

极化 X 波段雷达海面溢油微波散射模型研究

赵振华¹, 赵宜楠^{1,2,3}, 周志权^{1,2,3}, 赵占锋^{1,2,3}, 王晨旭^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 信息与电气工程学院, 山东 威海 264209; 2. 山东船舶技术研究院, 山东 威海 264209; 3. 海洋通信与组网观测技术威海市重点实验室, 山东 威海 264209)

摘要: 为研究溢油对海面电磁散射的影响, 作者根据海面复合微波散射模型理论和蒙特卡洛统计模型理论, 通过引入单分子油膜的黏性阻尼, 对粗糙的溢油海面进行建模, 定量分析溢油对海浪谱和海面后向散射系数两个方面的影响。为实现基于 X 波段雷达海面溢油检测提供理论支撑, 有助于解决溢油检测中的虚警率高的问题。

关键词: 海面溢油; 蒙特卡洛模型; 复合微波散射模型

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)01-0128-06

DOI: 10.11759/hyxx20171011016

海洋是人类的摇篮, 其面积约占地球面积的 2/3, 并且蕴藏着丰富的资源, 例如生物资源、矿产资源、石油、天然气等能源。但随着对海洋资源的开发以及世界航运业的大发展, 海洋污染日趋严重, 溢油事故的发生屡见不鲜^[1-2], 海上石油污染给海洋生态平衡带来严重威胁。

目前对溢油的研究大都集中在对数据的处理上, 而对于溢油的微波散射原理的研究较少, 对溢油的微波散射原理进行深入研究有利于开展快速高效的溢油检测手段, 对于海上溢油污染处理和海洋生态环境的尽快恢复具有重要意义^[3]。

1 海面复合微波散射模型

对于单站雷达系统, 如果雷达去照射光滑平静的海面, 则会产生镜面反射效应, 几乎没有回波信号会经海面反射回接收器, 在雷达图像上就会显示出一个暗区域, 但是若海面较为粗糙, 通常这种粗糙的海面是由于毛细波(张力波)和重力波组成, 此时雷达的微波信号照射海面之后将会产生各个方向的散射, 形成散射场。其中一部分微波信号会沿原路径返回收发装置, 这部分散射即为后向散射分量, 此时的微波散射系数即为单站雷达系统的微波后向散射系数。

对于粗糙的海面来说, 海浪的形式主要有两种: 一种是大尺度海浪, 其海面平均曲率半径远大于波长。第二种是小尺度毛细波, 其海面均方根高度远小于波长, 且均方根斜率较小。真实海浪的形式就是小

尺度叠加在大尺度波浪上, 同时大尺度波对小尺度波有调制作用, 这种模型就叫做复合微波散射模型。对大尺度海浪的微波散射建模用几何光学模型, 其后向系数的求解用基尔霍夫近似法。对小尺度波浪的微波散射的建模用小扰动模型, 其后向散射系数的求解我们用微扰法, 求解的过程中需要考虑大尺度波对小尺度波的调制作用, 可以对大尺度波做起伏统计平均处理。

微波的垂直或水平极化方式, θ_i 为电海面的复合微波后向散射系数 $\sigma(\theta_i)$ 表示为:

$$\sigma(\theta_i) = \sigma_{mn}^0(\theta_i) + \sigma_{mn}^1(\theta_i) \quad (1)$$

式中, $\sigma_{mn}^0(\theta_i)$ 和 $\sigma_{mn}^1(\theta_i)$ 分别为几何光学模型得到的大尺度重力波的后向散射系数和小扰动模型得到的小尺度毛细波的后向散射系数。其中, m 、 n 代表 v 或者 h , 表示磁波入射角度。

几何光学散射模型^[4]后向散射系数表示如下:

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-20

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0921); 威海市科技发展规划项目(2015DXGJZD003, 2015DXGJMS016); 哈尔滨工业大学研究生教育教学改革研究项目(JGYJ-2017050); 山东省自然科学基金项目(ZR2014FM023)

[Foundation: Major Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province of China, No.2017CXGC0921; Science and Technology Development Plan Project of Weihai, No.2015DXGJZD003, 2015DXGJMS016; Research Project of Postgraduate Education and Teaching Reform in Harbin Institute of Technology, No.JGYJ-2017050; NSF Project of Shandong Province, No.ZR2014FM023]

作者简介: 赵振华(1992-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事 X 波段雷达海态参数获取与海面溢油监测研究, E-mail: hit_zhua@163.com

$$\sigma_{mn}^0(\theta_i) = \frac{\pi}{\cos^4(\theta_i)} \times |R_{mn}|^2 W(\zeta_x, \zeta_y) \quad (2)$$

其中, R_{mn} 为不同极化状态下的菲涅尔反射系数, Ulaby^[5]分别给出了垂直极化与水平极化状态下的菲涅尔反射系数, 表达式为:

$$R_{vv}(\theta) = \frac{-\varepsilon_2 \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta}}{\varepsilon_2 \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

$$R_{hh}(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

$W(\zeta_x, \zeta_y)$ 为大尺度波浪下的海面斜率的联合概率密度函数, ζ_x 、 ζ_y 分别为逆风向和侧风向的海面斜率。海面斜率的分布采用 Gram-Charlier 分布来描述, 其表示为公式(5):

$$W(\zeta_x, \zeta_y) = \frac{1}{2\pi S_x S_y} \times F(\zeta_x, \zeta_y) \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta_x^2}{S_x^2} + \frac{\zeta_y^2}{S_y^2}\right)\right] \quad (5)$$

其中, S_x 、 S_y 分别为海面顺风向和测风向海面斜率的方差。由经验公式得到:

$$S_x^2 = 0.005 + 0.78 \times 10^{-3} U_{10} \quad (6)$$

$$S_y^2 = 0.003 + 0.84 \times 10^{-3} U_{10} \quad (7)$$

其中, U_{10} 为海上 10 m 处的风速。

$F(\zeta_x, \zeta_y)$ 的表达式为:

$$F(\zeta_x, \zeta_y) = 1 - \frac{1}{2} D_{21} \left(\frac{\zeta_y^2}{S_y^2} - 1 \right) \frac{\zeta_x}{S_x} + \frac{1}{24} D_{40} \left(\frac{\zeta_x^4}{S_x^4} - 6 \frac{\zeta_y^2}{S_y^2} + 3 \right) + \frac{1}{4} D_{22} \left(\frac{\zeta_y^2}{S_y^2} - 1 \right) \left(\frac{\zeta_x^2}{S_x^2} - 1 \right) + \frac{1}{24} D_{04} \left(\frac{\zeta_x^4}{S_x^4} - 6 \frac{\zeta_x^2}{S_x^2} + 3 \right) - \frac{1}{6} D_{03} \left(\frac{\zeta_x^3}{S_x^3} - 3 \frac{\zeta_x}{S_x} \right) \quad (8)$$

其中, 参数,

$$\begin{aligned} D_{03} &= (0.04 - 0.034U_{10}) \pm 0.12 \\ D_{21} &= (0.01 - 0.0088U_{10}) \pm 0.03 \\ D_{04} &= 0.23 \pm 0.41 \\ D_{22} &= 0.23 \pm 0.41 \\ D_{40} &= 0.40 \pm 0.23 \end{aligned} \quad (9)$$

小尺度波浪的微波散射系数是利用一阶小扰动近似方法求的, 后向散射系数如公式(10)和公式(11)所示:

$$\sigma_{mn}^1(\theta_i) = 8|k^2 \sigma_1 \cos \theta \cos \theta_s \alpha_{mn}|^2 W(k_x, k_y) + 4\pi |R_{vv}|^2 \delta(\theta_s - \theta_i) \delta(\phi_s - \phi_i) \quad (10)$$

$$W(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(u, v) \times \exp(-jk_x u - jk_y v) dudv \quad (11)$$

其中, $\rho(u, v)$ 为海表面相关函数, 对于后向散射, 其散射系数表示如公式(12)所示:

$$\sigma_{mn}^1(\theta_i) = 8k^4 \sigma_1^2 \cos^4 \theta |\alpha_{mn}|^2 W(2k \sin \theta, 0) + 4\pi |R_{mn}|^2 \delta(2k \sin \theta) \quad (12)$$

α_{mn} 为一阶极化系数:

$$\alpha_{hh} = \frac{\varepsilon - 1}{\left(\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i}\right)^2} \quad (13)$$

$$\alpha_{vv} = \frac{(\varepsilon - 1) \left[\varepsilon (1 + \sin^2 \theta_i) - \sin^2 \theta_i \right]}{\left(\varepsilon \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i}\right)^2} \quad (14)$$

其中, $2k \sin \theta$ 为 Bragg 波数。对于波数为 k 的雷达电磁波, 改变入射角可改变 Bragg 波数, 即探测到不同尺寸的海面波, ε 为海水的介电常数。

为解决大尺度波浪对小尺度波的影响, 小扰动的解要对大尺度做平均处理, 求平均后向散射系数如公式(15)所示:

$$\sigma_{mn}^1(\theta_i) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left\{ \sigma_{mn}^0(\theta'_i) \Big|_{\theta_n = \tan^{-1}(l)} + \sigma_{mn}^0(\theta'_i) \Big|_{\theta_n = -\tan^{-1}(l)} \right\} d\phi_n \quad (15)$$

其中, m, n 代表雷达的垂直或者水平极化形式, θ_i 为电磁波入射角, k_i 为入射电磁波的波数, ε_r 为粗糙海面的相对介电常数, l 为海面均方根斜率, θ_n 和 ϕ_n 分别为大尺度波镜面法矢量的方位角和倾斜角度。

2 粗糙海面模型研究

2.1 PM 海浪谱

PM 谱是由 Pierson 和 Moskowitz 在分析了北大西洋充分成长性海浪的一系列资料后, 通过估计、拟合, 获取的一种半经验理论模型, 适用于充分成长性海浪, 如公式(16)所示:

$$S(k) = \frac{\alpha}{4|k|^3} \exp\left(-\frac{\beta g^2}{k^2 U_{19.5}^4}\right) \quad (16)$$

其中, $\alpha = 0.0081$, $\beta = 0.74$, 都是常数。 $U_{19.5}$ 表示海上 19.5 m 处的海面风速。我们看到, PM 谱只与海上 19.5 m 处的风速有关。

图 1 为 PM 谱仿真图, 当风速较小时, PM 谱的能量比较分散, 此时海浪主要成分是小尺度张力波。当风速逐渐增大, 波谱的峰值向低频移动且能量更加集中, 此时海浪主要是以大尺度重力波为主, 也进一步说明 PM 谱能更好地描述大尺度波浪。

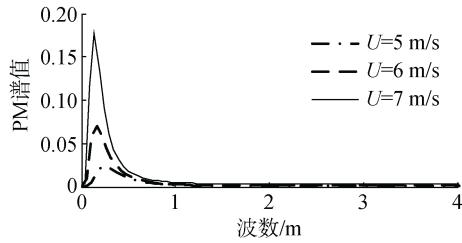


图 1 PM 海浪谱
Fig. 1 PM wave spectrum

2.2 Elfouhaily 海浪谱

1997 年, Elfouhaily 等^[6]在 PM 谱和 JW 谱的基础上结合实验数据提出了一种新的海浪谱, 称之为 Elfouhaily 海浪谱, 它适用长波和短波海况, 能更好地描述真实的海浪, 其表达式如公式(17)所示:

$$S(k) = k^{-3} [B_l + B_h] \quad (17)$$

式中, B_l 和 B_h 分别代表长波海浪和短波海浪谱。

长波海浪谱 B_l 为:

$$B_l = \frac{1}{2} \alpha_p \frac{c_p}{c} F_p \quad (18)$$

α_p 为 Phillips 长波浪的平衡范围参数, 取决于无量纲的波龄参数 Ω 。 $c_p = c(k_p)$ 谱峰值处的相速度, c 是波向速度。

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \left(1 + \frac{k^2}{k_m^2} \right)} \quad (19)$$

F_p 取决于无量纲的参数 k/k_p 和 Ω :

$$F_p = L_{PM} J_p \exp \left\{ -\frac{\Omega}{\sqrt{10}} \left[\sqrt{\frac{k}{k_p}} - 1 \right] \right\} \quad (20)$$

J_p 为海浪谱的峰升因子:

$$J_p = \gamma^\Gamma \quad (21)$$

$$\Gamma = \exp \left(\frac{\left(\sqrt{\frac{k}{k_p}} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (22)$$

$$\sigma = 0.08[1 + 4\Omega^{-3}] \quad (23)$$

$$k_p = k_0 \Omega^2, k_0 = g/U_{10}^2 \quad (24)$$

短波海浪谱 B_h 为:

$$B_h = \frac{1}{2} \alpha_m \frac{c_m}{c} F_m \quad (25)$$

式中, α_m 是取决于无量纲参数 (u^*/c_m) , u^* 是海面的摩擦风速, c 是短波的相速度, 最小相速度 $c_m = \sqrt{2g/k_m}$ 。

F_m 是短波的副方程:

$$F_m = \exp \left\{ -\frac{1}{4} \left[\frac{k}{k_m} - 1 \right]^2 \right\} \quad (26)$$

$$\alpha_m = 0.01 \begin{cases} 1 + \ln(u^*/c_m) & u^* < c_m \\ 1 + 3 \ln(u^*/c_m) & u^* > c_m \end{cases} \quad (27)$$

仿真中, 认为海面是完全发展的, 波龄 Ω 设为 0.84。

图 2 为不同风速下的 Elfouhaily 海浪谱。可以看出, 风速增大时, 谱能量的峰值增大且峰值向低频区移动, 对应着海浪的波长变大, 重力波的作用越来越大。无论风速怎样变化, 谱能量的分布都比较均匀, 说明 Elfouhaily 谱既能够准确描述大尺度波浪, 也能够准确描述对海面微波散射其主要作用的小尺度的毛细张力波。

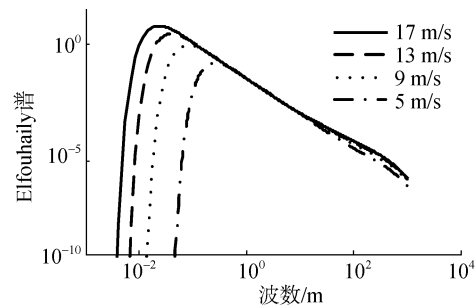


图 2 Elfouhaily 海浪谱
Fig. 2 Elfouhaily wave spectrum

2.3 蒙特卡洛统计模型

真实海面的变化情况具有很多的不确定性, 海面是不规则的, 这种不规则的随机粗糙海面可看作是由相互独立的谐波叠加起来的结果, 由随机函数来表示, 其中蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)粗糙海面模拟的方法应用最为广泛。

用蒙特卡罗方法^[7]来模拟粗糙海面的主要思想就是采用相互独立、具有高斯分布、零均值等条件

的复随机数来对随机粗糙海面进行模拟。先进行频域内的功率谱滤波, 然后再用逆傅里叶变换生成粗糙面的。

长度为 L 的一维随机粗糙海面:

$$f(x_n) = \frac{1}{L} \sum_{j=-N/2}^{N/2-1} F(k_j) e^{ik_j x_n} \quad (28)$$

式中, $k_j = 2\pi j/L$, $f(x_n)$ 为随机粗糙海面的高度起伏函数。 $f(x_n)$ 为 $F(k_j)$ 的逆傅里叶变换。

$$F(k_j) = \left[2\pi L S(k_j) \right]^{1/2} \times \begin{cases} [N(0,1) + iN(0,1)] / \sqrt{2}, & j \neq 0, N/2 \\ N(0,1), & j = 0, N/2 \end{cases} \quad (29)$$

式中, $S(k_j)$ 为粗糙海面的海浪谱函数。 $N(0,1)$ 表示的是满足均值为 0、方差为 1 的相互独立的高斯分布取样点。

图 3 利用蒙特卡洛统计模型模拟的清洁粗糙海面, 图中对比分析了 PM 谱下不同风速的海面粗糙度, 当风速越大时由蒙特卡洛方法模拟的粗糙海面起伏波动越大, 相对于风速较低时变得剧烈, 这与实际情况是相符合的, 风速越大海面越粗糙。

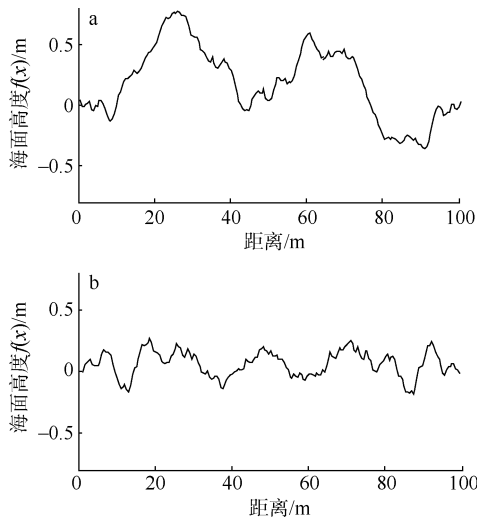


图 3 不同风速下清洁海面的粗糙度

Fig. 3 Roughness of clean sea surface at different wind speeds
a. 风速为 15m/s 时海面粗糙度; b. 风速为 8m/s 时海面粗糙度
a. Sea surface roughness at wind speed of 15 m/s; b. sea surface roughness at wind speed of 8 m/s

3 溢油海面模型

前面分析了粗糙海面海浪谱的特征和海面的微波散射模型, 并对清洁海面的粗糙度做了仿真研

究。本节将引入溢油衰减模型对清洁海浪谱进行修正得到溢油海浪谱, 用复合微波散射模型和蒙特卡洛统计模型对溢油海面建模, 对比分析溢油对海浪谱和海面后向散射系数值的影响。

3.1 溢油海浪谱

研究溢油海浪谱需要引入 Lombardini 溢油衰减系数^[8]。Lombardini 建立了海面中带有油膜的海浪谱模型, 实现了从清洁海面到溢油海面的转化, 其表达式为:

$$y(k; E_0, \omega_D) = \frac{1 + 2\tau + 2\tau^2 - X + Y(X + \tau)}{1 + 2\tau + 2\tau^2 - 2X + 2X^2} \quad (30)$$

$$\tau = \left(\frac{\omega_D}{2\omega} \right)^{1/2}$$

$$X = \frac{E_0 k^2}{\rho(2\nu\omega^3)^{1/2}}$$

$$Y = \frac{E_0 k}{4\nu\rho\omega} \quad (31)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{(\zeta k^3 / \rho + gk)^{1/2}}{2\pi}$$

式中, E_0 是弹性模量(N/m)、 ρ 是海水密度(kg/m³)、 ν 是运动黏度系数(m²/s²)、 ζ 是表面张力(N/m)、 g 是重力加速度、 k 是波数、 ω_D 是油膜的特征频率。其中“+”是可溶膜, “-”是不溶膜。

溢油海浪谱和清洁海浪谱之间的关系可以用下面的关系式表示:

$$S_{cont}(k; u_{10}, E_0, \omega_D) = \frac{S_{clean}(k; u_{10}, \phi)}{y(k; E_0, \omega_D)} \quad (32)$$

由公式(32)可看出溢油海浪谱取决于波数、风速、电磁波入射角、油膜的物理参数。

图 4 给出了 Elfouhaily 海浪谱下清洁和溢油海面的海浪谱对比结果。具体参数为: 风速为 5 m/s、波龄为 0.84、溢油特征角频率 11 rad/s、表面张力

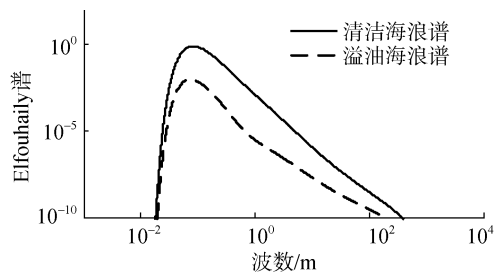


图 4 清洁和溢油 Elfouhaily 海浪谱

Fig. 4 Clean and spilled Elfouhaily wave spectrum

$74 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 、油膜密度为 10^3 kg/m^3 、弹性模量为 25 N/m 、运动黏度系数 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。横坐标为波数，纵坐标为海浪谱的幅值。溢油下的海浪谱的幅值有明显的减小，这个效果跟仿真时所设置的参数有关，但是总体来说溢油下的海浪谱的幅值是减小的，溢油下的海浪谱被抑制。

图 5 利用蒙特卡洛统计模型分别对清洁和溢油海面做了粗糙度对比分析，更直观地对比了清洁和溢油海面的粗糙度之间的差别。横坐标为海面各个点距离原点的距离，纵坐标表示为对应距离的海面高度。通过对比分析图 5a、5b 发现溢油海面下的海浪的波峰有明显的下降，原因是溢油的发生抑制了海面的毛细重力波使海面粗糙度降低。

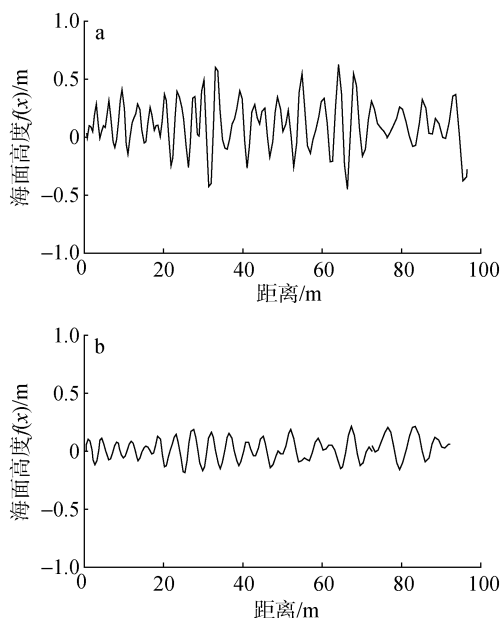


图 5 清洁和溢油海面粗糙度对比

Fig. 5 Comparison of surface roughness between oil-free and oil-spilled sea surface

a. 清洁海面的粗糙度; b. 溢油海面的粗糙度

a. Roughness of clean sea surface; b. Roughness of oil spill surface

3.2 溢油海面后向散射系数计算

图 6 为清洁海面下几何光学散射模型和复合散射模型下后向散射系数仿真图。在入射角度较小时，主要是几何光学模型在对后向散射系数做贡献，系数衰减很快，当电磁波入射角度接近 20° 的时候后向散射系数已经衰减到接近 -30dB ，在 20° 之后随着小扰动模型对后向散射系数的贡献，复合散射模型能更好的模拟海面散射特性。

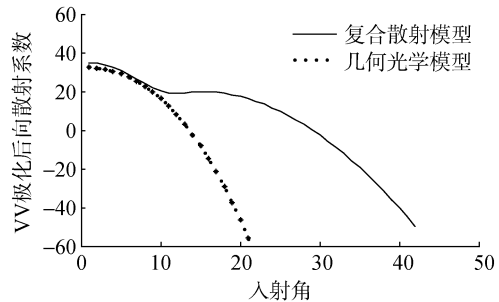


图 6 X 波段 VV 极化下微波散射系数

Fig. 6 Microwave scattering coefficient under X-band VV polarization

图 7 利用复合散射模型对溢油海面和清洁海面的后向散射系数做对比分析。可以看出，溢油海面的后向散射系数被明显地抑制，油膜对海面起到了平滑的作用，使海面的粗糙度降低，导致溢油海面所对应的微波散射系数的值降低，X 波段雷达在成像时图像上就会出现一片暗区域。

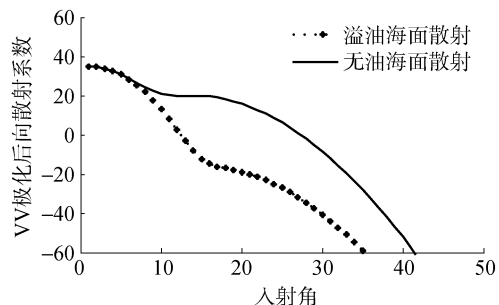


图 7 无油和溢油海面微波散射系数对比

Fig. 7 Comparison of microwave scattering coefficient between oil-free and oil-spilled sea surface

基于 X 波段雷达的溢油的检测时，只凭借暗区域来检测溢油会造成虚警率高的问题，也就是有疑似溢油，这时可以再结合油膜的极化特性，或者其环境特征结合溢油检测算法来准确的检测溢油。

4 总结

海面溢油微波散射模型的研究是掌握溢油微波散射特性的理论基础，对基于极化 X 波段雷达溢油信息的提取和识别具有重要的作用和意义。作者通过引入单分子油膜的黏性阻尼系数对经典的海浪谱进行修正，获得溢油海浪谱。通过运用海面的复合散射模型和蒙特卡洛统计模型理论，模拟了溢油海面的后向散射系数和海面粗糙度，定量地分析了油膜对海浪谱和后向散射系数值的影响，为基于 X 波段

雷达溢油检测提供理论数值资料。在今后的研究中需加强溢油微波散射模型的理论性探索,同时利用室内陆基等微波散射测量装置在多种海况下用实测数据完善和修正散射模型,进而提高模型的精确度和适用性。

参考文献:

- [1] 胡雪春. 海上船舶溢油风险综合评价指标体系研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
Hu Xuechun. Comprehensive evaluation index system for oil spill risk at sea[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [2] 张永宁, 丁倩, 李栖筠. 海上溢油污染遥感监测的研究. 大连海事大学学报. 1999, 25(3): 1-5.
Zhang Yongning, Ding Qian, Li Qiyun. Remote sensing monitoring of oil spill pollution at sea[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1993, 25(3): 1-5.
- [3] 张灯洲, 陈志莉, 胡潭窝, 等. 遥感技术监测海上溢油现状及趋势[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2013, 1: 81-88.
Zhang Dengzhou, Chen Zhili, Hu Tanwo, et al. Monitoring the present situation and trend of oil spill at sea by remote sensing technology[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2013, 1: 81-88.
- [4] Ghanmi H, Khenchaf A, Comblet F. Numerical modeling of electromagnetic scattering from sea surface covered by oil[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2014, 6(1): 15-24.
- [5] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing: active and passive[M]. USA, Dedham: Artech House Inc, 1986, 22(5): 1223-1227.
- [6] Elfouhaily T, Chapron B. A unified directional spectrum for long and short wind-driven wave waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(C7): 15781-15796.
- [7] 梁玉. 粗糙面及其与目标复合电磁散射建模及快速计算研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Liang Yu. Modeling and fast calculation of rough surface and its composite electromagnetic scattering with target[D]. Xian: Xian University, 2011.
- [8] Baba-Aissa F, Raeymaekers L. Modulation of the spectra of short gravity waves by sea surface films: Slick detection and characterization with a microwave probe[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1989, 6(6): 882-890.

Development of microwave scattering model for sea-surface oil spills based on polarimetric X-band radar data

ZHAO Zhen-hua¹, ZHAO Yi-nan^{1, 2, 3}, ZHOU Zhi-quan^{1, 2, 3}, ZHAO Zhan-feng^{1, 2, 3}, WANG Chen-xu^{1, 2, 3}

(1. Information and Electrical School, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China; 2. Shandong Institute of Shipbuilding Technology, Weihai 264209, China; 3. Weihai City Key Laboratory of Ocean Communication and Networking Observation Technology, Weihai 264209, China)

Received: Oct. 11, 2017

Key words: Sea-surface oil spill; Monte Carlo model; composite microwave scattering model

Abstract: In this paper, we mainly consider the effects of oil spills on sea-surface scattering, based on the theories of the composite microwave scattering and Monte Carlo statistical models. We introduce the viscous damping of single-molecule oil film, model the rough oil-spilled sea surface, and quantitatively analyze the influence of oil spill on two aspects of the ocean wave spectrum and the sea surface backscattering coefficient. Our findings provide theoretical support for the detection of spilled oil at sea level by X-band radar, which can be used to reduce the high false alarm rate in oil spill detection.

(本文编辑: 谭雪静)