

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*

钱文振^{1,2}, 纪永刚², 王祎鸣², 许乐达^{1,2},
戴永寿¹, 于长军³

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266555; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所,
山东 青岛 266061; 3. 哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264209)

摘要: 基于邻近距离单元格海杂波特性相关性, 分析了不同相干积累时间所导致的目标距离模糊, 改进了邻近距离单元格海杂波对消法, 此方法克服了邻近单元格海杂波对消所引起的目标对消问题。将研究方法中使用的杂波抑制处理结果应用于 CFAR 船只目标检测算法, 可明显降低目标检测中虚警的概率。

关键词: 高频地波雷达; 一阶海杂波; 杂波抑制; 目标检测

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2013)01-0138-07

高频地波雷达利用垂直极化高频电磁波沿海面绕射的原理, 能够对海面舰船及低空飞行目标进行超视距探测^[1]。在地波雷达回波中会掺杂许多杂波, 如海杂波、地杂波、电离层杂波等, 对目标检测形成干扰。地波雷达时域信号经过脉冲压缩、波束合成及相干积累等信号处理后, 可得到距离-多普勒波谱数据。虽然通过长时间的相干积累可以获得所需的多普勒频率分辨力, 但海杂波、地杂波和电离层等杂波干扰依然存在。特别是海洋回波信号所产生的一阶杂波幅度很高, 在进行目标检测时就很容易将这些杂波当做目标被检测出来, 以致于虚警率较高, 有时目标还会被海杂波一阶谱、二阶谱等给淹没了, 造成检测盲区^[2]。所以, 在利用波谱数据开展目标检测前, 需要对海杂波、地杂波进行处理, 来有效抑制海杂波、地杂波, 以降低虚警率、提高探测率。

目前, 对这种基于波谱数据的海杂波、地杂波抑制方面的研究相对较少, 西安电子科技大学尚海燕利用待检测“距离和”单元的时频分布减去邻近“距离和”单元的平均时频分布的方法来削弱强杂波^[3], 但此方法是假设舰船目标在相干积累时间内没有距离模糊。本研究针对实验获取的高频地波雷达多普勒数据特性特点, 分析了特定相干积累时间内舰船目标的运动特性, 特别是定量分析了目标距离模糊特性, 通过采用去目标距离模糊的邻近单元格波谱数据海杂波对消的方法来抑制海杂波, 并将本研究海杂波抑制方法应用于目标检测来验证其有效性。

1 相干积累时间对目标回波的影响分析

本研究利用某地波雷达站获取的并经过波束合成及相干积累之后形成的 R-D 回波谱数据。图 1 为发射频率为 4.7 MHz 时波束 1 方向的 R-D 回波谱数据, 其相干积累时间为 291.23 s (重叠率为 79.4%), 距离单元格数为 170, 每个距离单元格对应 1.5 km 距离分辨。从图中可以看出存在目标、海杂波、地物杂波、电离层杂波、噪声干扰等。图中标出了不同杂波区域。

* 收稿日期: 2011-10-27

资助项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目——海上非法舰船 SAR 和地波雷达立体监视监测应用技术系统(200905029), 高频天波/地波集成技术非协作目标信息获取与处理(61032011)

作者简介: 钱文振(1985-), 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事雷达信号处理方面研究. Email: qianwzhchina@126.com

(张 骞 编辑)

在进行多普勒滤波处理时需要每个波束同一距离单元的回波信号在时域上进行相干积累,在多普勒频谱上区分运动目标和固定杂波,对目标进行分类和初步识别;对于积累时间的选择则影响到信噪比的改善、目标回波谱是否展宽以及目标在积累时间内是否运动出距离单元格。在满足海浪信号平稳性条件下,相干积累时间越长,获得的信号功率越强,信噪比也越大;然而相干积累时间较长时,目标由于航行方向和速度的变化,其多普勒频率往往是时变的,信号功率谱有较大的扩展而不能得到有效积累。另外,在进行海上舰船目标探测时,高频地波雷达为保证足够的多普勒频率分辨率其相干积累时间不能太短^[4]。针对海上舰船目标采用短相干积累时间更有利于目标探测,一般情况下对舰船目标的积累时间为 3~5 min。

假定舰船的最大速度为 30 kn,距离单元格为 1.5 km,那么此舰船可以在 97.2 s 后跨越此距离单元。积累时间大于 97.2 s 时,进行相干积累处理后,舰船会在这两个甚至更多的距离单元格内同时出现。针对获取的波谱数据来看,其积累时间为 291.23 s,在这段时间内舰船目标(速度 30 kn)可以航行 4.5 km,跨越了 3 个距离单元格,会产生距离模糊。这样在一个积累时间内,进行数据处理时会在几个距离单元格内同时出现目标。实测数据处理如图 2 所示,标示的目标在多普勒向频率保持一致,距离向远离雷达。图 3 为在频率 0.145 9,0.149 4,0.163 1 Hz 位置处的谱线,距离向范围为 37.5~52 km,其中可以看出 45 km 和 46.5 km 处的回波幅度相差不大,48 km 处的回波幅度有所下降,分析其原因可能是目标在积累时间内刚驶入该距离单元格,49.5 km 以后该目标幅度下降且目标信息逐渐消失。由此可以看出该舰船目标在积累时间内跨越了 3 个距离单元格,且在频谱范围上有所展宽。图 4 分别是 45,46.5,48 km 处的波谱图,该目标多普勒频率均为 0.149 4 Hz,幅度分别为 80.4,80.52,69.6 dB。在 45 km 和 46.5 km 处的回波幅度相差不大,在 48 km 处幅度下降 11 dB 左右。通过对距离向和多普勒向的分析,可得出在相干积累时间内,目标跨越了多个距离单元格,即在 R-D 波谱图中目标可以同时出现在多个距离单元格出现。

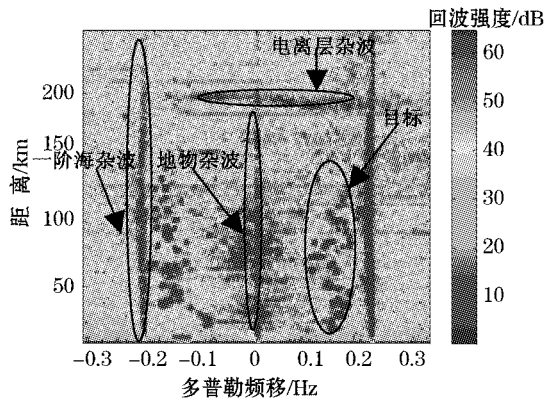


图 1 R-D 波谱图
Fig. 1 R-D spectrum

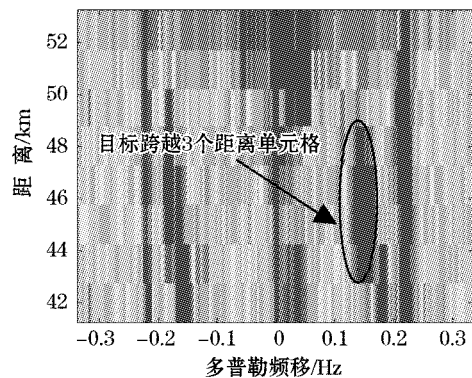


图 2 局部放大 R-D 波谱图
Fig. 2 A partially enlarged R-D spectrum

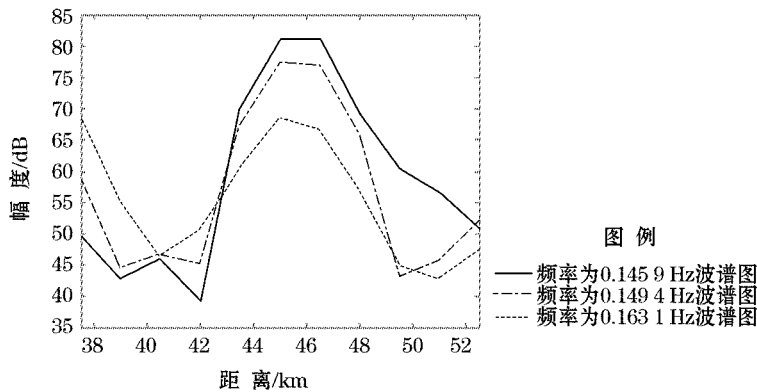


图 3 3 种频率的波谱图
Fig. 3 Spectra of the three kinds of Doppler frequency

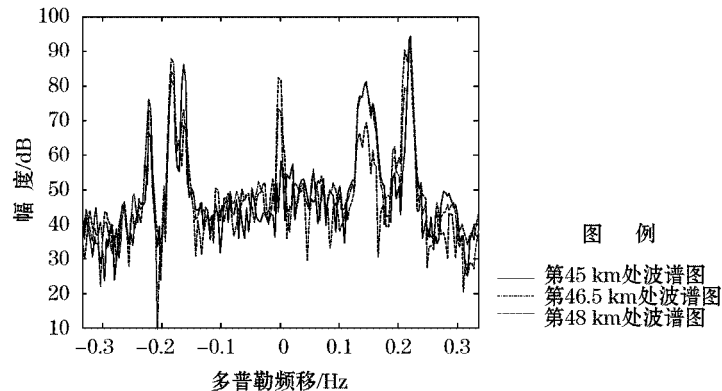


图 4 3 处距离的多普勒回波谱图

Fig. 4 The Doppler echo spectra at 3 distance

2 去距离模糊的一阶海杂波对消原理

相邻距离单元格海杂波空时特性有相似性^[5],且在图 1 中可以看出不同距离单元上海杂波一阶峰空时特性差异较小。若同一波束方位内、相邻距离单元海杂波多普勒频率差异小于 1~2 个多普勒分辨单元(多普勒分辨率取决于计算空时谱所采用的调频周期数),可采用相邻距离单元回波数据抑制海杂波^[3]。在一个发射综合波束内,邻近距离单元海杂波的幅频特征具有一定的相关性,因此西安电子科技大学尚海燕选择利用高频地波雷达海洋回波时频图减去平均海杂波时频分布图来抑制海杂波^[3]。这样可以削弱强海杂波,使海杂波区以外的目标得以凸显。由于相干积累时间较长,舰船目标在相干积累时间内可能跨越几个距离单元格,在选取距离单元时要避开自身的模糊单元。不同距离单元格内多普勒回波数据进行对消,两对消距离单元格之间相隔 3 个距离单元。假设船的速度为 30 kn,这样在 291.23 s 的积累时间内,舰船能航行 4.5 km,所以舰船不可能到达选取的用来对消的单元格内(至少相隔 4.5 km),从而不会对消掉目标。假如两对消单元格内都有目标,目标径向速度、船体大小不同也不会对消掉。对相邻距离单元回波平均数据进行对消处理,得到一阶海杂波抑制掉的幅频图。对消处理可以将大部分一阶海杂波、地杂波抑制掉,其对电离层杂波抑制也起到一定得作用。

方法流程:首先,选择某一波束第 N 个距离单元回波数据作为待检测距离单元数据;其次,在该波束下,选择待检测距离单元邻近单元格的平均回波数据作为参考对消回波数据;最后,采用待检测距离单元回波数据减去邻近距离单元的平均回波数据的方法来抑制海杂波。具体公式为

$$F_N = F_{N0} - (F_{N+4} + F_{N+5} + F_{N-4} + F_{N-5})/4 \quad (1)$$

式中, F_{N0} 为第 N 距离单元格原始回波谱数据; F_{N+4} , F_{N+5} , F_{N-4} , F_{N-5} 分别为第 $N+4$, $N+5$, $N-4$, $N-5$ 距离单元格回波谱数据; F_N 为第 N 距离单元格海杂波对消后结果。

由于进行对消处理后,目标单元格幅度有所下降,为不削弱目标 RCS 值,需要对其进行幅度补偿。将对消前该单元格幅度平均值及对消后幅度平均值做差,求出所需要的幅度补偿值,将对消后幅频图进行幅度补偿,把幅度还原到原始水平。

3 实测数据处理结果与比对

3.1 去距离模糊的一阶海杂波对消处理

下面对第 28 距离单元格的实测回波数据进行海杂波抑制处理,并选取与其相隔 3~5 个距离单元的平均数据作为参考对消单元数据。将 28 距离单元格数据减去其对应的参考对消单元数据后再进行幅度补偿即可得到海杂波抑制后回波数据。图 5 为选取波束 1 方向的做对消处理的第 28 距离单元格(42 km 处)幅频图,图中实线为第 42 km 处的幅频图,虚线为邻近平均距离单元格的幅频图。从图中可以看出,相邻单元格之间的海杂波有相关性^[6]。做对消处理可以使海杂波有较大抑制,而目标的多普勒频率与海杂波多普勒频率不同,对消时不会对消掉。利用待检测距离单元格的原始数据除以邻近距离单元格的平均数据再对其取对数,即两单元格原始数据取对数后相减。将第 28 距离单元格数据减去邻近平均距离单元格数据,采用波束 1、距离 42 km 处,对消结果如下图所示:

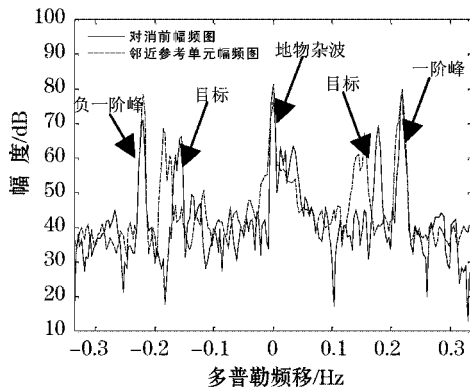


图 5 42 km 处多普勒回波谱图
Fig. 5 The Doppler echo spectrum at 42 km

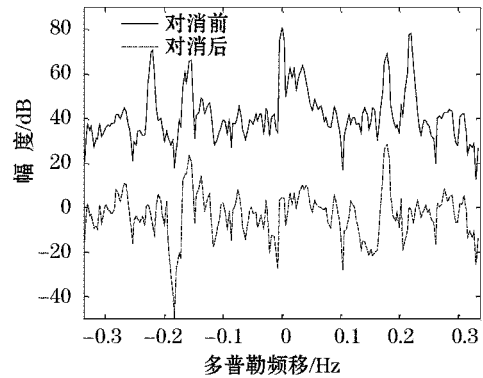


图 6 42 km 处海杂波对消波谱图
Fig. 6 The Sea clutter cancellation spectrum at 42 km

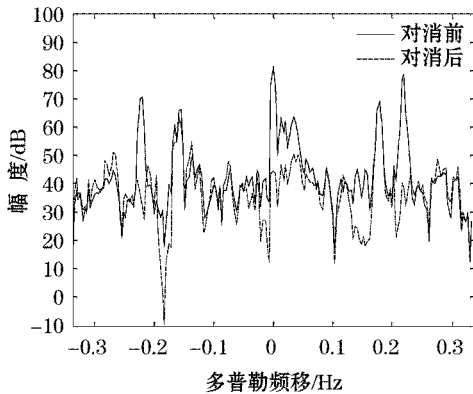


图 7 第 42 km 处幅度补偿波谱图
Fig. 7 Amplitude compensation spectrum at 42 km

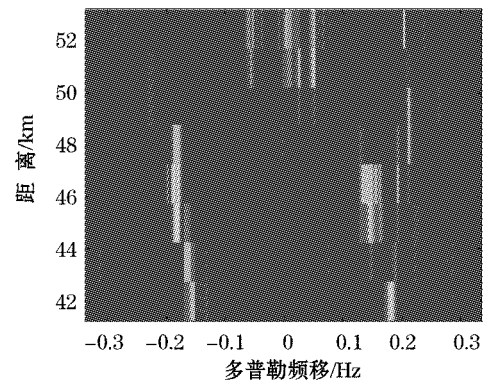


图 8 海杂波对消 R-D 波谱图
Fig. 8 R-D spectrum of sea clutter cancellation

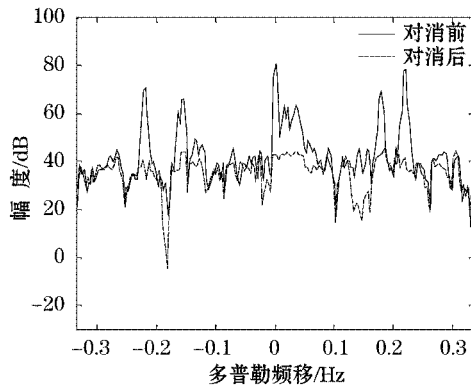


图 9 42 km 处未考虑距离模糊海杂波对消波谱图
Fig. 9 Sea clutter cancellation spectrum, ignoring distance fuzzy at 42 km

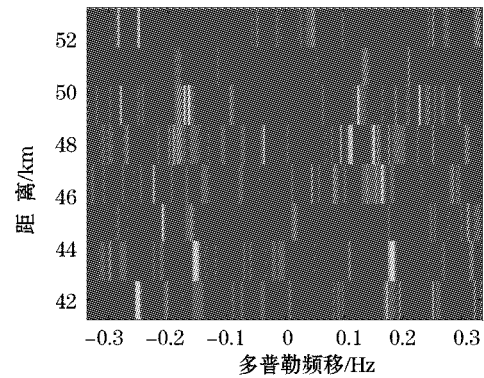


图 10 未考虑距离模糊海杂波对消 R-D 波谱图
Fig. 10 R-D spectrum of sea clutter cancellation, ignoring distance fuzzy

从图 6 可以看出,因对消后幅度有所下降,为使目标 RCS 值恢复原始水平,需要对其进行幅度补偿。将对消前该单元格幅度平均值及对消后幅度平均值做差,求出所需要的幅度补偿值,将对消后幅频图进行幅度补偿,把幅度还原到原始水平。进行 38.1 dB 幅度补偿后的幅频图结果如图 7 所示。图 7 中实线为对消前第 42 km 处的幅频图,虚线为幅度补偿后的幅频图。根据海杂波的特性分析,海杂波正负一阶 Bragg 峰分别在频率 0.221 5 Hz 和 -0.218 1 Hz 处,地杂波大体在零频附近。从图 7 可以看出,正负一阶峰 Bragg 得到了较大的抑制,并且地杂波也得到了较大的抑制。而在零频与正负一阶 Bragg 峰之间频率为 0.180 3 Hz, -0.152 8 Hz 处的目标没有被抑制掉,且经幅度补偿后幅度仍在 60 dB 左右。从图中可以推断出,此单元格内可能有两个目标,一个目标正朝向雷达站运动,另一个目标在远离雷达站。图 8 为对消后局部放大 R-D 波谱图,图 9 和图 10 分别为忽略距离模糊对消结果及局部放大 R-D 波谱图,从图 9、图 10 中可以看出改进前方法将目标一起对消掉了。通过综合对比可以得出距离模糊的邻近距离单元格海杂波对消法的有效性。

3.2 整体抑制效果比对分析

图 11 为波束 2、第一时相数据在所有距离单元格上的原始二维图及对消后二维图。

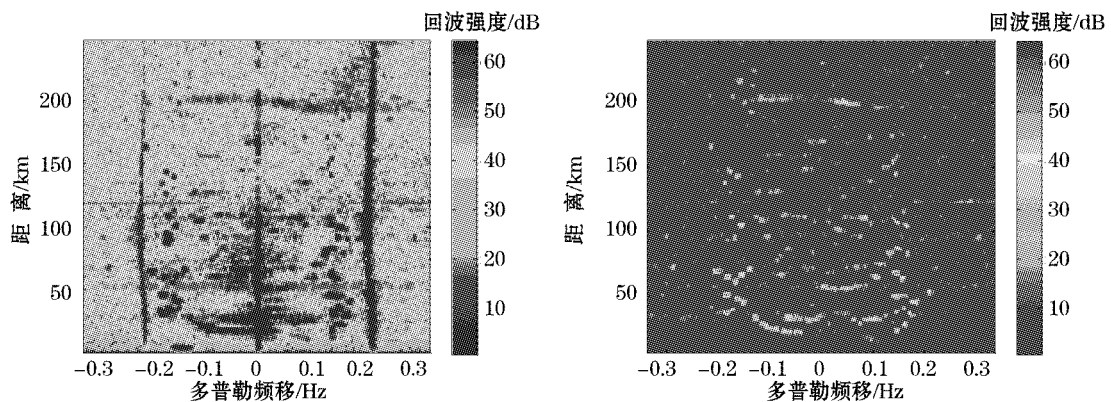


图 11 二维多普勒回波图及对消图
Fig. 11 2D Doppler echo spectrum and cancellation spectrum

从图 11 中可以看出海杂波对消的整体效果,海杂波一阶峰、二阶峰以及地杂波得到了较大抑制,而目标

却较明显的显现出来。利用海杂波的相关性进行不同距离单元格海杂波对消效果较好。

下面利用常规 CFAR 检测算法^[7]进行验证,采用波束 2,第一时相数据进行处理。本研究主要针对海杂波、地杂波抑制方法进行研究,目标检测算法在这不做详细描述,直接引用其做验证处理。选取雷达波束 2 方向,所有距离单元格,对海杂波抑制后的二维数据进行目标检测处理。图 12 为原始二维图和对消前目标检测结果的合成图,图 13 为原始二维图和对消后目标检测结果的合成图,图中标出的小圆圈为目标检测结果,也就是目标。可以看出,进行邻近距离单元格杂波对消处理后,海杂波、地杂波得到了有效抑制,然而目标却都还保留着。从图中可以明显的看出,在波束 2 方向,0~250 km 范围内的目标分布情况。当然也不排除有特殊情况,两对消格内都有目标且速度和大小相同时,此时会对消掉目标。这种情况可以通过在距离单元格选取上的改进而避免,或者用航迹关联来判断是否存在目标。

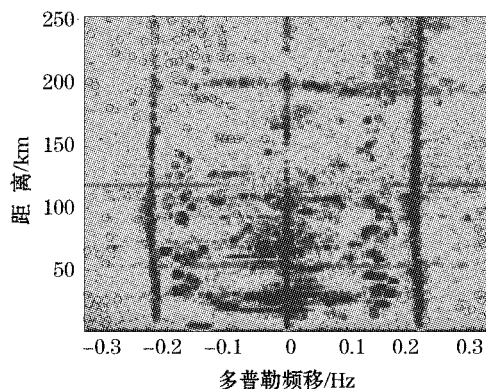


图 12 对消前目标检测结果

Fig. 12 Target detection results before cancellation

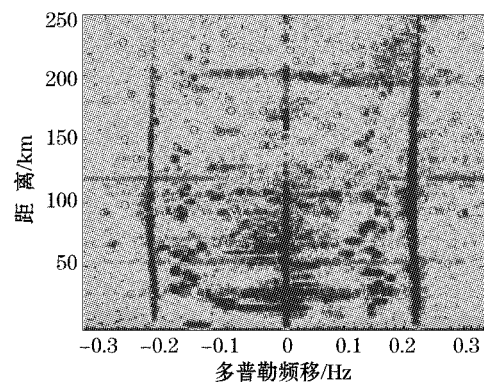


图 13 对消后目标检测结果

Fig. 13 Target detection results after cancellation

4 结 语

本研究针对强海杂波背景特点,开展了基于波谱数据的海杂波特性分析。考虑到地波雷达相干积累时间相对较长而造成目标距离单元模糊,提出了改进的邻近距离单元格杂波对消的方法对地波雷达实测波谱数据进行预处理,并用常规目标检测算法进行了验证。从目标检测结果可以看出,检测前对海杂波进行对消预处理效果比较好,而且是很有必要的。这种预处理有效的避免了海杂波对目标检测的影响,降低了虚警率。

需要指出的是,在进行对消处理时,淹没在海杂波一阶谱中的目标会被对消掉,从而出现漏警的问题。因此在以后的工作中需要继续对海杂波一阶谱进行特性分析,结合不同海杂波对消方法进行分析,并通过时频分析来确定淹没在海杂波一阶谱中的目标。

参考文献 (References):

- [1] GAO X B, ZONG C G, YUAN Y S. Sea clutter canceling for HF ground wave shipborne OTH radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 5-6. 高兴斌,宗成阁,袁业术. 高频地波舰载超视距雷达的海杂波对消[J]. 电子学报,2000,28(3):5-6.
- [2] LEI Z Y, WEN B Y, CHENG F. Target detection in first order Bragg peaks with adaptive cancellation[J]. Chineses Journal of Radio Science, 2006, 21(3): 365-366. 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.
- [3] SHANG H Y. The maneuvering target detection of coast-ship bistatic/multistatic surface wave over the horizon radar[D]. Xi'an: Xi Dian University, 2008: 42-66. 尚海燕. 岸舰双/多基地地波超视距雷达机动目标的检测[D]. 西安:西安电子科技大学,2008:42-66.

- [4] ZHOU H. Study on some problems in HF radar signal processing[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004: 36-37. 周浩. 高频雷达信号处理中的若干问题研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 36-37.
- [5] CHEN D F. Study on some issues of coast-ship bistatic surface wave over-the-horizon radar[D]. Xi'an: Xi Dian University, 2008: 95-110. 陈多芳. 岸-舰双基地波超视距雷达若干问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 95-110.
- [6] YU J S, MA H X, ZHU Z Y. Correlation character of radar echo-based sea clutter suppression algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 180(6): 121-122. 於建生, 马红星, 朱征宇. 基于雷达回波相关特征的海杂波抑制方法[J]. 舰船电子工程, 2009, 180(6): 121-123.
- [7] LU X L. Enhanced detection of small targets in ocean clutter for high frequency surface wave radar[D]. Canada: University of Victoria, 2009: 65-91.

An Improved First Order Sea Clutter Cancellation Method of Adjacent Range Cell for HFSWR

QIAN Wen-zhen^{1,2}, JI Yong-gang², WANG Yi-ming², XU Le-da^{1,2},
DAI Yong-shou¹, YU Chang-jun³

(1. *China University of Petroleum*, Qingdao 266555, China; 2. *First Institute of Oceanography, SOA*,
Qingdao 266061, China; 3. *HARBIN Institute of Technology at WEIHAI*, Weihai 264209, China)

Abstract: Based on the correlation of sea clutter of adjacent range cells, the target fuzzy distance caused by different coherent accumulation time is analyzed and the sea clutter of adjacent range cell cancellation algorithm is improved. This method has overcome the problem of target cancellation caused by the neighboring cell sea clutter cancellation. By using the results from the clutter suppression processing proposed in the paper to the CFAR ship target detection algorithm, the false alarm rate of the target detection could be obviously reduced.

Key words: HF surface wave radar; first order sea clutter; clutter suppression; target detection

Received: October 27, 2011