

采用本文提出的方法对实测地波雷达回波数据进行了一阶谱中的目标探测, 图 4a 和图 4b 给出了 2 个一阶谱特征存在异常的频谱及目标探测个例, 用粗直线表示出了检测到的船只目标的位置。图 4a 中的目标 1 距离为 32 km , 多普勒频率为 -0.223 2 Hz 。图 4b 中的目标 2 距离为 45 km , 多普勒频率为 0.216 3 Hz 。

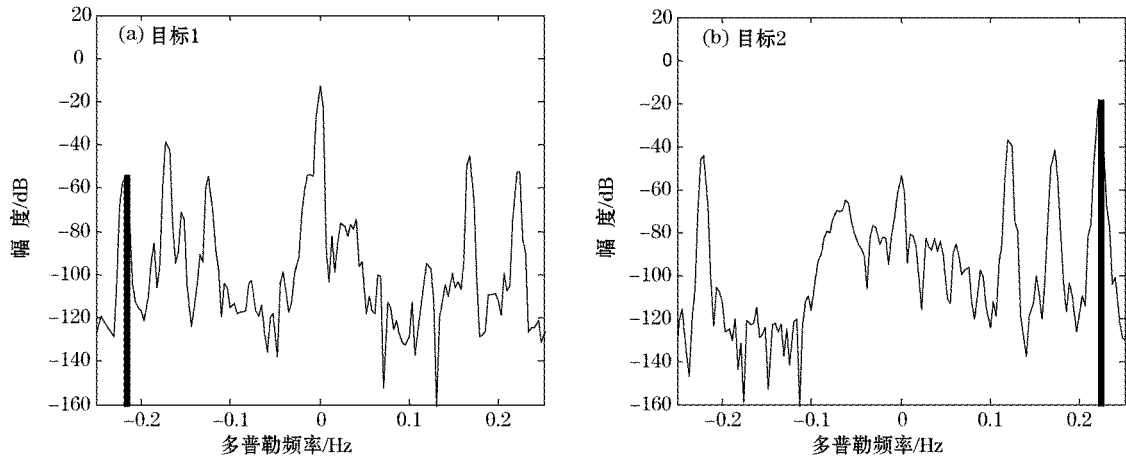


图 4 两种一阶谱中的船只目标检测个例
Fig. 4 Ship target detection results under two scenarios

为了验证结果的有效性, 图 5a 和图 5b 分别给出了目标开始进入和目标完全进入一阶谱区两种情况下的重构回波谱与实测回波谱, 并用虚线标注了实测船只目标的 AIS 位置。对应于上述两种情况的船只目标 1 和目标 2 的同步 AIS 信息和图片见表 1 和图 6。其中, 目标 1 为一艘货船, 距离地波雷达 32.66 km , 航速为 13.8 kn , 航向为 285° 。该船径向速度为 -24.7 km/h , 转换为多普勒频率为 -0.215 5 Hz 。从图 5a 可以看出该目标未完全被左一阶峰覆盖, 目标的存在导致一阶峰较重构一阶峰展宽 0.006 8 Hz 。目标引起的展宽量超过了设置的 0.005 Hz 检测门限, 表示一阶谱频率范围存在异常。目标 2 为一艘集装箱船, 距离地波雷达 45.49 km 处, 航速为 15 kn , 航向为 97° 。该船径向速度为 25 km/h , 转换为多普勒频率为 0.217 9 Hz 。从图 5b 可以看出该目标恰好位于左一阶峰频率范围内, 目标信号已被完全覆盖, 目标的存在导致一阶峰的幅度增大了 24 dB , 超过了设置的 15 dB 检测门限, 表示左右一阶峰值比存在异常。

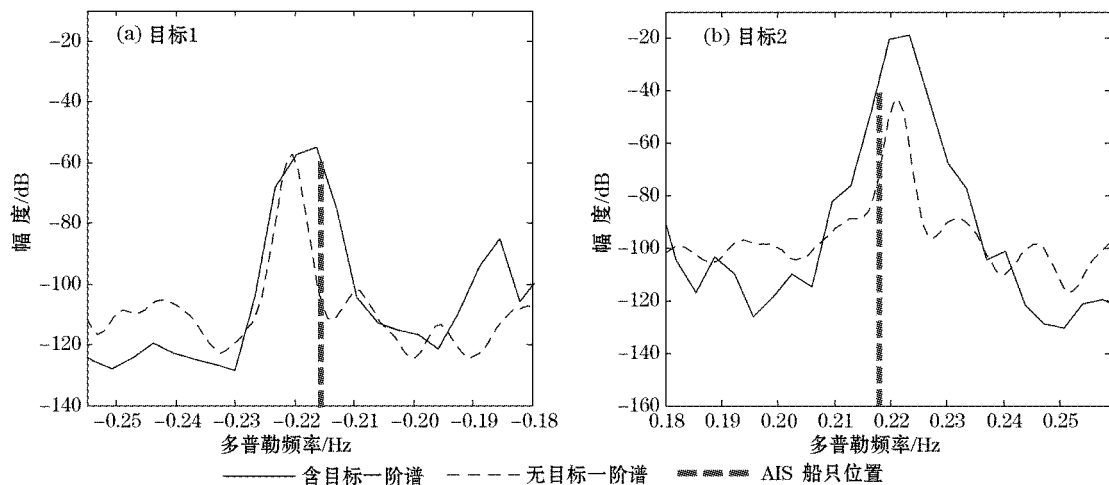


图 5 两种目标位于一阶谱区的实测结果
Fig. 5 Detection results of real target in first order spectrum under two scenarios

表 1 同步 AIS 船只信息表

Table 1 Synchronous AIS information of ship targets

项 目	船只 1 信息	船只 2 信息
MMSI	413375890	353066000
船 名	MINGZHOU 67	QIYUNHE
船长/m	180	183
船宽/m	31	28
吃水/m	11.1	8.5



(a) MINGZHOU 67



(b) QIYUNHE

图 6 检测到的船只目标图片

Fig. 6 Pictures of the detected ship targets

3 结 论

针对位于地波雷达一阶海杂波内的目标检测问题,本文提出了一种利用现场海态信息的船只目标检测方法,给出了方法的原理说明和具体处理流程。将该方法应用于实测地波雷达数据,并开展了检测结果与同步 AIS 信息的比对验证,结果表明该方法能够探测到淹没在一阶海杂波内的目标,从而提高了地波雷达的目标探测性能。

在后续研究中,除一阶谱频率范围和峰值比两个特征外,还将挖掘更多的反映一阶海杂波异常变化的特征,完善本文提出的方法,进一步提高对一阶海杂波内的目标探测能力。

参考文献 (References):

- [1] ABRAMOVICH Y, ELLARD R M, LYUDVIGA Y, et al. Surface wave radar; U. S. Patent 7,145,503. [P]. 2006-12-5.
- [2] FAN J M, JIAO P N, XIAO J M. The sea clutter effect on the low Doppler target detection by HF radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1997, 12(2): 205-210. 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.
- [3] POON M W Y, KHAN R H, LE-NGOC S. A singular value decomposition based method for suppressing ocean clutter in high frequency radar[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1993, 41(3): 1421-1425.
- [4] 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.
- [5] ZHAO Z G, CHEN J W, BAO Z. Modified adaptive ocean clutter suppression approach in OTHR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 909-914. 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.

- [6] QIAN W Z, JI Y G, WANG Y M, et al. An improved first order sea clutter cancellation method of adjacent range cell for HFSWR[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1):138-144. 钱文振,纪永刚,王伟鸣,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, 31(1):138-144.
- [7] CHEN D F, CHEN B X, QIN G D. Sea clutter suppression in image domain for coast-ship bistatic SWOTHR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(2): 387-392. 陈多芳,陈伯孝,秦国栋.岸一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.
- [8] BARRICK D E. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea[J]. *IEEE Transaction On Antennas and Propagation*, 1972, 20(1): 2-10.
- [9] WEN B Y, SHI Z H, WU S C. Numerical simulation for the sea echo spectrum of HF radar[J]. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 2000, 46(1): 127-130. 文必洋,石振华,吴世才.高频雷达海洋回波谱的数字模拟[J]. *武汉大学学报:自然科学版*, 2000, 46(1): 127-130.
- [10] GROSIDIER S, BAUSSARD A, KHENCHAF A. HFSW radar model: Simulation and measurement[J]. *IEEE Transactions on Geo-science and Remote Sensing*, 2010, 48(9): 3539-3549.
- [11] MEI X D, JI Y G, WANG Y M, et al. Separation of first-order spectral region in detecting ocean current with HFSWR[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(1): 99-106. 梅晓东,纪永刚,王伟鸣,等.高频地波雷达海流探测中一阶谱区分离方法[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(1): 99-106.
- [12] TRAYLEN S M, WYATT L R. A filter design for the OSCAR HF radar for the removal of current interaction effects[C]//IET, 7th International Conference on Electronic Engineering in Oceanography. UK: IET, 1997: 178-182.
- [13] MIDDLEDITCH A, WYATT L R. An instantaneous-frequency filtering technique for high-frequency radar oceanography[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(4): 797-803.
- [14] HELZEL T, KNIEPHOFF M, PETERSEN L. Wera: Remote ocean sensing for current, wave and wind direction[C]//IEEE. US/EU-Baltic International Symposium. Lithuania: IEEE, 2006: 23-25.
- [15] SCHMIDT R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation[J]. *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.

Ship Detection in First Order Sea Clutter of HFSWR Using Sea State Observation Information

WANG Yi-ming, ZHANG Jie, JI Yong-gang, CHU Xiao-liang, CHANG Guang-hong

(The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: To solve the ship detection problem in the first order sea clutter of High Frequency Surface Wave Radar (HFSWR), the spectrum reconstruction and the analysis of the influence of the ship targets to the first order spectrum were analyzed. Further, a target detection method using sea state measuring data was proposed. The abnormal detection of frequency range and the first-order peak ratio were performed to facilitate the target detection using HFSWR field data and spectrum reconstructed by sea current, wind direction and sea wave information. The detection results were verified by the synchronous ship Automatic Identification System (AIS) information and the detection method presented is effective in detecting the ship target in first order sea clutter.

Key words: HFSWR; first order sea clutter; target detection; sea state observation information

Received: February 9, 2015