

油膜覆盖的非线性海面电磁散射多普勒谱特性研究

王蕊 郭立新 张策

Doppler spectrum simulation of nonlinear ocean covered by oil film

Wang Rui Guo Li-Xin Zhang Ce

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 224102 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180184

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180184>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于人工表面等离激元的双通带频率选择结构设计](#)

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton  
物理学报.2018, 67(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

[基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制](#)

Dynamic beam-steering in wide angle range based on tunable graphene metasurface  
物理学报.2018, 67(18): 184101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180592>

[高温等离子体中太赫兹波的传输特性](#)

Transmission characteristics of terahertz wave in high temperature plasma  
物理学报.2018, 67(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180647>

[高对比度目标的电磁逆散射超分辨成像](#)

Super-resolution imaging of high-contrast target in electromagnetic inverse scattering  
物理学报.2018, 67(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180266>

[基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像](#)

Far-field super-resolution imaging based on wideband stereo-metalens  
物理学报.2018, 67(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172608>

# 油膜覆盖的非线性海面电磁散射多普勒谱特性研究\*

王蕊 郭立新<sup>†</sup> 张策

(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2018年1月25日收到; 2018年9月27日收到修改稿)

当海面上方漂浮油膜时, 海面的毛细波成分将因油膜的阻尼作用而被破坏. 本文采用PM谱, 基于Marangoni阻尼效应, 建立油膜覆盖的一维Creamer非线性海面模型, 并简单分析了油膜的阻尼作用对海面轮廓的影响. 在此基础上, 利用迭代物理光学方法研究了L波段下该模型的后向散射回波的多普勒谱特性, 通过与基于线性模型的海面散射回波多普勒谱对比发现, 在大中入射角下, 非线性海面散射回波与线性海面多普勒谱的差异不可忽略, 说明采用Creamer非线性理论建立海面几何模型的必要性. 研究发现, 油膜覆盖海面的散射回波的多普勒频移及展宽与干净海面雷达回波的多普勒特性具有明显差异, 这表明海面上漂浮的油膜对雷达散射回波的多普勒特性具有显著的影响. 数值结果重点分析了入射角、油膜参数以及风速对油膜覆盖海面散射回波多普勒谱展宽和频移的影响规律.

**关键词:** 油膜, 非线性海面, 多普勒谱

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.25.Dd

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180184

## 1 引言

实际的海洋表面是一个时刻动态变化的复杂环境, 其上漂浮着不同起源的油膜<sup>[1,2]</sup>, 包括人工来源, 如人类在石油开采、运输过程中的溢油事故所产生的海面浮油, 以及由海洋生物活动所产的有机天然油膜来源. 海洋环境的复杂性以及油膜种类的多样性决定了海洋油膜污染的监测以及油膜种类辨别是一项具有很大挑战性的工作. 目前, 大量的海面雷达后向回波测量实验证实, 海面油膜对雷达回波的后向散射系数具有明显的影响. 但海面雷达回波的平均散射系数只能反映雷达回波强度的均值分布水平, 而实际的海洋环境时刻处于复杂多变的运动之中, 因而雷达回波的多普勒谱是一个更加精确和有效的监测波浪运动的工具. 国外多普勒雷达海面回波实验<sup>[3-5]</sup>结果证实, 有油膜覆盖的海面

其散射回波的多普勒频移与干净海面散射回波的多普勒频移具有明显差异, 这说明海面上覆盖有油膜时对雷达散射回波的多普勒特性具有显著的影响. 海面散射回波的多普勒特性在探测油膜方面的优势预示着多普勒雷达在监测及分辨不同种类油膜方面具有潜在的应用价值. 这启发我们可以从油膜与海面相互作用的电磁散射机理角度出发, 借助仿真算法, 去研究油污海面的多普勒特性, 为利用雷达回波多普勒特性进行海洋油膜探测提供一定的物理理论基础.

近年来, 国内外学者开始关注有油膜覆盖的海面电磁散射特性, 所涉及的电磁散射算法也主要分为高频近似<sup>[6,7]</sup>以及严格的数值算法<sup>[8,9]</sup>. 文献<sup>[10]</sup>将油膜覆盖的海面近似为单层粗糙面模型, 利用小斜率近似方法建立了海洋上方附着极薄生物膜的散射模型. 意大利学者Nunziata等<sup>[11]</sup>基于双尺度模型研究了单分子层油膜对海面雷达散射

\* 陕西省省基金(批准号: 2018JQ6045)、上海航天科技创新基金资助项目和国家自然科学基金重点项目(批准号: 61431010, 61701428)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: lxguo@xidian.edu.cn

系数的影响, 并与合成孔径雷达获得的实测数据进行了对比. 从电磁散射角度看, 有油膜覆盖的海面电磁仿真模型应该归结为分层粗糙海面散射模型. 法国学者 Pinel 等 [12,13] 基于考虑多次散射的近似电磁模型研究了油膜覆盖的线性海面电磁散射特性; Ghanmi 等 [14] 基于前后向迭代 (FBM) 研究了不同频段 (C, X, Ku) 下油膜覆盖海面的电磁散射建模. 以上学者大多针对线性海面进行仿真, 尽管线性海面在一定范围内可以较合理地描述海浪的运动规律, 但基于线性海面模型预测的海面电磁散射特性尤其是海面雷达回波的多普勒特性和实测数据存在较大差异 [15-17]. 为了更好地研究油膜覆盖海面的散射回波特性, 本文以 Creamer 非线性模型为基础, 研究油膜覆盖的一维非线性分层海面散射回波的多普勒谱特性. 油膜覆盖海面的电磁散射可归于分层粗糙面散射建模问题, 就分层粗糙面的电磁散射建模而言, 目前仍主要分为两大类方法: 一类方法为高频近似方法, 如基于广义反射系数的物理光学方法; 另一类为经典数值方法, 如矩量法、时域有限差分方法等. 迭代物理光学方法既弥补了传统高频算法计算精度低的缺陷又避免了经典数值算法计算效率低的弊端. 因此本文采用迭代物理光学法研究油膜覆盖的一维非线性分层海面散射回波的多普勒谱特性, 比较和分析了线性与非线性、干净海面与油膜覆盖海面的多普勒谱特征之间的差异. 与经典数值算法相比, 本文所采用的迭代物理光学方法计算效率较高, 与传统的高频方法相比, 精度又有所保障. 数值结果重点讨论了入射角、油膜参数以及海面风速对 Creamer 非线性海面的雷达散射回波多普勒谱展宽和频移的影响.

## 2 油膜覆盖的非线性海面几何建模

当海面上覆盖油膜时, 油膜的黏滞性会对海浪波产生阻尼作用, 尤其对于海浪波中的毛细波成分造成一定的破坏作用. Lombardini 等 [18,19] 对该阻尼作用进行了广泛的研究, 认为这是一种油膜引起的谐振类的阻尼作用, 该阻尼作用可用马朗戈尼 (Marangoni) 波和拉普拉斯波的耦合理论来解释. 根据该理论, 当油膜参数确定后, 可通过计算油膜阻尼率 [19], 结合现有的海面功率谱密度函数计算得到油膜覆盖海面时对应的功率谱密度函数.

本文模拟干净海面的功率谱密度函数采用 PM

海谱 [20], 具体表达式为

$$W_{cle}(K_j) = \begin{cases} \frac{\alpha}{4|K_j|^3} \exp\left(-\frac{\beta g^2}{K_j^2 U_{19.5}^4}\right) & K_j \geq 0, \\ 0 & K_j < 0, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\alpha = 8.10 \times 10^{-3}$ ,  $\beta = 0.74$ ,  $U_{19.5}$  为海面上方 19.5 m 高度处的风速,  $g$  为重力加速度,  $K_j = 2\pi j/L$ . 根据文献 [19] 的分析, 油膜覆盖海面的功率谱密度函数  $W_{con}(K_j)$  可表示为

$$W_{con}(K_j) = W_{cle}(K_j)/y_s(f, E_0, \omega_D), \quad (2)$$

其中油膜阻尼率  $y_s$  可表示为

$$y_s(f, E_0, \omega_D) = \frac{S_{clean}(k)}{S_{cont}(k; E_0, \omega_D)} = \frac{1 \pm 2\tau + 2\tau^2 - X + Y(X + \tau)}{1 \pm 2\tau + 2\tau^2 - 2X + 2X^2}, \quad (3)$$

其中

$$\tau = \left(\frac{\omega_D}{2\omega}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad X = \frac{E_0 k^2}{\rho(2\nu\omega^3)^{0.5}}, \quad Y = \frac{E_0 k}{4\rho\nu\omega}, \quad (4)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{(\varsigma k^3/\rho + gk)^{1/2}}{2\pi} \quad (5)$$

为色散关系. 在 (3) 式中“+”代表可溶解的油膜, 而“-”代表不可溶解的油膜. 本文的数值结果取“-”.  $g_0$  为重力加速度,  $\rho$  是海水密度,  $\nu = 10^{-6}$  m/s 为黏性系数,  $\varsigma = 74 \times 10^{-3}$  N/m 为表面张力,  $E_0$  为弹性模量,  $\omega_D$  依赖于分子力之间的结构弛豫.

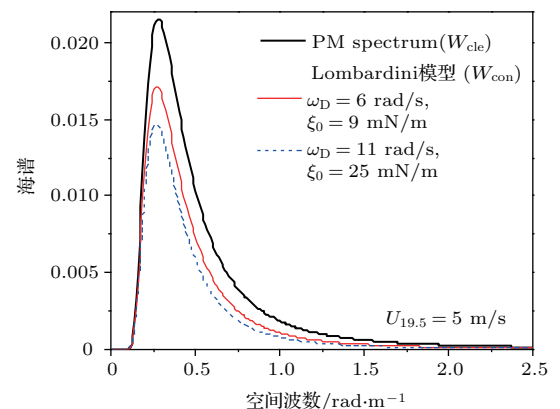


图1 干净海面与受污海面的海谱比较

Fig. 1. Comparison of the spectra between clean and contaminated ocean.

$$\delta = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} W_{\text{cle/con}}(K) dK \right. \\ \left. = 2 \int_0^{\infty} W_{\text{cle/con}}(K) dK \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$$\sigma_s = \left( \int_0^{\infty} K^2 W_{\text{cle/con}}(k) dk \right)^{1/2}. \quad (7)$$

从图2和图3可以清楚地看到, 当海面上方覆盖油膜时, 由于油膜的黏滞阻尼作用在一定程度上破坏了海浪波中的毛细波成分, 所以受污海面的均方根高度及斜率相较于干净海面(粗实线)均有所降低.

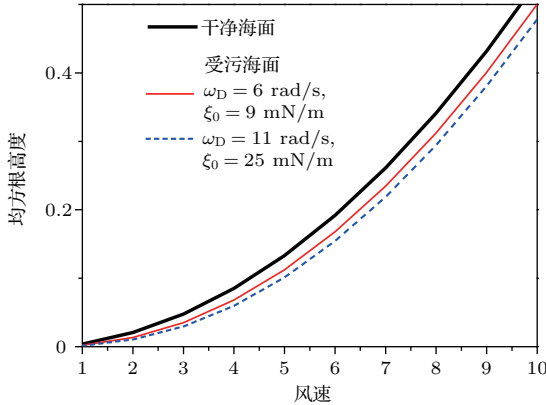


图2 干净海面与受污海面的均方根高度比较

Fig. 2. Root-mean-squared height of clean and contaminated ocean.

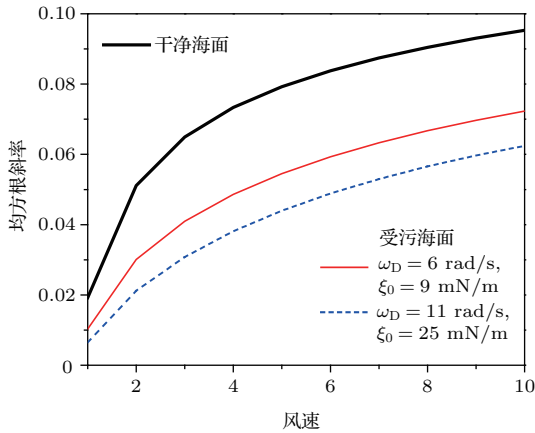


图3 不同风速下的海面均方根斜率

Fig. 3. Root-mean-squared slope of clean and contaminated ocean.

在得到油膜覆盖海面的海谱后, 简单介绍 Creamer 非线性时变海面建模方法. 线性海面生成中把海面高度起伏看作多个振幅为高斯分布的独立谐波叠加而成, 每个谐波的传播频率和空间波数满足以下色散关系:

$$\omega(K) = \{g_0 |K| [1 + (K/K_m)^2]\}^{1/2}, \quad (8)$$

$g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$  为重力加速度,  $K_m$  与海水张力  $T$  以及密度  $\rho$  有关,  $K_m = (\rho g_0 / T)^{0.5}$ . 线性海面可通过对(1)和(2)式进行逆傅里叶变换实现. 任意时刻  $t$  频域表示的傅里叶变换分量可以表示为

$$A(K, t) = \frac{2\pi}{\sqrt{2\Delta K}} \left[ r_n \cdot \sqrt{W(K)} e^{i\omega(K)t} \right. \\ \left. + r_{-n}^* \cdot \sqrt{W(-K)} e^{-i\omega(-K)t} \right], \quad (9)$$

这里  $W(K)$  即(1)和(2)式的海谱形式;  $r_n$  为符合标准正态分布的复高斯随机序列,  $r_{-n}^*$  为其逆序共轭;  $\Delta K = 2\pi/L$ ,  $L$  为海面长度. 对(9)式进行逆傅里叶变换可生成线性海面,

$$f(x, t) = \frac{1}{L} \sum_n A(K_n, t) e^{iK_n x}. \quad (10)$$

对(10)式得到的线性海浪进行希尔伯特变换<sup>[21]</sup>,

$$\tilde{f}_0(x', t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{f(x, t)}{x' - x} dx, \quad (11)$$

则 Creamer 非线性海浪频域表示的傅里叶变换分量可由下式得到:

$$A_N(K, t) \\ = \frac{1}{|K|} \int dx' e^{-iKx'} [e^{iK\tilde{f}_0(x', t)} - 1]. \quad (12)$$

对上式进行逆傅里叶变换即可得到非线性海面的高度起伏. 图4给出了风速为3 m/s时的一维 Creamer 非线性海面的几何轮廓, 共三条曲线, 其中粗实线表示基于  $W_{\text{cle}}(K_j)$  模拟的干净海面几何轮廓, 其他两条曲线表示基于  $W_{\text{con}}(K_j)$  模拟的油膜覆盖海面的几何轮廓. 从海面几何轮廓对比结果

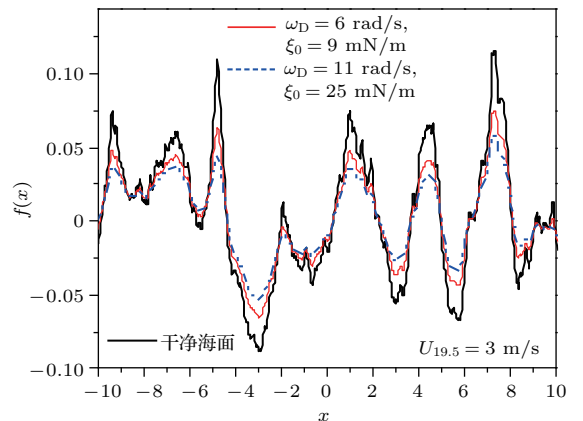


图4 干净海面与受污海面表面轮廓

Fig. 4. Comparison of the surface height profile between clean and contaminated ocean.



可以更直观地看到油膜的存在对于海浪波轮廓的影响. 油膜参数越大(虚线), 其阻尼作用越强, 对海面轮廓的修正也越明显.

### 3 油膜覆盖海面散射回波的多普勒谱建模

鉴于油膜覆盖海面的散射模型可视为分层粗糙海面模型, 现已有诸多电磁仿真方法用于分析油膜覆盖海面的单、双站散射特性<sup>[11-14]</sup>, 鲜有文献研究其后向散射回波特性, 尤其是基于非线性模型的油膜覆盖海面后向散射回波特性. 在上述建立的 Creamer 非线性海面几何模型的基础上, 本节采用迭代物理光学方法<sup>[22]</sup>建立其后向散射回波的多普勒谱模型<sup>[23-25]</sup>. 迭代物理光学方法<sup>[22]</sup>的主要思想过程如下. 当入射波照射到油膜层产生极化电磁流  $\mathbf{J}_{s0}(\boldsymbol{\rho}_0)$ ,  $\mathbf{M}_{s0}(\boldsymbol{\rho}_0)$ , 由边界条件可得到其下方的极化电磁流  $\mathbf{J}_{u0}$ ,  $\mathbf{M}_{u0}$ . 迭代物理光学方法认为海面上任意一点处的电磁流是由整个油膜下边界的  $\mathbf{J}_{u0}$ ,  $\mathbf{M}_{u0}$  的辐射场  $\mathbf{E}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1) = \mathbf{L}^e(\mathbf{M}_{u0}, \mathbf{J}_{u0})$ ;  $\mathbf{H}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1) = \mathbf{L}^h(\mathbf{M}_{u0}, \mathbf{J}_{u0})$  所激发, 如图 5 所示.

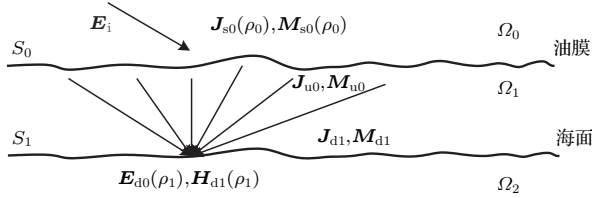


图 5 海面散射场  $\mathbf{E}_{d1}$ ,  $\mathbf{H}_{d1}$  计算策略示意图  
Fig. 5. Geometry for the contribution of the scattered field  $\mathbf{E}_{d1}$ ,  $\mathbf{H}_{d1}$ .

在得到  $\mathbf{E}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1)$ ,  $\mathbf{H}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1)$  后由物理光学方法可计算得到海面上方的电磁流:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1) &= (1 - R_{1|2})\hat{n}_1 \times \mathbf{H}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1), \\ \mathbf{M}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1) &= (1 + R_{1|2})\mathbf{E}_{d1}(\boldsymbol{\rho}_1) \times \hat{n}_1, \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $R_{1|2}$  为油膜到海面层的反射系数. 同理, 油膜层任意点处的电磁流也是由整个海面层电磁流  $\mathbf{J}_{d1}$ ,  $\mathbf{M}_{d1}$  的辐射场共同决定,  $\mathbf{E}_{u1}(\boldsymbol{\rho}_0) = \mathbf{L}^e(\mathbf{M}_{d1}, \mathbf{J}_{d1})$ ;  $\mathbf{H}_{u1}(\boldsymbol{\rho}_1) = \mathbf{L}^h(\mathbf{M}_{d1}, \mathbf{J}_{d1})$ , 由物理光学方法可得到  $\mathbf{J}_{u1}$ ,  $\mathbf{M}_{u1}$ . 再由边界条件得到  $\mathbf{J}_{s1}$ ,  $\mathbf{M}_{s1}$ , 如此即完成了一次迭代. 依次迭代下去直至满足误差要求即停止迭代, 结束迭代后总电磁流可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{s\text{-total}}(\boldsymbol{\rho}_0) &= \mathbf{J}_{s0}(\boldsymbol{\rho}_0) + \mathbf{J}_{s1}(\boldsymbol{\rho}_0) + \cdots + \mathbf{J}_{sn}(\boldsymbol{\rho}_0); \\ \mathbf{M}_{s\text{-total}}(\boldsymbol{\rho}_0) &= \mathbf{M}_{s0}(\boldsymbol{\rho}_0) + \mathbf{M}_{s1}(\boldsymbol{\rho}_0) + \cdots + \mathbf{M}_{sn}(\boldsymbol{\rho}_0). \end{aligned} \quad (14)$$

为了验证所采用的迭代物理光学方法的有效性, 图 6 给出了迭代物理光学方法与矩量法计算油膜覆盖海面的结果比较. 从图 6 的仿真曲线可以看出, 绝大多数散射角范围内, 迭代物理光学方法与矩量法仿真结果符合的较好, 从而验证了本文所采用的迭代物理光学方法的正确性. 为了比较两种方法的计算效率, 表 1 给出了图 6 仿真结果对应的计算机内存和计算时间的比较. 其中计算机处理器主频为 2.3 GHz, 内存为 3.47 GB. 从表 1 可以看出, 本文所采用的迭代物理光学方法所需要的计算机内存仅是矩量法的 0.128%, 计算耗时为矩量法的 1.75%. 这也正是本文采用迭代物理光学方法的原因.

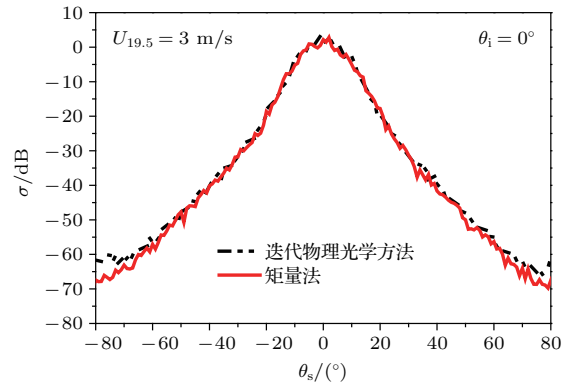


图 6 迭代物理光学方法与矩量法计算油膜覆盖海面的散射结果对比  
Fig. 6. Comparison of numerical results of contaminated sea obtained by our method and MoM.

表 1 单个海面样本的计算机内存及计算时间比较  
Table 1. Comparison of computer resource for one realization.

方法	内存/MB	时间/s
矩量法 (CG)	1026	6600
迭代物理光学方法	1.32	116

海面散射回波的多普勒谱通常定义为散射场时间自相关函数傅里叶变换, 即

$$S(f) = \left\langle \frac{1}{T} \left| \int_0^T \psi_s(t, \theta_s, \theta_i) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2 \right\rangle, \quad (15)$$

其中,  $\langle \cdot \rangle$  表示对海面样本求集平均(由于海面本身的随机特性, 在多普勒谱的仿真计算中一般通过多

次计算求平均作为最终的结果);  $\psi_s(t, \theta_s, \theta_i)$  为  $t$  时刻的复散射场或者散射振幅, 由迭代物理光学法获得;  $T$  为仿真的时间段 (s). 时变海面电磁散射信号序列可对运动的海面进行散射计算得到, 这种方法称为准静态法, 其完整的流程如下.

第一步, 设定时间间隔  $\tau$ , 仿真一组连续的时变油膜覆盖海面的样本. 对于连续的电磁波入射, 当  $\tau$  足够小, 可认为在该时间间隔内, 海面是“静止的”.

第二步, 对每一个“静止的”海面样本, 采用迭代物理光学方法求得其后向散射场.

第三步, 利用 (13) 式计算油膜覆盖海面的散射回波信号的多普勒谱.

第四步, 重复前三个步骤, 得到多组杂波谱计算结果并求集平均.

为了定量地衡量多普勒谱, 可以通过考察其关于频率的一阶矩和二阶矩, 即多普勒频移和展宽. 多普勒频移通常定义为

$$f_c = \left| \int f S(f) df / \int S(f) df \right|, \quad (16)$$

多普勒频移  $f_c$  与功率加权的散射体的平均的雷达视向速度有关. 多普勒谱展宽是由散射面元相对于的雷达视线方向的速度方差决定. 由于海面各部分的雷达视线速度并不相同, 并且有的面元向接近雷达视线运动, 有的面元背离雷达视线运动, 从而时变海面的雷达回波的多普勒谱并不是单一的谱线, 而是具有一定谱宽度的连续的频谱密度函数, 谱宽定义为

$$f_w = \sqrt{\int (f - f_c)^2 S(f) df / \int S(f) df}. \quad (17)$$

在本文多普勒谱仿真计算中, 时间间隔取 0.02 s 对海面进行离散 [25], 每一组多普勒谱由 256 个连续的后向散射样本计算得到, 对 50 组谱曲线求平均作为最终的结果. 入射波频率是 1 GHz, 海水温度为 10 °C, 盐度为 1.5%, 相对介电常数为 (74.0, 61.0), 油膜的介电参数为 (2.2, 0.005), 油膜厚度为 5 mm. 极化方式为水平极化. 海面长度 [26] 为  $L = 153.6$  m, 锥形波因子 [26] 为  $L/4$ .

为了便于多普勒谱频移和谱宽的对比分析, 以下算例中的多普勒谱曲线均用其各自的最大值进行了归一化处理. 图 7 给出了线性与 Creamer 非线性海面归一化多普勒谱结果的比较, 其中每幅图中的两条曲线均分别代表干净海面以及油膜覆盖海面的多普勒谱结果. 同时图中还给出了布拉格频

移的理论结果 [23,24], 其中, 受污海面上漂浮的油膜参数为  $\{\xi_0 = 25 \text{ mN/m}, \omega_D = 11 \text{ rad/s}\}$ , 海面风速为 3 m/s. 从图中可以看出, 在小入射角下, 基于线性模型与 Creamer 非线性模型的干净海面的多普勒谱几乎没有差异, 并且线性海面的多普勒谱频移均大于布拉格频移, 这说明线性海面电磁散射贡献在小角度情形下只要来自于镜面反射. 随着入射角的增大, 线性海面的多普勒谱几乎收缩为一根线, 并且和布拉格线重合, 因为在大入射角下, 布拉格散射在线性海面的电磁散射中占据主导地位. 而此时线性与 Creamer 非线性海面的多普勒谱差异越来越明显. 具体而言, 在中等和大入射角下, Creamer 非线性海面的多普勒谱的谱宽基本保持不变, 并无明显减小的趋势, 这与线性海面多普勒谱的谱宽变化明显不同, 这种差异主要是因为随着入射角的增大, 非线性波浪的运动速度要大于线性波浪, 所以谱宽相对于后者要大一些, 尤其在接近掠入射情形. 此外, 随着入射角的增大, 相同入射角下, Creamer 非线性海面的多普勒频移总大于线性海面的多普勒频移. 本文研究的是一维海面情形, 其散射回波的多普勒谱难以定量地用二维实测数据检验, 但就 Creamer 非线性海面的多普勒频移和展宽所表现出的特性与文献 [27] 实测结果得到的定性规律相符合, 这亦能从一定程度上说明 Creamer 非线性海面相较线性海面的优势所在.

当海面漂浮油膜时, 海面多普勒谱的变化也出现了类似的规律. 为了更好地说明该规律, 图 8 给出了线性和 Creamer 非线性海面的多普勒谱频移和展宽随入射角的变化规律. 从图 8 中可以发现, 在小入射角下, 油膜覆盖的线性海面与 Creamer 非线性海面的多普勒谱频移及展宽均无明显差异. 随着入射角的增大, 在相同入射角下, 油膜覆盖的 Creamer 非线性海面多普勒谱的谱宽明显比线性海面多普勒谱的谱宽要宽且多普勒频移总大于线性海面的多普勒频移.

图 7 和图 8 说明仿真计算得到的大入射下线性海面散射回波的多普勒谱几乎收缩为以布拉格频移为中心的极窄的谱线, 这与海洋多普勒雷达测量结果给出的规律并不一致. 在一系列理论研究和对实测数据分析的基础上, 人们认为海浪波之间应该具有非常复杂的非线性相互作用, 而线性海面只是具有不同权重的一系列沿不同方向传播的不同频率的谐波的线性组合, 它忽略了海浪波之间的非线性相互作用. 因而在掠入射情形下, 线性海面散射

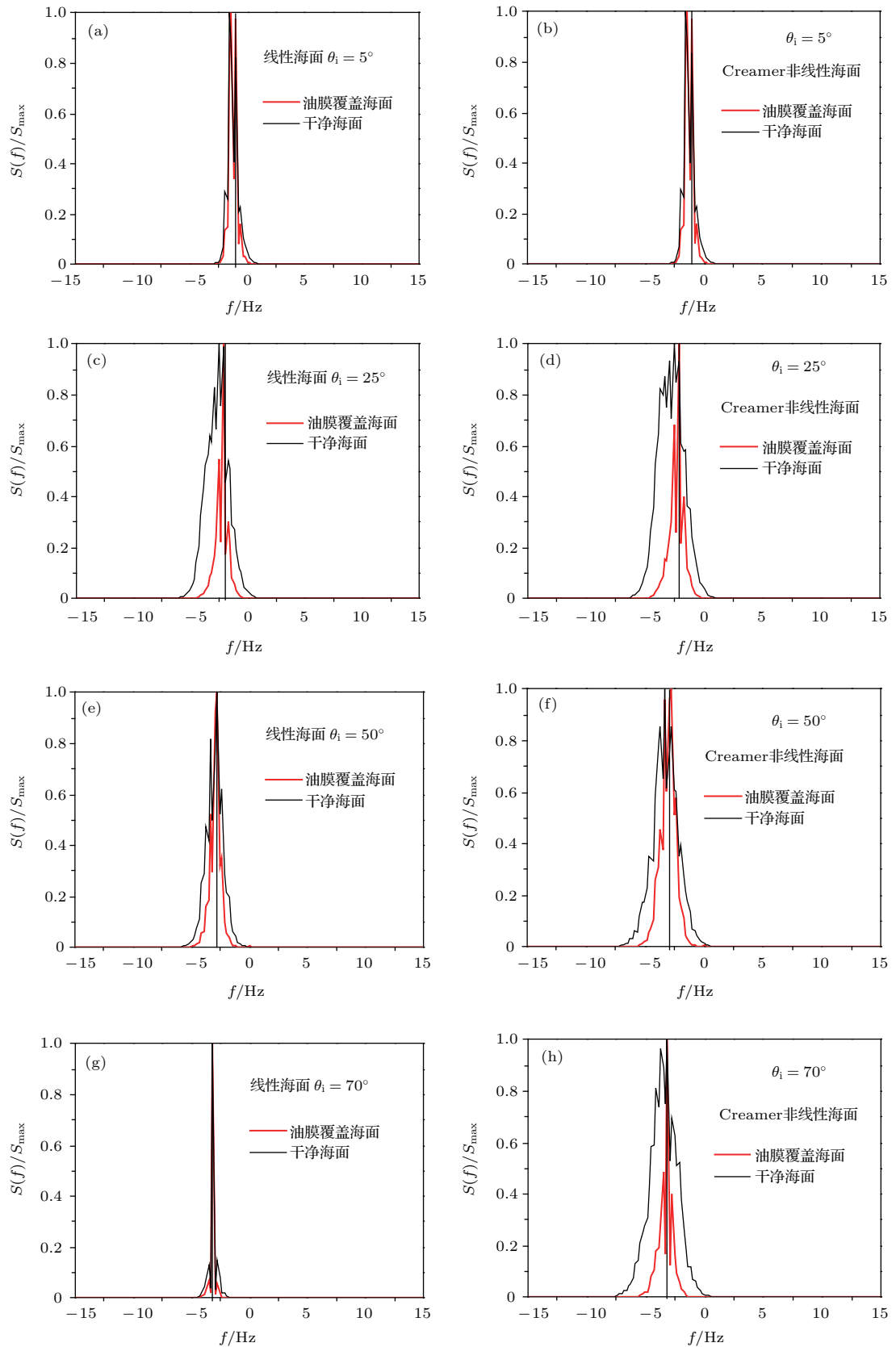


图7 不同入射角下的线性与 Creamer 非线性海面散射回波的多普勒谱比较

Fig. 7. Comparison of the Doppler spectra of scattered echoes from a linear and Creamer nonlinear ocean with different incident angles.

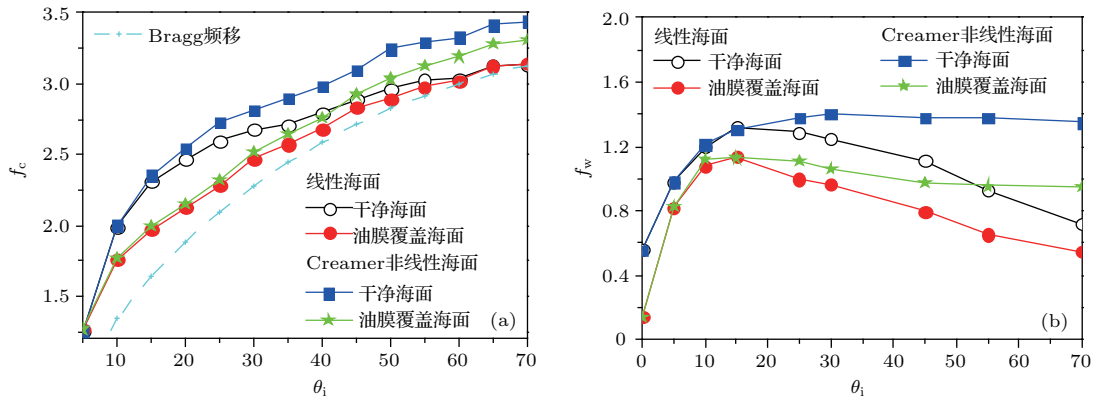


图 8 线性与 Creamer 非线性海面散射回波多普勒谱频移与展宽的比较 (a) 频移; (b) 展宽

Fig. 8. Comparison of the Doppler spectra of scattered echoes from a linear and Creamer nonlinear ocean: (a) Doppler shift; (b) Doppler bandwidth.

回波的多普勒不可避免地表现出不符合实际的行为. 这也是本文采用 Creamer 非线性模型建立油膜覆盖海面几何模型的初衷.

图 9 和图 10 给出了不同风速下油膜覆盖海面散射回波的多普勒谱与干净海面散射回波的多普勒谱的比较. 每幅图均给出了三条曲线, 分别为干净海面以及两种不同油膜参数下的多普勒谱曲线, 海面模型均采用 Creamer 非线性模型. 海面风速分别为 3 m/s 和 5 m/s. 从图中可以看出, 无论风速大小, 除了小入射角外, 油膜覆盖海面的多普勒谱与干净海面的多普勒谱均有明显差异. 首先, 相较于干净海面的多普勒谱, 油膜覆盖海面的多普勒谱明显要窄一些, 即海表面油膜的存在将导致海面散射回波的多普勒谱产生一定的收缩效应. 且不同的油膜参数对散射回波的多普勒谱影响程度也不同. 在相同条件下, 油膜参数为  $\{\xi_0 = 25 \text{ mN/m}, \omega_D = 11 \text{ rad/s}\}$  对应的多普勒谱比  $\{\xi_0 = 9 \text{ mN/m}, \omega_D = 6 \text{ rad/s}\}$  更窄些. 其次, 通过观察不同入射角下的多普勒谱频移, 发现除了小入射角外, 海面上方存在油膜时, 散射回波的多普勒谱频移相较于干净海面变小了. 究其原因, 无论是多普勒谱的谱宽还是频移, 都与海浪波的轨道速度有关, 当海面上方漂浮油膜时, 油膜的黏滞阻尼作用将降低海浪波的轨道速度, 并且当油膜参数越大, 这种阻尼作用更强, 才导致多普勒谱的谱宽和频移与干净海面有较大差异.

为了定量地比较油膜覆盖海面和干净海面的多普勒谱之间的差异, 图 11 和图 12 分别给出了不同风速、不同油膜参数下的多普勒谱的频移和展

宽比较. 从图中可以看出, 无论风速大小, 油膜覆盖海面的散射回波对应的多普勒谱频移与展宽均明显小于干净海面的频移与展宽. 原因如上所述, 主要是由于油膜阻尼作用降低了海浪波的轨道速度. 并且当风速较小时, 这种影响作用更大, 原因在于风速越小, 模拟粗糙海面的 PM 谱高频成分越多, 油膜的阻尼作用恰好破坏了高频成分对应的毛细波, 故风速越小时, 油膜的阻尼作用表现更为明显, 所以无论频移还是展宽, 风速越小时, 油膜覆盖海面回波的多普勒谱谱宽和频移与干净海面差别越明显.

## 4 结 论

本文基于迭代物理光学方法研究了油膜覆盖的一维 Creamer 非线性海面电磁散射回波的多普勒谱特征. 通过与线性模型的多普勒谱结果比较发现, 海面的非线性特征对于散射回波的多普勒谱特性影响极大, 尤其在大入射角情形下, Creamer 非线性海面的频移和展宽特性同实测数据<sup>[26]</sup>符合得更好, 故本文采用 Creamer 非线性模型进行油膜覆盖海面的几何建模. 通过比较干净海面与油膜覆盖海面的多普勒谱结果, 发现海洋表面油膜的存在将导致海面散射回波的多普勒谱产生一定的收缩效应, 多普勒谱频移相较于干净海面情形减小, 并且多普勒谱的这种差异与油膜参数及风速均有一定的关系. 油膜参数值越大时, 这种收缩效应越明显; 风速越小时, 油膜对多普勒谱频移影响越明显.



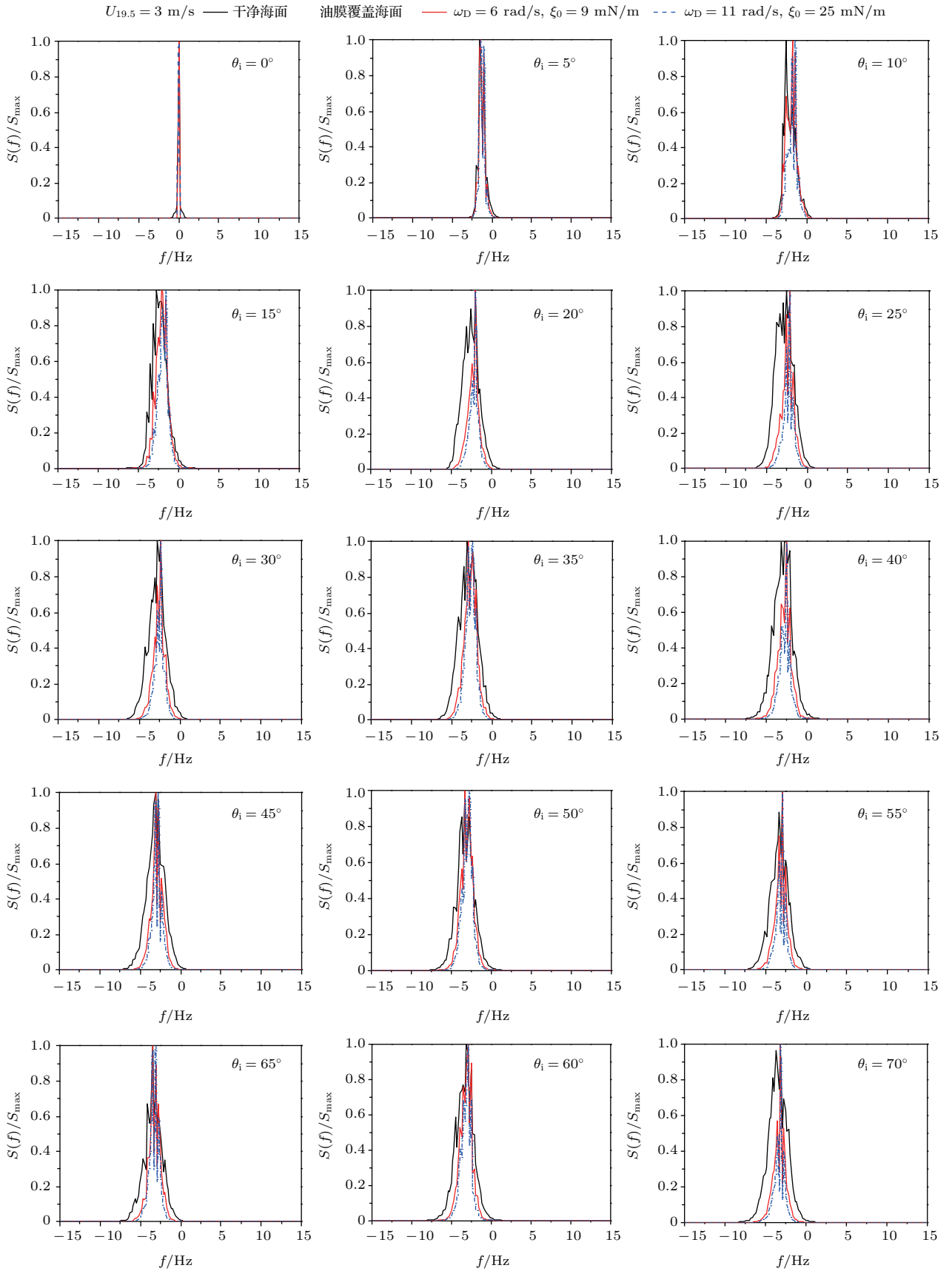


图9 不同油膜参数下的Cremer非线性海面散射回波的多普勒谱与干净海面散射回波多普勒谱的比较

Fig. 9. Comparison of the Doppler spectra of scattered echoes from Cremer nonlinear contaminated ocean with different oil parameters and clean ocean.

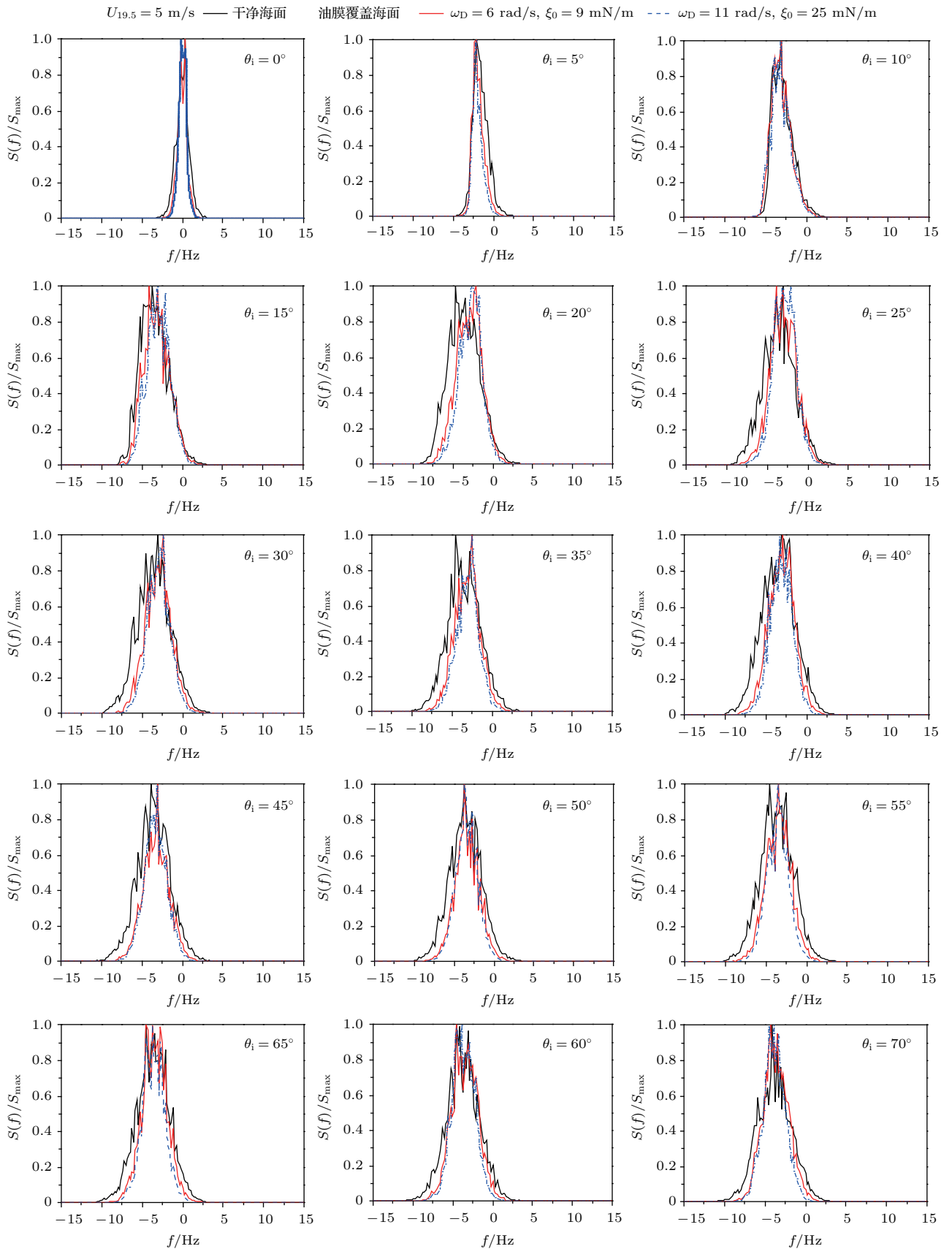


图 10 不同油膜参数下的 Creamer 非线性海面散射回波的多普勒谱与干净海面散射回波多普勒谱的比较

Fig. 10. Comparison of the Doppler spectra of scattered echoes from Creamer nonlinear contaminated ocean with different oil parameters and clean ocean.

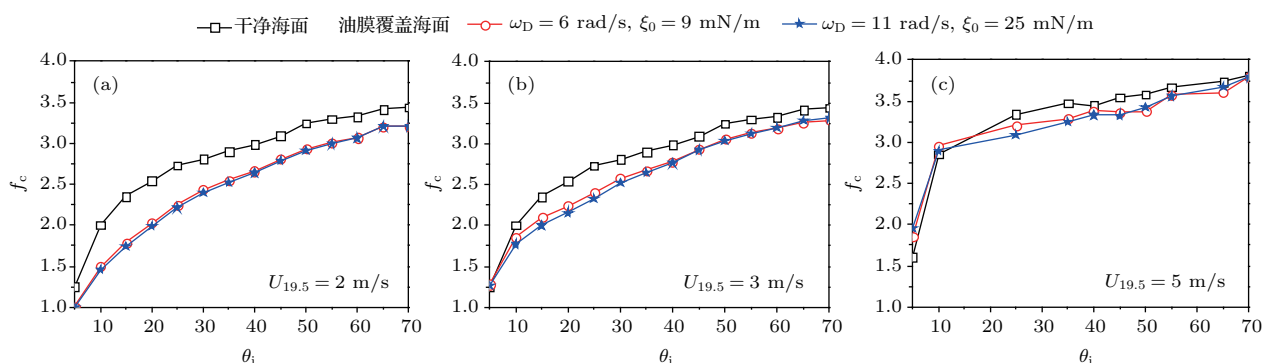


图 11 干净海面与不同油膜参数下海面回波的多普勒谱频移比较 (a)  $U_{19.5} = 2$  m/s; (b)  $U_{19.5} = 3$  m/s; (c)  $U_{19.5} = 5$  m/s  
 Fig. 11. Comparison of the Doppler shift of scattered echoes from clean ocean and contaminated ocean with different oil parameters: (a)  $U_{19.5} = 2$  m/s; (b)  $U_{19.5} = 3$  m/s; (c)  $U_{19.5} = 5$  m/s.

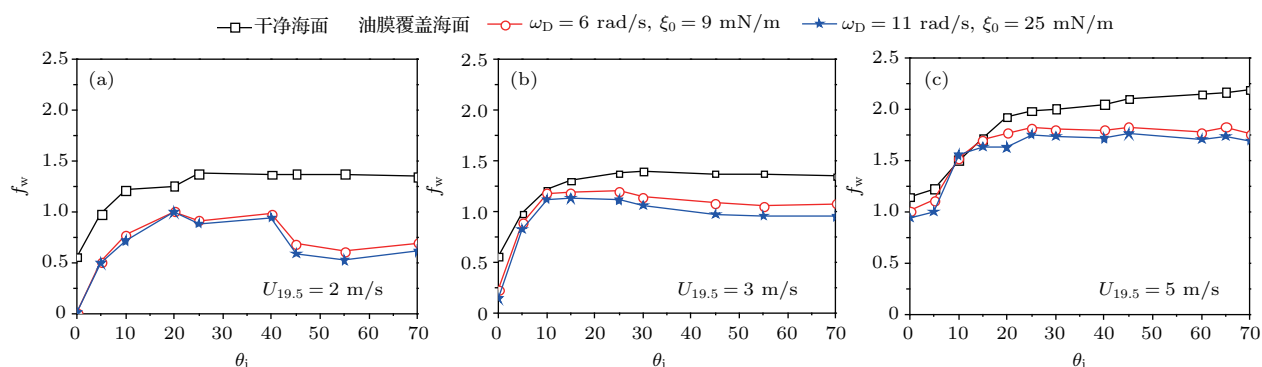


图 12 干净海面与不同油膜参数下海面回波的多普勒谱展宽比较 (a)  $U_{19.5} = 2$  m/s; (b)  $U_{19.5} = 3$  m/s; (c)  $U_{19.5} = 5$  m/s  
 Fig. 12. Comparison of the Doppler bandwidth of scattered echoes from clean ocean and contaminated ocean with different oil parameters: (a)  $U_{19.5} = 2$  m/s; (b)  $U_{19.5} = 3$  m/s; (c)  $U_{19.5} = 5$  m/s.

本文的不足之处在于所采用的模型为一维海面散射模型, 且未研究油膜的厚度与多普勒谱的关系, 下一步工作将在二维海面散射模型的基础上, 考虑更为精确的油膜阻尼模型, 考察油膜厚度对多普勒谱的影响, 并根据结果反演油膜的厚度, 为多普勒雷达进行海面油膜检测提供更有价值的物理理论依据。

### 参考文献

[1] Sackett W M 1977 *J. Geochem. Explor.* **7** 243  
 [2] Acinas J R, Brebbia C A 1997 *Computer Modeling of Seas and Coastal Regions III* (Southampton Boston: Computation Mechanics Publication) pp4-8  
 [3] Gade M, Alpers W, Hühnerfuss H 1998 *Remote Sens. Environ.* **66** 52  
 [4] Ermakov S A, Sergievskaya L A, Zuikova E M 2000 *Proc. IEEE IGARSS* **2000** 1513  
 [5] Ermakov S A, Sergievskaya L A, Shchegolkov Y B 2002 *Proc. IEEE IGARSS* **2002** 2986  
 [6] Ye H X, Jin Y Q 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **45** 1174

[7] Zhang M, Liao C, Xiong X Z 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **16** 364  
 [8] Liu P, Jin Y Q 2004 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **52** 1205  
 [9] Li J, Guo L X, Zeng H, Han X B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2757  
 [10] Yang P J, Guo L X 2016 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **184** 193  
 [11] Nunziata F, Sobieski P, Migliaccio M 2009 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **47** 1949  
 [12] Pinel N, Bourlier C, Sergievskaya I 2014 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **52** 2326  
 [13] Pinel N, Déchamps N, Bourlier C 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 385  
 [14] Ghanmi H, Khenchaf A, Comblet F 2015 *J. Appl. Remote. Sens.* **9** 096007  
 [15] Plant W J 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 21131  
 [16] Caponi E A, Lake B, Yuen H C 1999 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **47** 354  
 [17] Plant W J, Farquharson G 2012 *J. Geophys. Res.* **117** C08010  
 [18] Cini R, Lombardini P P, Hühnerfuss H H 1983 *Int. J. Remote Sens.* **4** 101  
 [19] Lombardini P P, Fiscella B, Trivero P 1989 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **6** 882

- [20] Thorsos E I 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **83** 78  
 [21] Creamer D B, Henyey F, Schult R 1989 *J. Fluid Mech.* **205** 135  
 [22] Wang R, Guo L X 2016 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett.* **13** 500  
 [23] Wang R, Guo L X 2015 *Int. J. Remote Sens.* **36** 845  
 [24] Li X F, Xu X J 2011 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **49** 603  
 [25] Toporkov J V, Brown G S 2000 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **38** 1616  
 [26] Ye H X, Jin Y Q 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 1234  
 [27] Gotwols B L, Chapman R D, Thompson D R 2000 *Doppler Spectra and Backscatter Cross Section Voer 45°–85° Incidence, NATO/RTO Symposium 2000* p1

# Doppler spectrum simulation of nonlinear ocean covered by oil film\*

Wang Rui Guo Li-Xin<sup>†</sup> Zhang Ce

(Physics and optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

( Received 25 January 2018; revised manuscript received 27 September 2018 )

## Abstract

In recent years, marine oil spill has become an important disaster for marine environment. Marine oil spill quantity is an important indicator for evaluating the threat of oil spill. This paper focuses on the Doppler spectrum of one-dimensional (1D) nonlinear ocean covered by oil film. Oil film damps the capillary wave of the ocean, which leads to a smooth profile of the ocean covered by the film. The paper is devoted to the detailed analysis of the electromagnetic magnetic wave scattering from a sea that is covered with oil. More precisely, it focuses on the case of homogeneous oil slicks. This allows better detection of oil spills, as well as possibly an estimation of the amount of oil spilled, as the scattering coefficient depends on the layer thickness. The 1D Creamer nonlinear ocean is proposed based on the PM spectra. The Marangoni damping effect is considered for modeling the contaminated rough ocean surface. First, the influence of oil film on the ocean surface spectrum and geometrical structure are examined briefly in the present study. On this basis, the influence of oil film on the Doppler spectrum signature (in L-band) of the backscattered echo of the clean and contaminated rough ocean are studied in detail based on the iterative physical optics. The results of the Doppler spectrum signature including Doppler shift and spectral bandwidth of the backscattered echo from Creamer nonlinear ocean surface are different from those of the linear ocean surface especially at the big and moderate incident angles, which shows that it is necessary to adopt the Creamer nonlinear model in the paper. The simulation results show that the Doppler spectrum signatures including Doppler shift and spectral bandwidth of the echo from ocean covered by oil film are significantly affected by sea slicks. The influence of some important parameters, such as wind speed, oil-damping values and incident angles on Doppler spectrum signature is investigated and discussed in detail. Moreover, simulation results indicate that the Doppler spectrum signature is a promising technique for the remote sensing of oil films floating on sea surfaces.

**Keywords:** oil film, nonlinear ocean, Doppler spectra

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.25.Dd

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180184

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2018JQ6045), Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Foundation, and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61431010, 61701428).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lxguo@xidian.edu.cn](mailto:lxguo@xidian.edu.cn)