

高频地波雷达海杂波的边界约束循环对消*

王祎鸣^{1,2} 毛兴鹏² 张杰¹ 纪永刚¹ 楚晓亮¹

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

摘要 在对海洋监视监测的过程中, 高频地波雷达的船只目标检测能力与其对海杂波的抑制能力密切相关。但是, 传统海杂波时域抑制方法存在目标回波参数与海杂波相近时难以区分其各自分量, 对消时目标被误消除的问题。针对上述问题, 本文提出了一种适用于高频地波雷达海杂波的边界约束循环对消方法。该方法综合海杂波频移理论和实际海杂波特性分析制定出边界条件, 约束建模对消过程, 实现海杂波分量的抑制。实测地波雷达数据和船舶自动识别系统(AIS)数据检验的结果表明, 本文方法克服了传统方法的不足且信杂比改善更加稳定, 能够更加有效地实现海杂波循环对消。

关键词 海杂波; 高频地波雷达; 船只探测; 循环对消

中图分类号 TN95 **doi:** 10.11693/hyhz20141200357

高频地波雷达(简称: 地波雷达)利用垂直极化高频电磁波沿海面绕射传播(地波模式)的特性, 能够对海面目标实现超视距探测, 被称之为 21 世纪新体制海洋雷达(Abramovich *et al*, 2006; 纪永刚等, 2014)。目前, 美国、加拿大、德国、英国、俄罗斯、澳大利亚等国都开展了地波雷达的相关研究。加拿大雷声公司的 SWR 系列是海上船只和低空目标监测方面的代表, 最远探测距离可达 400km(Ponsford *et al*, 2009)。而在役数量最大的美国 CODAR 公司 SeaSonde 便携式海态遥感地波雷达产品, 也初步具备船只目标探测能力(Dobson *et al*, 2013)。国内, 哈尔滨工业大学的大型阵列式海面目标探测地波雷达系统(Liu *et al*, 2003)已投入使用。武汉大学(胡松等, 2003; 吴雄斌等, 2012)的小型地波雷达系列产品, 在具备风、浪、流反演能力后, 开展了船只目标探测的研究及适应性改造。总的来说, 地波雷达的研究与应用得到了越来越多的重视, 体现了其在海上目标监视监测和海洋环境检测等方面的重要作用。

应用地波雷达探测海面船只时, 回波掺杂海洋中各种尺度的海浪的散射回波干扰, 即海杂波。特别

是海杂波干扰中的一阶分量幅度很高, 超过或与船只目标的检测阈值相当, 易造成漏警与虚警现象(钱文振等, 2013)。为了提高地波雷达船只目标的检测能力, 需要对海杂波进行有效抑制。研究表明, 海杂波的主成分为一阶回波时, 可以将其近似为正弦信号建模(Khan, 1991), 这为海杂波时域对消奠定了基础。Root(1998)首次提出迭代对消算法抑制海杂波, 在每次迭代过程中选择快速傅立叶变换(FFT)的最大峰值来完成对正弦信号参数估计与建模, 通过多次迭代完成对海杂波的逐步对消。但是, 该方法需要对正弦信号的频率、幅度、初始相位进行精确估计, 否则估计误差将直接影响对消性能。因此, 郭欣等(2004)提出了基于 FFT 相位分析的方法, 提高参数估计精度。然而, 在将该方法用于地波雷达海杂波循环对消时需要在局部搜索极值, 且对回波幅度存在依赖性, 不但目标与海杂波的区分性弱, 而且易导致误操作将回波幅度与海杂波相当的目标移除。本文将海杂波理论及实际回波特性总结归纳为约束条件, 融入到相位对消方法, 提出了一种有利于海洋船只目标探测的地波雷达海杂波时域循环对消方法。

* 国家自然科学基金项目, 61171180 号; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目, 0213T03 号。王祎鸣, 博士研究生, 助理研究员。E-mail: 467744980@qq.com。

通讯作者: 毛兴鹏, 博士生导师, 教授, E-mail: mxp@hit.edu.cn

收稿日期: 2014-12-22, 收修改稿日期: 2015-02-05

1 海面回波模型与参数估计

1.1 海面回波模型

海浪可被看作是波长和方向各异的正弦波的叠加。与雷达发射波长满足谐振关系的海浪会产生 Bragg 散射, 其中朝向雷达运动的浪产生正多普勒频移, 背离雷达运动的海浪产生负多普勒频移。因此, 地波雷达一阶海杂波的复正弦信号表示形式(Khan, 1991)为

$$C(t) = \sum_{l=1}^L A_p(l) e^{j2\pi f_p(l)t} + A_n(l) e^{j2\pi f_n(l)t} \quad (1)$$

其中, f_p 、 f_n 分别为海杂波正负多普勒频率; A_p 、 A_n 为相应的幅度; l 为分量数。

地波雷达的接收信号可表示为雷达分辨单元内海浪与船只目标回波的叠加, 即

$$r(t) = (C(t) + \sum_{k=0}^K A_t(k) e^{j2\pi f_t(k)t}) e^{j\varphi_0} \quad (2)$$

其中, A_t 、 f_t 、 K 分别为船只目标的幅度、频率和数量; φ_0 为初始相位。

1.2 模型参数估计

信号模型参数包括频率、幅度以及初始相位。首先需要对公式(2)进行 N 点 FFT 变换处理, 得到离散频谱。令参数 A_{\max} 、 φ_{\max} 分别为频谱的极大幅值和相位, 那么在相应频率下的时域信号模型正弦分量的幅度 A 和初始相位 φ_0 为(郭欣等, 2004)

$$A = A_{\max} \sin[\pi(fT - k_0)/N] / \sin[\pi(fT - k_0)] \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{\max} - (1 - 1/N)(fT - k_0)\pi \quad (4)$$

其中, k_0 、 f 分别为频谱中幅度最大值对应的谱线值与频率值; T 为离散采样时间。

由于在实际应用中, 采样引起的栅栏效应导致公式(4)中的真实频率位于两谱线之间, 会引入估计误差, 故需参考 FFT 相位分析法进行矫正。

首先, 将时域数据分成前、后各 $N/2$ 点分别作 FFT 变换。

其次, 针对两部分采样点间的相位差 $\varphi_2 - \varphi_1$ 所引入的 2π 整周期模糊问题, 通过限定频率偏差解决。该偏差设定为频率分辨率的二分之一, 表示为

$$\Delta f = \pi T / (\varphi_2 - \varphi_1) = \pi T / (\pi f T - 2\pi k_{01}), \quad (5)$$

$$\in [-0.5 f_{\text{res}}, 0.5 f_{\text{res}}]$$

其中, k_{01} 为 $N/2$ 点采样数据在频谱中的最大谱线值; f_{res} 为频率分辨率。

最终, 得到精确的频率估计

$$f = k_0 / T + \Delta f \quad (6)$$

将(6)代入式(3)和(4), 从频谱中获取未知量 A_{\max} 和 φ_{\max} , 从而解得信号幅度 A 和初始相位 φ_0 。到此, 时域信号参数均已获取, 即产生用于模拟时域回波分量的模型已建立。后续的海杂波抑制效果, 将与否制定有效的对消约束条件, 保证对各分量的正确处理密切相关。

2 海杂波特性分析

地波雷达海杂波具有分量正负频率同时存在, 频率间隔较为固定, 且谐振能量很强的特点。其峰值频率可根据静止海面多普勒频移理论计算, 而针对运动海面的情况, 实际海杂波分量会产生峰值频率偏移、能量拓展等现象。

根据 Bragg 散射理论, 当海浪波长为雷达波长的一半时, 海浪波列有最强烈的后向散射, 对应的回波多普勒谱中就有两个对称的尖峰出现。理论上, 海杂波 Bragg 峰的多普勒频移(Crombie, 1955)为

$$f_B = \pm \sqrt{\frac{g}{\pi \lambda}} \approx \pm 0.102 \sqrt{f_0} \quad (7)$$

其中, g 是重力加速度; f_0 、 λ 分别是雷达发射频率和波长。

根据理论公式(7), 可以求得无海流时海杂波尖峰所处的多普勒频率。该尖峰的频率间隔相对固定, 即 $2f_B$ 。

实际雷达探测应用中, 海洋环境复杂多变, 导致海杂波还存在下列现象

1) 海流引起两个 Bragg 尖峰在多普勒向上等量偏移。该现象可用动态范围进行描述

$$f_{\text{pk}} \in [f_B - \delta f_{\text{max}}, f_B + \delta f_{\text{max}}] \quad (8)$$

式中, f_{pk} 为尖峰中心位置对应的多普勒频率, δf_{max} 为潜在的最大径向海流速度造成的偏移量。

2) 海流速度、流向变化及雷达体制导致的 Bragg 峰在多普勒频点上的分布产生展宽。在峰值左右的展宽现象, 可表示为

$$f_{\text{lb}} = f_{\text{pk}} - \Delta f / 2, \quad f_{\text{rb}} = f_{\text{pk}} + \Delta f / 2 \quad (9)$$

其中, f_{lb} 、 f_{rb} 分别代表尖峰的左右多普勒展宽边界; Δf 为展宽量。

3) 海杂波的主成分是由一阶谐振产生的, 后向散射能量很强。在雷达有效探测范围内, 其杂噪比通常很高, 即

$$\text{CNR} = P_c / P_n \gg 0 \quad (10)$$

其中, P_c 、 P_n 分别为海杂波和噪声功率。

上述海杂波特性为在地波雷达混合回波中分离并抑制海杂波提供了参考, 而海杂波的偏移及展宽含量需结合最大流速和杂噪比搜寻获得。

3 边界约束对消方法

传统 FFT 相位分析方法的对消对象为幅度最强的信号分量。然而, 正如公式(2)所表明的, 地波雷达回波是船只目标、海杂波甚至是地物杂波叠加在一起的复合信号。有效抑制海杂波的前提是其回波分量强度始终高于船只目标, 显然这种假设限制了该方法的实用性。

海杂波边界约束条件的制定综合了海杂波频移理论和实测地波雷达高频电磁波与海浪相互作用的回波特点。在杂噪比求取过程中, 为了减少船只目标回波的影响, 将特性分析中公式(7)所描述的海杂波理论与(8)—(10)的雷达实测回波特点相结合, 综合海杂波的多普勒频移、幅度信息, 提出施加最大海流偏移约束的杂噪比极值问题, 求解优化的海杂波约束条件。针对地波雷达海杂波的双边特点, 在求解最大杂噪比时, 将正负频率双边杂噪比纳入, 进一步保证了参数求解的正确性。该过程可表示为

$$\begin{aligned} & \max(\text{CNR}(f_{\text{pk}}, \Delta f)) \\ & \text{subject to } \text{CNR} = \text{CNR}_L + \text{CNR}_R, \quad (11) \\ & f_B - \delta f_{\text{max}} \leq f_{\text{pk}} \leq f_B + \delta f_{\text{max}} \end{aligned}$$

其中, \max 代表求最大值; subject to 代表服从其后面的条件; 杂噪比及功率参数表示为

$$\begin{aligned} \text{CNR}_L &= P_{Lc}/P_{Ln}, P_{Lc} = \text{Pow}(f_{\text{lb}} : f_{\text{rb}}), \\ P_{Ln} &= \text{Pow}(f_{\text{pk}} - k\Delta f : f_{\text{pk}} + k\Delta f) - \text{Pow}(f_{\text{lb}} : f_{\text{rb}}), \\ \text{CNR}_R &= P_{Rc}/P_{Rn}, P_{Rc} = \text{Pow}(f_{\text{lb}} + 2f_B : f_{\text{rb}} + 2f_B), \\ P_{Rn} &= \text{Pow}(f_{\text{pk}} + 2f_B - k\Delta f : f_{\text{pk}} + 2f_B + k\Delta f) \end{aligned}$$

其中, $\text{Pow}(\cdot)$ 代表求括号中多普勒频率范围内的信号功率。通过求解式(11), 解得最大杂噪比下海杂波的 Bragg 尖峰中心位置及其展宽度, 最终得到边界约束输出。

结合海面回波模型和海杂波特性分析, 将海杂波特性融入到海杂波对消, 形成带约束的循环对消方法。该方法的总体流程如图 1 所示, 具体步骤如下:

首先, 根据模型参数估计中的步骤及式(3)—(6)计算出雷达回波中最强正弦信号的幅度、频率以及初始相位, 用于产生对消所需的时域信号。

其次, 将雷达回波进行 FFT 变换, 生成多普勒谱后, 通过应用边界约束的求取过程与式(11)计算出海杂波的频率边界。

最终, 基于时域建模信号进行实测雷达数据的对消, 在该过程受边界条件和循环次数的约束。可表示为

$$\begin{aligned} r'(t) &= r(t) - A(m)e^{j2\pi ft}e^{j\varphi_0} \\ & \text{subject to } f \in [f_{\text{lb}}, f_{\text{rb}}], m \leq M \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $r'(t)$ 为对消后的雷达回波; M 为循环次数。

需要说明的是, 上述过程重复进行, 达到循环次数的设定值 M , 循环终止。

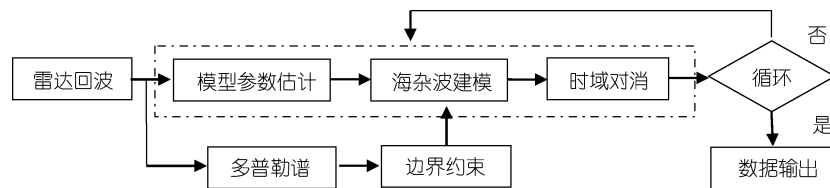


图 1 海杂波循环对消方法流程图

Fig. 1 The flowchart of algorithm for sea clutter circulation cancellation

4 实测数据处理

为检验本文方法的有效性, 采用 2011 年 7 月 7 日的渤海海域地波雷达船只目标探测实验数据进行验证。实验过程中, 在录取地波雷达回波的同时, 获取了探测海区内的同步船只 AIS(Dzvonkovskaya *et al.*, 2010) 信息。地波雷达工作频率是 4.7MHz, 在该频率下海杂波峰值点 Bragg 理论中心频率为 $f_B = \pm 0.2211\text{Hz}$ 。在没有海啸等极端海洋灾害情况发生的情况下, 通

常海流流速小于 1m/s(Gurgel *et al.*, 2011)。因此, 在制定边界约束策略时, 设流向地波雷达站点的最大径向流速为 1m/s, 相对应的海杂波峰值点频偏为 $\delta f_{\text{max}} = 0.031\text{Hz}$ 。

地波雷达海面船只目标探测时, 有效相干积累时间通常分为长时间数据积累和短时间数据积累两种情况。理论上相干积累时间越长, 越有利于获取足够的频率分辨率和较高的船只回波能量, 船只目标较短积累更容易被检测到。但是长时间积累的实时性

差, 易导致船只驶出检测单元, 产生距离模糊。以最大速度为 30kn 的船只为例, 雷达距离单元为 1.5km, 那么该船将在 100s 后跨越此距离单元。因此, 在实际应用中虽以长时间积累检测为主, 短时间积累检测也作为备选得到了保留。

在接收数据时间较长(300 秒)的情况下, 经计算左侧海杂波峰的中心频率 f_{pk} 搜寻范围为 $[-0.2521\text{Hz}, -0.1901\text{Hz}]$, 右侧海杂波峰与其间隔两倍的 f_B , 即在 $[0.1901\text{Hz}, 0.2521\text{Hz}]$ 范围内。左侧海杂波的两个多普勒展宽边界 f_{lb} 和 f_{rb} 分别为 -0.2507Hz 、 -0.2301Hz , 右侧为 0.2026Hz 、 0.2198Hz 。相对应地, 边界距左尖峰理论中心位置的双边展宽量 Δf 为 0.0296Hz 和 0.009Hz , 距右尖峰为 0.0185Hz 和 0.0013Hz 。同理, 在接收数据时间较短(100s)的情况下, 左侧海杂波的两个多普勒展宽边界分别为 -0.25Hz 、 -0.22Hz , 右侧为 0.19Hz 、 0.22Hz 。

图 2 给出了距离雷达约 88km 的长时间及短时间

海面回波数据对消前后的结果。在采用边界约束的海杂波对消法处理后, 两种时域数据均只有幅度有所降低, 说明通过模型参数估计后部分正弦分量被剥离; 但是, 海杂波对消前后的信号幅度变化不是非常剧烈, 说明部分强信号分量得到了保留, 边界约束在该过程中发挥了作用。而传统相位对消方法处理后, 信号的正弦特征消失, 变得杂乱无章, 其中的船只回波及海杂波分量都已被对消掉。

图 3 给出了长时接收数据和短时接收数据对消处理前后的速度谱, 包含了船只目标、海杂波、地物杂波以及噪声基底。观察图 3a, 目标均得以保留, 海杂波被抑制。图 3b 目标 1 被削弱到与海杂波相当的程度, 目标 2、3 则被削弱到海杂波幅值以下。图 3c 海杂波中的目标 1 和目标 3 凸显, 目标 2 得到有效保留。图 3d 目标 1、2、3 均被削弱, 海杂波高于目标 1, 不但导致漏警还会引起虚警。由对比分析可见, 基于传统相位分析的对消方法不足如下

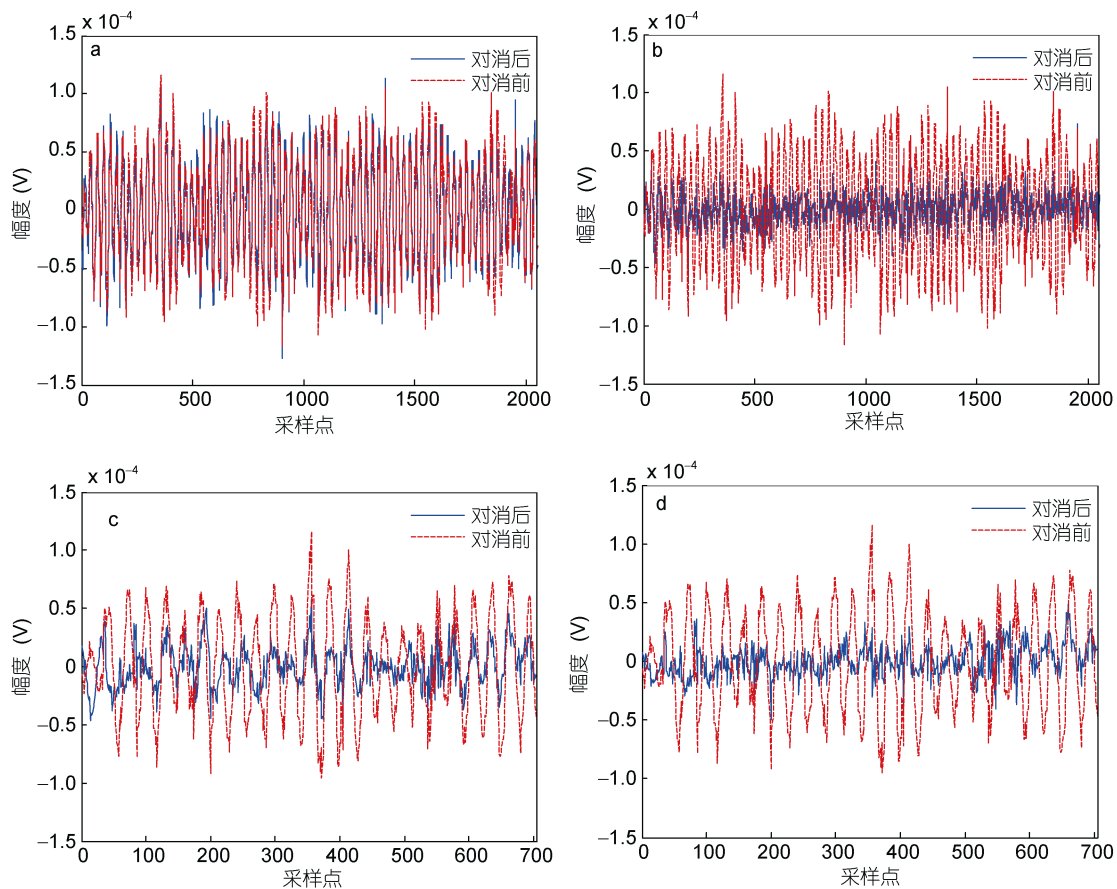


图 2 海杂波对消前后时域信号。(a)边界约束的海杂波对消法(长时间数据);(b)传统相位对消法(长时间数据);(c)边界约束的海杂波对消法(短时间数据);(d)传统相位对消法(短时间数据)

Fig.2 The time domain signal before/after sea clutter cancellation

1)依赖于全局最强能量信号的搜寻与对消,导致在船只目标回波强于海杂波时误将船只目标消除。

2)在目标回波参数尤其是多普勒频移与海杂波相近时,对消处理后船只目标也产生衰减,与海杂波仍然难以区分。

上述问题一方面是传统相位对消方法自身的原因,即依次对最强信号执行消除,面对复杂的雷达回波难免先将较强的船只回波对消掉。另一方面是因为对海杂波信息利用不充分。海杂波相对于船只目标回波有其特殊的幅度、多普勒特性,这些在传统方法中没有得到体现,导致对杂波和目标回波的区别性不强,在抑制杂波的同时将目标回波也抑制掉。通过将海杂波的特性转化为约束条件,融入到传统相位对消方法当中,可以解决上述问题。对消前后的速度谱可见,海杂波得到了有效的抑制。需说明的是,地物杂波因为在实际处理时添加到了约束中也被对消了。然而,不论是幅度强于海杂波还是邻近海杂波的目标信号都没有受到影响。

图4分析了对消次数对信杂比改善的影响。长时

间数据情况下,目标1的信杂比改善在对消次数达到30次及以上时达到峰值43.96dB。目标2、3在40次对消后稳定在50.19dB。短时间数据情况下,目标1的信杂比改善在对消次数达到20次时达到峰值19.36dB。目标2、3在5次对消后分别达最大值15.25dB和18.35dB。在上述两种数据情况下,经传统方法处理后,由于对目标和海杂波的区别度不够且每次对消时针对的是幅度最强信号,目标1的信杂比恶化较为显著。目标2、3虽在较少对消次数时,信杂比会得到改善,但杂波对消过程中目标的能量也被削弱,直至随海杂波一起完全被消除。对比可见,本文方法对循环次数的在达到一定数量时,信杂比改善将趋于稳定,改善程度更加明显。

以在长、短时间数据两种情况下,信杂比均显著提高的目标3为例,利用现场AIS数据进行验证。地波雷达检测到船只目标3的径向速度为26km/h(约14kn),方位为22.2°。同步(2011年7月7日15时57分)AIS数据表明,在该探测区域以此径向航速航行的船只AIS信息如下:

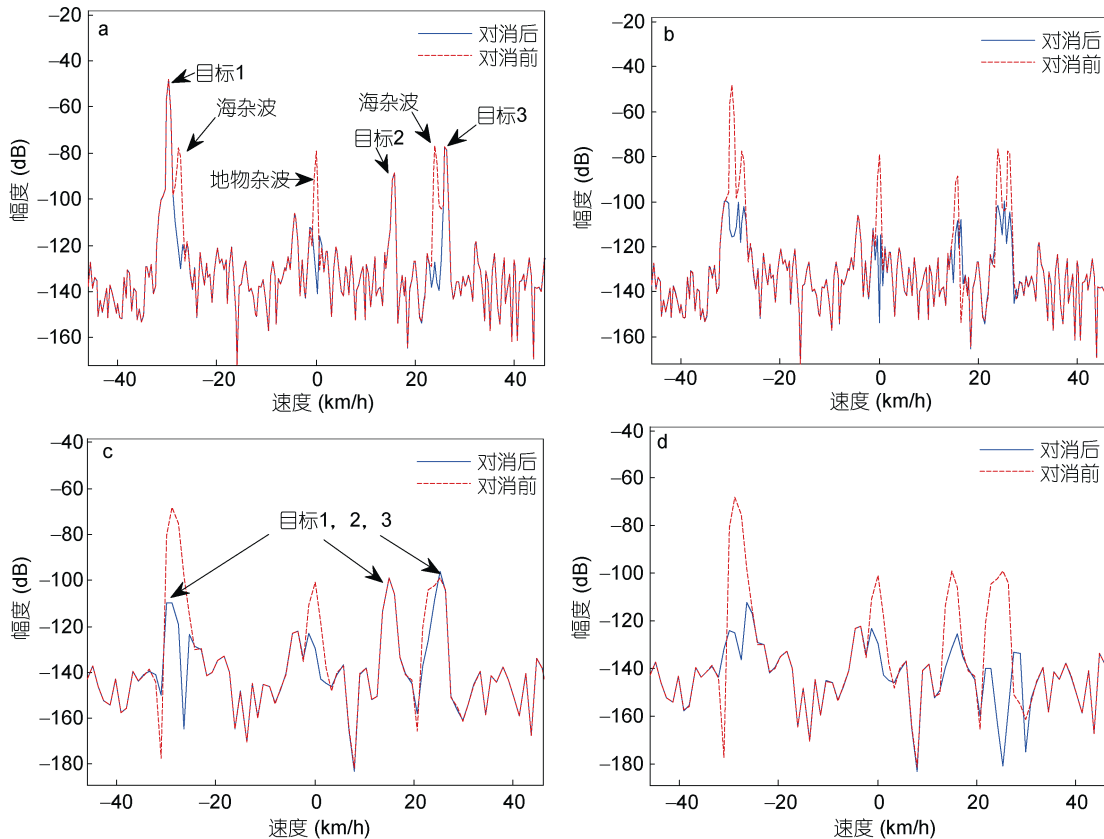


图3 海杂波对消速度谱。(a)边界约束的海杂波对消法(长时间数据);(b)传统相位对消法(长时间数据);(c)边界约束的海杂波对消法(短时间数据);(d)传统相位对消法(短时间数据)

Fig.3 The velocity spectrum after sea clutter cancellation

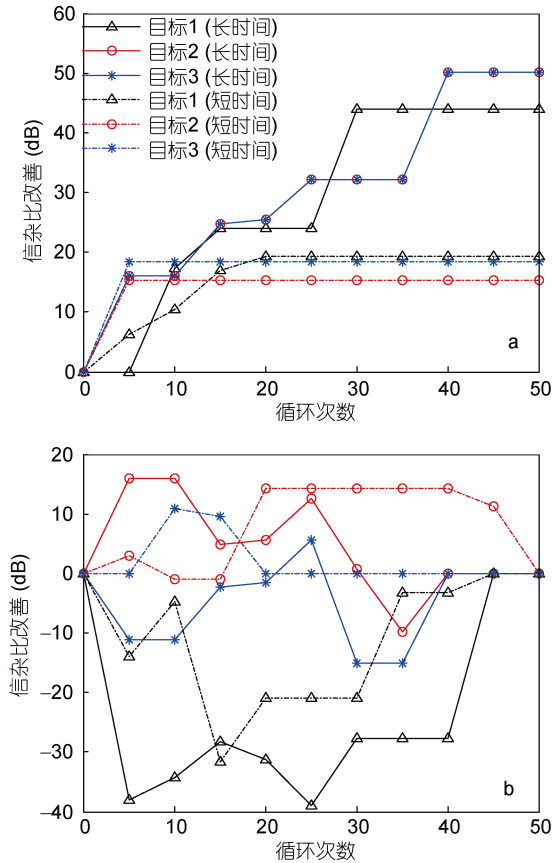


图 4 不同对消次数下的信杂比改善(a)边界约束的海杂波对消法(b)传统相位对消法
Fig.4 The improvement of signal-to-clutter ratio under different cancellation iterations

表 1 获取的同步船只 AIS 信息
Tab.1 Synchronous ship messages from AIS data

AIS 字段	字段值
MMSI	412900000
船名	LONGXINGDAO
经度	121.612°
纬度	38.22°
航速	17.6kn
航向	152.7°

由 AIS 信息可知, 该船名为 LONG XING DAO, 即 2011 年 1 月投入的大连-烟台航线运营的“龙兴岛”号客运滚装船(见图 5)。该船长 167.5m, 宽 25.2m, 总吨位 23kt, 最大服务航速 19kn, 额定载客 1400 人。在地波雷达探测期间, 该船正由大连驶往烟台。将 AIS 信息转换到地波雷达坐标后, 距离雷达实验站点约 87km, 径向速度约 13.6kn, 方位为 22°。因此, 该船在时间、空间及速度上都与地波雷达数据结果相一致; 另外, 该船是航线固定、信息可追溯的客运船,

可信度高。所以, 可以确定“龙兴岛”号为地波雷达探测到的目标船只。



图 5 靠港中的龙兴岛号
Fig.5 Picture of the ship LONG XING DAO

5 结论

本文将海杂波理论和特性归纳为边界条件, 约束建模对消过程, 提出了一种适用于地波雷达船只目标检测的海杂波循环对消方法。通过对长时间及短时间实测数据两种情况下的处理分析和不同对消参数时信杂比改善的对比, 结合 AIS 信息验证, 表明该方法

- (1)解决了目标回波参数与海杂波相近时, 目标与海杂波难以区分的问题, 避免了目标信号被误消除的情况。
- (2)明显改善了目标信杂比, 海杂波对消效果更加稳定有效。

随着对海杂波特性理解的深入, 可进一步研究将其添加到约束条件的方式, 提高本文方法在更加复杂海洋环境中的实用性。

参 考 文 献

纪永刚, 张 杰, 王祎鸣, 2014. 双频地波雷达船只目标点迹关联与融合处理. 系统工程与电子技术, 36(2): 266—271
 胡 松, 柯亨玉, 文必洋等, 2003. 高频地波雷达下的多目标跟踪数据处理. 武汉大学学报(理学版), 49(3): 391—395
 吴雄斌, 李 伦, 李 炎等, 2012. 高频地波雷达海面有效波高探测实验研究. 海洋与湖沼, 43(2): 210—216
 钱文振, 纪永刚, 王祎鸣等, 2013. 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. 海洋科学进展, 2013(1): 138—144
 郭 欣, 倪晋麟, 刘国岁, 2004. 短相干积累条件下天波超视距雷达的舰船检测. 电子与信息学报, 26(4): 613—618
 Abramovich Y, Ellard R M, Lyudviga Y *et al*, 2006. Surface wave radar: US Patent 7145503. 2006-12-5
 Crombie D, 1955. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc./s. Nature, 175: 681—682
 Dobson C, Hostenstein K, Smith M *et al*, 2013. Monostatic vessel

- detection statistics from the CODAR SeaSonde. Oceans, San Diego, USA, September 23—27, 2013, 1—4
- Dzvonkovskaya A, Rohling H, 2010. HF radar performance analysis based on AIS ship information. IEEE Radar Conference, Washington DC, USA, May 10—14, 2010, 1239—1244
- Gurgel K W, Dzvonkovskaya A, Pohlmann T *et al*, 2011. Simulation and detection of tsunami signatures in ocean surface currents measured by HF radar. *Ocean Dynamics*, 61(10): 1495—1507
- Khan R, 1991. Ocean-clutter model for high frequency radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 16(2): 181—188
- Liu Y T, Xu R Q, Zhang N, 2003. Progress in HFSWR research at Harbin Institute of Technology. International Radar Conference, Australia, September 3—5, 2003, 522—528
- Ponsford A M, D'Souza I A, Kirubarajan T, 2009. Surveillance of the 200 nautical mile EEZ using HFSWR in association with a spaced-based AIS interceptor. IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, Boston, USA, May 11—12, 2009, 87—92
- Root B T, 1998. HF radar ship detection through clutter cancellation. IEEE National Radar Conference, Dallas, USA, May 11—14, 1998, 281—286

BOUNDARY-CONSTRAINED SEA CLUTTER CIRCULATION CANCELLATION BY HIGH-FREQUENCY SURFACE WAVE RADAR

WANG Yi-Ming^{1,2}, MAO Xing-Peng², ZHANG Jie¹, JI Yong-Gang¹, CHU Xiao-Liang¹

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;*

2. *Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract In monitoring and surveillance of the sea surface with high-frequency surface wave radar (HFSWR), ship detection ability is closely related to the effective suppression of sea clutter. However, traditional sea clutter cancellation methods have problems of either incorrect removal when amplitude of ship-reflected signals is stronger than those of sea clutters, or difficult to distinguish them when the returned signal parameters are similar. To solve those problems, we proposed a boundary-constrained sea-clutter circulation cancellation algorithm for HFSWR. This method utilizes the theory of the sea clutter Doppler frequency shift and characteristics of sea clutter in practical radar detection. Through the strategy of boundary condition, the modeling signals for sea clutter circulation cancellation process were constrained. The proposed method was verified by measured HFSWR data and synchronous AIS (Automatic Identification System). The result shows that it is a more effective sea clutter suppression method and it can overcome the deficiency of the traditional method and increase the stable signal-to-clutter ratio.

Key words sea clutter; HFSWR; ship detection; circulation cancellation