

DOI: 10.7652/xjtuxb201712006

复杂海面电磁散射的修正面元模型

刘万萌, 童创明, 王童
(空军工程大学防空反导学院, 710051, 西安)

摘要: 针对合成孔径雷达成像系统中,利用传统面元模型在含泡沫的复杂海面环境下得到的面元后向散射场误差较大,导致成像模糊的问题,提出了一种复杂海面电磁散射的修正面元(MFM)模型。首先建立精确的海水介电模型来计算含泡沫海面介电常数;然后基于 Elfouhaily 海谱模型生成具体的海面样本,并将其划分成一个个小面元;最后计算出各面元的散射场,将其叠加得到海面样本的散射结果。与实测数据的对比表明,传统面元模型在大入射角时的仿真结果出现衰减现象,而加入泡沫的修正面元模型将使衰减降低近 10 dB,增强了与实测数据的吻合度。采用 MFM 模型对海面电磁散射特性及布儒斯特效应进行实验,结果表明:风速对海面布儒斯特效应影响较大,在 P 波段当风速由 4 m/s 增大至 10 m/s 时,布儒斯特效应减弱 85% 左右。

关键词: 修正面元模型;海面电磁散射;布儒斯特效应

中图分类号: TN011 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0035-07

A Modified Facet-Model of Electromagnetic Scattering from Complex Ocean Surface

LIU Wanmeng, TONG Chuangming, WANG Tong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A modified facet model is presented to solve the problem that the classical facet model in the synthetic aperture radar has large error of backscattered field from facets and results in blurring imaging in complex ocean surface. Firstly, an accurate model is built to calculate the permittivity of sea water with foams. Then, a concrete ocean surface is built based on the spectral model of Elfouhaily, and is divided into many little facets. The scattered field for each facet is calculated, and the result of electromagnetic scattering from ocean surface is obtained by superposing these scattered fields. A comparison with the measured data shows that when incidence angles are large, simulation results of the classical facet model appear an attenuation, while the modified facet model with foams reduces the attenuation about 10 dB and enhances the coincidence degree with the measured data. Experiment results by using the modified facet model to analyze the ocean surface electromagnetic scattering properties and Brewster effect show that the wind speeds influence the Brewster effect obviously. When the wind speeds at P-band increase from 4 m/s to 10 m/s, the Brewster effect is weakened about 85%.

Keywords: modified facet model; ocean surface electromagnetic scattering; Brewster effect

海面面元散射场的求解准确度直接影响着雷达成像的效果,因此需要建立更加精确的电磁散射面元模型来求解海面面元的散射场。在以往对海面电磁散射特性的计算中,吴振森等在传统双尺度(TSM)模型的基础上提出了修正双尺度模型^[1],提高了算法的准确性,但得不到海面具体面元的散射场。实际中,当海面风速较大时,海面将在一定程度上被泡沫所覆盖。金亚秋将 TSM 模型与矢量辐射传输理论(VRT)相结合,研究当海面被泡沫所覆盖情形下的散射特性^[2];梁玉等将修正双尺度理论与矢量辐射传输理论结合,提出了含泡沫的修正双尺度模型^[3],但并未考虑实际海况与不同频率的截断波数;亓晓等采用基尔霍夫近似结合矢量辐射传输理论的方法分析了泡沫覆盖海面的激光散射特性^[4],但该方法在小擦地角情况下的计算结果不准确。

当采用垂直极化方式的电磁波对地海面环境的散射特性进行研究时,地海面环境的反射系数将在布儒斯特角的位置达到最小,这一现象被称为地海面环境的布儒斯特效应。文献[5]提出利用布儒斯特效应设计弹道来降低镜像干扰在跟踪打击目标时产生的不利影响,并采用实验和仿真结果证明了该方法的有效性,但该方法的不足之处在于利用复反射系数经验公式^[6]计算环境的布儒斯特角,而通过经验公式得到的角度不可避免地会产生较大的误差,这些误差将会降低布儒斯特效应在抗镜像干扰中发挥的良好作用。Roger 等通过试验对地面的镜向反射特性进行了研究,并试图利用电磁散射领域中的物理光学(PO)方法给出合理的解释^[7],然而当入射角较大时 PO 模型的计算结果存在较大误差。之后,Dennis 等在研究海洋面的低掠入射时,分析了布儒斯特角与多径效应^[8],但并没有对海面布儒斯特效应做详细的探究。

文献[9]在双尺度(TSM)散射理论的基础上,依据面元化的思想建立散射模型,并引入基尔霍夫近似(KA)模型^[10]对近垂直入射区进行修正,但并未考虑泡沫的影响,而泡沫粒子对海面散射的影响,尤其是在掠入射情形下更是不容忽略的。本文首先利用混合介质模型对双 Debye 介电模型进行修正,建立精确的海水介电模型,然后以文献[9]提出的散射模型为基础,在海面风速较大、电磁波入射角度较小的情况下考虑海面泡沫对其电磁散射特性的影响,提出含泡沫的修正面元模型,与实测数据的对比验证了模型的正确性。在此基础上,分析了泡沫覆盖率、海况等级、入射波频率等因素对不同海域海面

电磁散射特性及布儒斯特效应的影响,以期海洋环境的遥感探测及海上超低空目标的监测与跟踪提供有益的参考。

1 含泡沫海水介电常数模型

海水是由纯水和溶解在水中的盐组成的混合物,通常被视为非均匀有耗媒质,其介电常数与入射电磁波的频率、海水温度等因素有关。Meissner 等人提出了双 Debye 海水介电常数模型^[11],即

$$\epsilon = \frac{\epsilon_s(T, \omega_s) - \epsilon_1(T, \omega_s)}{1 + jf/f_1(T, \omega_s)} + \frac{\epsilon_1(T, \omega_s) - \epsilon_\infty}{1 + jf/f_2(T, \omega_s)} + \epsilon_\infty - j \frac{\sigma(T, \omega_s)}{2\pi\epsilon_0 f} \quad (1)$$

式中: $f_1(T, \omega_s)$ 、 $f_2(T, \omega_s)$ 分别为二阶 Debye 松弛频率; ω_s 和 T 分别代表海水的含盐度(质量分数)和温度; σ 为海水的离子电导率; $\epsilon_s(T, \omega_s)$ 为海水的静态介电常数; $\epsilon_1(T, \omega_s)$ 表示中间频率介电常数; ϵ_∞ 为海水在无限大频率时的介电常数,其值与海水温度、盐浓度均无关,一般取为 4.9; ϵ_0 为自由空间介电常数。当海面风速较大时,海面将在一定程度上被泡沫所覆盖,本文采用 Maxwell-Garnett 模型^[12]计算覆盖泡沫海面的介电常数,即

$$\epsilon_e = \epsilon + \frac{3f_b(\epsilon_p - \epsilon)\epsilon/(\epsilon_p + 2\epsilon)}{1 - f_b(\epsilon_p - \epsilon)/(\epsilon_p + 2\epsilon)} \quad (2)$$

式中: ϵ_p 代表气泡介电常数,其具体表达式见文献[13]; f_b 表示海水中气泡经验公式。海水含盐度 ω_s 取全球通用平均盐度值 0.3254%。

2 海面面元电磁散射模型

2.1 面元模型

假设上半空间为真空介质,下半空间介质的相对介电常数为 ϵ ,考虑平面波沿 xoz 平面入射,单个面元的散射模型如图 1 所示,其中 $\hat{p}_0$ 为入射波单位极化矢量, $\hat{k}_i$ 和 $\hat{k}_s$ 分别表示入射和散射方向单位矢量。

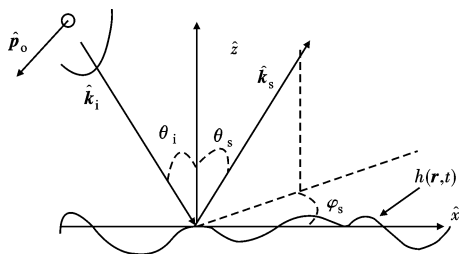


图1 面元散射模型示意图

根据 Bass-Fuks 理论^[14],单个面元的 TSM 散射场为

$$\mathbf{E}^{\text{TSM}} = \frac{k^2(1-\epsilon)}{4\pi} \frac{e^{jk_r'}}{jr'} F \iint h(\mathbf{r}, t) e^{-j\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{r} \quad (3)$$

式中: r' 表示接收点到面元中心的距离; k 为电磁波波数; $\mathbf{q} = k(\hat{\mathbf{k}}_s - \hat{\mathbf{k}}_i)$; F 表示极化因子。

$$F_{\text{vv}} = \frac{1}{\epsilon} [1 + R_v(\theta_i)] [1 + R_v(\theta_s)] \sin\theta_i \sin\theta_s - [1 - R_v(\theta_i)] [1 - R_v(\theta_s)] \cos\theta_i \cos\theta_s \cos\varphi_s \quad (4)$$

$$F_{\text{hh}} = [1 + R_h(\theta_i)] [1 + R_h(\theta_s)] \cos\varphi_s \quad (5)$$

式中: F_{vv} 和 F_{hh} 分别表示垂直和水平极化因子。

在近垂直入射区引入基尔霍夫近似(KA)模型^[10]对传统的双尺度(TSM)模型进行修正,以提高小入射角时的计算精度。根据文献[9],面元 KA 散射场为

$$\mathbf{E}^{\text{KA}} = -jk \frac{e^{-jk_r'}}{4\pi r'} U \iint_S e^{j\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{S} \quad (6)$$

式中: U 为基尔霍夫近似模型的极化因子^[15]。

根据计算的需要,将生成的二维介质海面几何模型划分成单个小面元,近垂直入射区采用 KA 模型计算,其他区域采用 TSM 计算,在粗糙面各个面元间的相互作用可以忽略的情况下,将面元的散射场进行叠加即可得到整个粗糙面的散射结果,如下所示

$$\mathbf{E}_{\text{total}}^{\text{sea}} = \frac{S(\theta_i, \theta_s)}{A} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [(\mathbf{E}^{\text{TSM}} + \mathbf{E}^{\text{KA}}) \Delta x \Delta y] \quad (7)$$

式中: A 为生成的二维海面模拟样本的面积; M 、 N 分别为样本在 x 和 y 方向等间隔的离散点数; Δx 、 Δy 为相邻两点间的距离; $S(\theta_i, \theta_s)$ 为遮蔽函数^[16],引入此函数是对大入射角情形下面元间的遮蔽效应进行修正,进而得到海面的雷达散射截面

$$\delta_s = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \quad (8)$$

2.2 截断波数的选取

基于 Elfouhaily 海谱模型生成的海面几何样本包括大、小两种尺度波谱——重力波谱和张力波谱(毛细波),在计算海面电磁散射的 TSM 模型中,是通过截断波数 k_c 这一参量将大小两种尺度的波进行区分的,参量 k_c 的取值将直接影响到海面散射结果计算的准确性,其大小不仅受到海面风速的影响,而且与入射电磁波的频率有关,因此在研究不同海况海面散射特性时,取相同的 k_c 是不准确的。为了使计算结果更加准确,这里依据 TSM 模型中大尺度重力波和小尺度毛细波的成立条件,给出不同情况下 k_c 的计算方法。

在 TSM 模型中重力波分量的成立条件如下

$$2\pi\sigma_c/k_i \leq 1 \quad (9)$$

式中: k_i 表示入射电磁波数; $\sigma_c^2 = \int_0^{k_c} k^4 W(k) dk$ 代表海面平均曲率的标准离差,其中 $W(k)$ 表示生成海面几何模型时所采用的谱函数。相应的毛细波分量的成立条件如下

$$k_i h_s \cos(\theta_i) \leq 1 \quad (10)$$

式中: h_s 是小尺度的毛细波的均方根高度,并且满足 $h_s^2 = \int_{k_c}^{\infty} W(k) dk$ 。由式(9)和式(10)可以得到 $2\pi\sigma_c/k_i$ 和 $k_i h_s \cos(\theta_i)$ 同时具有远小于 1 的限制值 k_c ,由此可以得到如下关系式

$$\frac{4\pi^2}{k_i^2} \int_0^{k_c} k^4 W(k) dk = k_i^2 \cos^2(\theta_i) \int_{k_c}^{\infty} W(k) dk \quad (11)$$

由式(11)便能够计算出不同海况和入射波频率下的截断波数。图 2 给出了 P、L、S、X、Ku 这 5 种不同波段下参数 k_c/k_i 随海面风速的变化曲线,其中入射角 $\theta_i = 10^\circ$ 。从图 2 中可以得出如下结论:在风速较小时, k_c/k_i 的比值随着风速的增大出现减小的趋势,之后便随之增大,仅在 X 和 Ku 高波段的情况下出现略微下降的趋势。

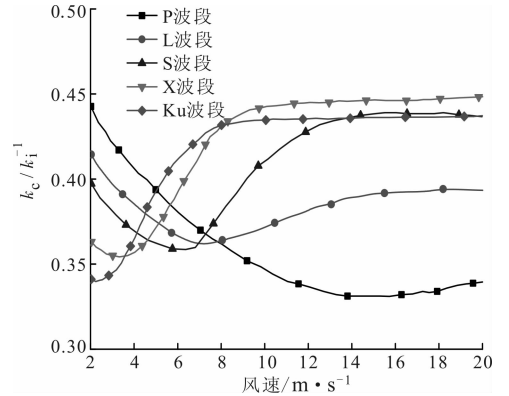


图 2 5 种频段下截断波数与入射波数比值随风速的变化曲线

3 泡沫覆盖海面的电磁散射

当海面风速达到 25 m/s 时,将近 1/3 的海面会被泡沫所覆盖,前文利用 KA 模型对双尺度模型在小入射角情形下进行修正,加入泡沫的影响是对双尺度模型在大入射角即掠入射时的修正。

3.1 泡沫层对海面电磁散射的影响

在覆盖泡沫的海面中,依据文献[4]可得泡沫层中的矢量辐射传输方程如下

$$\cos\theta_s \frac{d}{dz} \mathbf{I}(\theta_s, \varphi_s, z) = -\mathbf{K}_e(\theta_s, \varphi_s) \mathbf{I}(\theta_s, \varphi_s, z) +$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta' \sin\theta_s \mathbf{P}(\theta_s, \varphi_s; \theta', \varphi') \mathbf{I}(\theta', \varphi', z) d\varphi' + \mathbf{Q}(z, \theta_s, \varphi_s) \quad (12)$$

$$- \cos\theta_s \frac{d}{dz} \mathbf{I}(\pi - \theta_s, \varphi_s, z) =$$

$$- \mathbf{K}_e(\theta_s, \varphi_s) \mathbf{I}(\pi - \theta_s, \varphi_s, z) +$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta' \sin\theta_s \mathbf{P}(\pi - \theta_s, \varphi_s; \theta', \varphi') \mathbf{I}(\theta', \varphi', z) d\varphi' + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta' \sin\theta_s \mathbf{P}(\pi - \theta_s, \varphi_s; \pi - \theta', \varphi') \mathbf{I}(\pi - \theta', \varphi', z) d\varphi' + \mathbf{Q}(z, \theta_s, \varphi_s) \quad (13)$$

式中: θ' 、 φ' 、 θ_s 、 φ_s 分代表入射角、入射方位角、散射角、散射方位角; $\mathbf{I}(\theta, \varphi, z)$ 和 $\mathbf{K}_e$ 分别代表 4×1 柱矢量和消光矩阵。

在实际情况下,由于海面风速较大而产生的泡沫可以看作由多个水泡粒子组成,这里的泡沫粒子采用如图3所示的满足伽马分布的结构模型进行表示,以 a 表示泡沫粒子的外半径,取 $a = 250 \mu\text{m}$,以 b 表示泡沫粒子的内半径,取 $b = 230 \mu\text{m}$,则泡沫粒子膜的厚度为 $a - b = 20 \mu\text{m}$,在本文中将海面泡沫层的厚度取作 2 cm 。

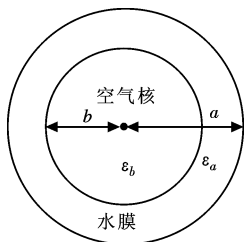


图3 泡沫结构

根据文献[4]可以得出含泡沫海面双站散射系数定义如下

$$\sigma_{pq}(\theta_s, \varphi_s; \theta_i, \varphi_i) = \frac{4\pi \cos\theta_s I_s(\theta_s, \varphi_s)}{I_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (14)$$

式中: θ_i 、 φ_i 分别表示入射俯仰角和入射方位角; I_s 、 I_i 分别表示入射强度与散射强度。根据米氏理论计算得到单个泡沫的散射结果,然后通过常数变易法和边界条件求解出微分积分矢量辐射传输(VRT)方程,通过采用迭代的方式计算得到各阶解,最后在此基础上可以解出泡沫覆盖海面的零阶和一阶散射系数,分别用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 、 σ_5 来表示,其详细表达式文献[3]中已给出,这里不再赘述。各阶散射系数所表示的含义分别如图4所示。

被泡沫所覆盖的海面散射系数表达式如下

$$\sigma^{\text{foam}}(\theta_s, \varphi_s; \theta_i, \varphi_i) = \sigma_1(\theta_s, \varphi_s; \theta_i, \varphi_i) + \sigma_2(\theta_s, \varphi_s; \theta_i, \varphi_i) + \sigma_3(\theta_s, \varphi_s; \theta_i, \varphi_i) + \sigma_4(\theta_s, \varphi_s; \theta_i, \varphi_i) + \sigma_5(\theta_s, \varphi_s; \theta_i, \varphi_i) \quad (15)$$

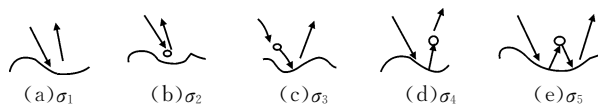


图4 零阶解和一阶解的散射过程示意图

3.2 泡沫覆盖率

风驱海面的泡沫覆盖率与海上风速、海水的温度等因素有着密切关系,要准确分析不同海域海况下泡沫覆盖海面的散射特性及布儒斯特效应,需对海面泡沫覆盖率进行分析,在大气稳定的情况下,海面的泡沫覆盖率可由下式^[17]求得

$$C = 2.32 \times 10^{-6} V_{10}^{3.4988} \quad (16)$$

式中: V_{10} 表示海面上方 10 m 处的风速。

式(16)中仅仅体现出了泡沫覆盖率与海上风速的关系,若要分析覆盖率与海水和空气温差的关系,需要用到以下模型^[18]

$$C = 1.95 \times 10^{-5} V_{10}^{2.55} \exp(0.0861 \Delta T) \quad (17)$$

式中: ΔT 表示海水和空气的温差。图5给出了泡沫覆盖率随海面风速及海水和空气温差的变化关系,可以看出,海面泡沫覆盖率随着风速及海水和空气温差的增大而增大。如若没有进行特殊交代,本文后续的计算是在海水和空气温差适中、大气稳定的情形下,利用式(16)得出的泡沫覆盖率。

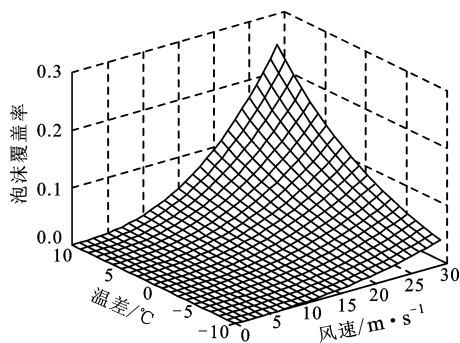


图5 泡沫覆盖率与风速、海水和空气温差的关系

传统的泡沫修正即在算出泡沫覆盖率后利用下式计算风驱海面的总散射系数

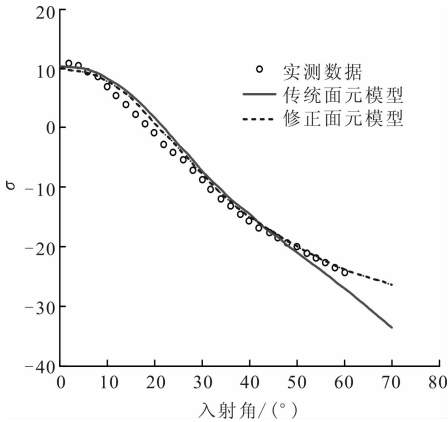
$$\sigma^{\text{all}} = (1 - C) \sigma_{\text{TSM}} + C \sigma^{\text{foam}} \quad (18)$$

式中: σ_{TSM} 是由修正双尺度模型计算出的海面散射系数。本文采用修正面元模型来计算海面散射系数,海面模拟样本为 $128 \text{ m} \times 128 \text{ m}$ 的基于 Elfouhaily 谱的海面模型, x 和 y 方向的间隔都取为 0.5 m ,因此面元总数 $N = 256 \times 256 \times 2$,通过泡沫覆盖率模型求解出 C 之后,便可由 $M = NC$ 计算出含泡沫的面元数,最后再把泡沫加到面元高度相差比较大的海面面元上,这就是采用修正面元模型计算含泡沫复杂海面的基本过程。

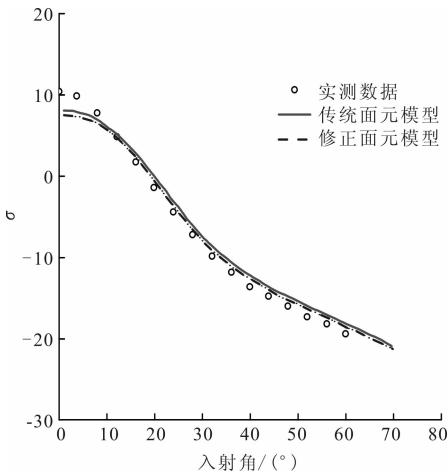
4 仿真结果与分析

4.1 海面电磁散射特性分析

首先对本文提出的修正面元模型进行验证,在入射波频率为 13.9 GHz、海面风速为 10 m/s、海水温度取 17.4℃、海水盐度 w_s 取 0.3254‰ 时,将不加泡沫和加入泡沫得到的水平极化后向散射系数与 SASS-II 水槽实测数据^[19]进行对比,如图 6 所示。可以看出,当入射角较小时,加入泡沫和不加泡沫的计算结果差别不大,但是在水平极化大入射角的情形下,未考虑泡沫的传统面元模型的计算结果衰减增大,而考虑泡沫的修正面元模型,将使仿真结果的衰减降低近 10 dB,使之与实测数据更为吻合。



(a)入射电磁波为水平极化



(b)入射电磁波为垂直极化

图 6 修正面元模型与传统面元模型的电磁散射特性比较

海水参数与图 6 实验相同,海水介电常数为 (42.08,39.46)。图 7 给出了风速分别为 4、10、15 m/s 时, Ku 波段垂直极化条件下,有、无泡沫两种情形下后向散射系数随入射角的变化曲线。可以看出:在小入射角时,泡沫、风速对后向散射的影响并

不明显,在大入射角的情形下,海面后向散射将随着风速的增高而发生明显的变化;随着风速增大,泡沫的存在对海面散射的影响越发明显,分析其原因在于泡沫覆盖率会随着风速的增高而增大,进而使得有、无泡沫的海面散射结果差别越大。

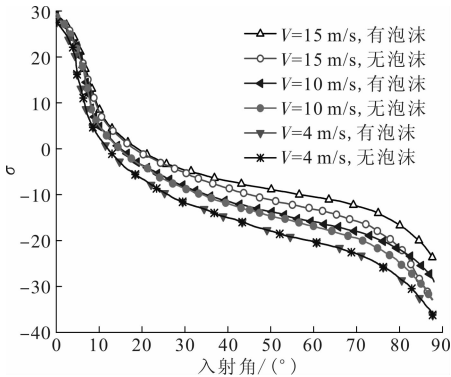


图 7 不同海况下泡沫对海面散射的影响

大入射角情形下海面电磁散射特性会更加复杂,并且对海杂波研究及目标识别具有重要意义。根据中国海洋大学提供的西太平洋和东南沿海 2007—2011 年的卫星数据可知,黄海和东海海水温度变化较为明显,变化范围在 5~30℃;各不同海域的含盐度变化较小,变化范围为 0.30‰~0.35‰。本文依据此设定合理的海水温度和盐度值,具体取值如表 1 所示。以不同的海水温度与盐度参数表征不同的海域特征,以水平极化为例,风速取 10 m/s,其余参数与图 6 实验相同,分析比较了不同海域海面在不同波段下掠入射时的电磁散射特性,如图 8 所示,从图 8 中可得出如下结论:比较算例 1、2 可知,在大入射角的情形下海水盐度的变化对海面散射特性的影响并不大,几乎没有什么变化,比较算例 3、4 可知,海水温度对海面散射特性的影响同样不是那么明显,而入射波频率的增大将会使海面的后向散射增强,这是因为入射波频率越高海面的相对粗糙度越大,非相干散射越强。

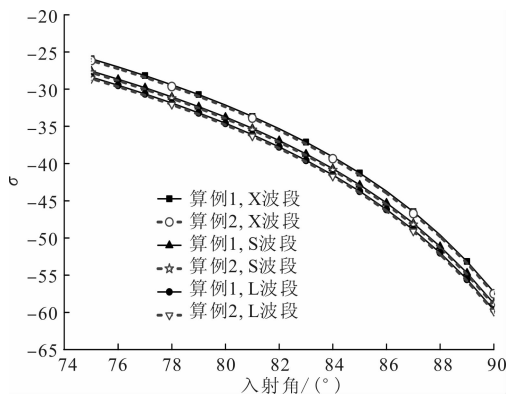
表 1 图 8 中算例 1~4 的具体温度与盐度值				
算例	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
温度/℃	17	17	10	25
盐度/‰	30	35	32	32

4.2 海面布儒斯特效应分析

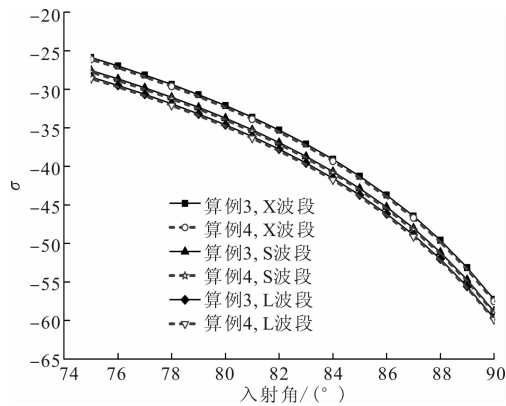
当电磁波入射到较为平滑的介质表面时,并且其极化方式为垂直极化,则介质表面的反射系数可以通过以下 Fresnel 反射式求得

$$\Gamma_v = \frac{\epsilon_r \sin \theta_c - (\epsilon_r - \cos^2 \theta_c)^{1/2}}{\epsilon_r \sin \theta_c + (\epsilon_r - \cos^2 \theta_c)^{1/2}}$$

(19)



(a)算例 1、2 的后向散射系数

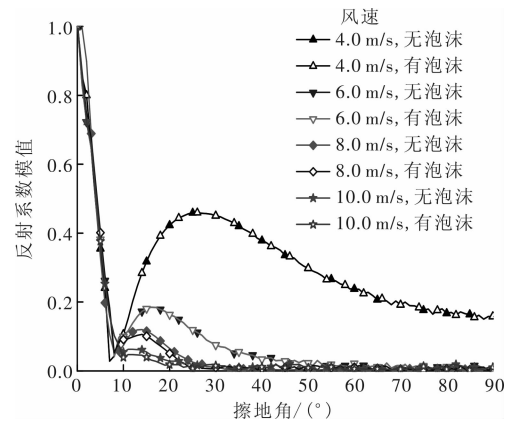


(b)算例 3、4 的后向散射系数

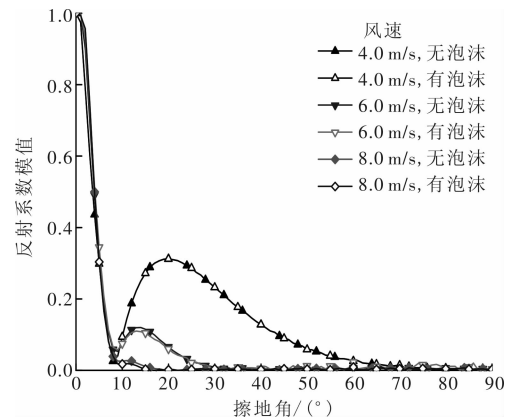
图 8 不同海域后向散射系数随入射角变化曲线

式中: ϵ_r 表示介质的相对介电常数; θ_c 为入射擦地角。如果媒质是纯介质, 无损耗, ϵ_r 为实数, 那么使 $\Gamma_v = 0$ 的擦地角 θ_c 被称为布儒斯特角。式(19)只适用于计算平滑介质表面的反射系数, 对于实际的海面而言, 存在一定的粗糙度, 因而不能利用式(19)分析其布儒斯特效应。本文利用修正面元模型对海面的布儒斯特效应进行分析, 在图 9 中, 仿真分析了入射波频率、风速以及泡沫对布儒斯特效应的影响。由图可得, 在相同波段下, 随着风速的增大海面布儒斯特效应减弱, P 波段时风速由 4 m/s 增大至 10 m/s, 布儒斯特效应将减弱 85% 左右, 这是因为风速越大海面越粗糙造成非相干散射增强, 镜面反射减弱; 同时, 随着风速的增大, 泡沫的存在对海面布儒斯特效应的影响越来越明显, 这是因为泡沫覆盖率会随着风速的增高而增大, 进而使得泡沫的体散射越来越明显, 泡沫的存在削弱了布儒斯特效应。比较图 9a、9b 和 9c 可得, 风速相同时, 频率越高海面布儒斯特效应越弱, 这是由于频率越高海面相对粗糙度越大, 造成非相干散射增强镜面反射减弱; 仔细观察布儒斯特效应随擦地角的变化曲线可以看出,

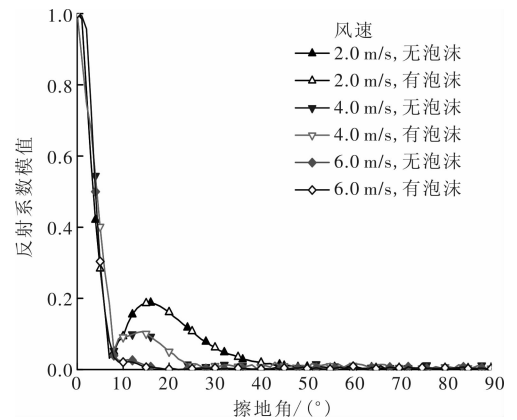
海面风速的变化会使海面布儒斯特角出现偏移。



(a)P 波段



(b)L 波段



(c)X 波段

图 9 不同风速下海面布儒斯特效应变化规律

5 结 论

本文以西太平洋和东南沿海盐度场和温度场的卫星数据为基础, 采用混合介质模型修正海水介电常数建立了泡沫覆盖率模型, 以修正双尺度理论结合矢量辐射传输理论提出的修正面元模型, 并对泡沫覆盖复杂海面电磁散射特性及布儒斯特效应进行

分析。通过与实测数据的比较,验证了含泡沫修正面元模型在大入射角时可弥补传统面元模型的不足。仿真结果表明:影响海面散射特性的主要因素是风速和入射电磁波的频率,而温度与盐度这两个因素对海面后向散射的影响很小;影响海面布儒斯特效应的因素包括海面风速以及入射电磁波的频率,并且当海面风速较大时,泡沫的体散射作用对海面后向散射及布儒斯特效应会产生较为明显的影响。

参考文献:

- [1] WU Z S, ZHANG J P, GUO L X. An improved two-scale model with volume scattering for the dynamic ocean surface [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, 89: 39-56.
- [2] 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 16-26.
- [3] 梁玉, 郭立新. 气泡/泡沫覆盖粗糙海面电磁散射的修正双尺度法研究 [J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6158-6166.
LIANG Yu, GUO Lixin. Study of the electromagnetic scattering from the rough sea surface with bubbles/foams by the modified two-scale method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6158-6166.
- [4] 亓晓, 韩香娥. 覆盖泡沫粗糙海面的激光散射特性研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 1-7.
QI Xiao, HAN Xiang'e. Study of laser scattering characteristics of rough sea surface with foams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 1-7.
- [5] 杨选春, 孙亮, 朱士青. 地空导弹武器系统超低空高抛弹道设计与仿真研究 [J]. *弹舰与制导学报*, 2010, 30(3): 47-52.
YANG Xuanchun, SUN Liang, ZHU Shiqing. Study of super low level high parabolic trajectory design and simulation of ground-to-air missile weapon system [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(3): 47-52.
- [6] 焦培南, 张忠治, 雷达环境与电波传播特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 77-94.
- [7] ROGER D. DE R. Bistatic specular scattering from rough dielectric surfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(2): 220-231.
- [8] DENNIS B. A model for Brewster angle damping and multipath effects on the microwave radar sea echo at low grazing angles [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997(9), 35(5): 1232-1244.
- [9] 李宁, 张民, 王欣, 等. 船海复合场景面元化快速电磁建模方法及 SAR 成像仿真 [J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(4): 90-95.
LI Ning, ZHANG Min, WANG Xin, et al. Facet-based rapid electromagnetic modeling and SAR imaging for composite ship-sea scene [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(4): 90-95.
- [10] BARRICK D. Rough surface scattering based on the specular point theory [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1968, 16(4): 449-454.
- [11] MEISSNER T, WENTZ J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1836-1849.
- [12] SIHVOLA A H, KONG J A. Effective permittivity of dielectric mixtures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(4): 420-429.
- [13] KUANG K, CHANG M. The model and application of sea electromagnetic scattering [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(5): 34-44.
- [14] BASS F G, FUKS I M. Wave scattering from statistically rough surfaces [M]. Oxford, UK: Pergamon Press, 1979: 418-442.
- [15] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave remote sensing [M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Addison-Wesley, 1982: 81-87.
- [16] BOURLIER C, BERGIN G, SAILLARD J. One-and two-dimensional shadowing functions for any height and slope stationary uncorrelated surface in the monostatic and bistatic configurations [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(3): 312-324.
- [17] SMITH M H, PARK P M, CONSTERDING I E. Marine aerosol concentration and estimated fluxes over the sea [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, 119(512): 809-824.
- [18] MONAHAN E C, O' MUIRCHEARTAIGH I C. Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(5): 627-642.
- [19] VORONOVICH A G, ZAVOROTNI V U. Theoretical model for scattering of radar signals in Ku-and C-bands from a rough sea surface with breaking waves [J]. *Waves Random Media*, 2001, 11(3): 247-269.

(编辑 刘杨)