

海面与下方复杂目标复合散射的 MOM 研究

薛钰川 任新成

(1. 延安职业技术学院 机电工程系 延安 716000; 2. 延安大学 物理与电子信息学院 延安 716000)

摘要: 基于实际海面与下方目标的复合散射在海洋工程、辐射定标及水下目标探测等方面的应用需求,采用改进的一维分形模型模拟实际海面,运用矩量法研究了海面与其下方梯形截面柱体目标的复合电磁散射特性,借助数值计算获得复合散射系数随散射角变化的曲线,详细讨论了海面风速、海面的分维数、海水温度、目标物的尺寸和深度及入射波的频率对复合散射系数的影响。结果表明,海面风速、分维数、入射波的频率对复合散射系数的影响明显,海水温度、目标物的尺寸及深度对复合散射系数的影响较小。

关键词: 改进的分形海面模型;目标复合散射;矩量法(MOM)

中图分类号: O451 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.40

Study on composite scattering of the sea surface and the complex target below of it by using the Method of Moments

Xue Yuchuan Ren Xincheng

(1. Department of Electrical and Mechanical Engineering, Yan'an Vocational and Technical College, Yan'an 716000, China;

2. School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: The application based on composite scattering of the actual sea surface with the target below of it demand in ocean engineering, radiation calibration and underwater target detection etc. The application based on composite scattering of the actual sea surface with the target below of it demand in ocean engineering, radiation calibration and underwater target detection etc. The improved one-dimensional fractal model is adopted to simulate the actual sea surface, the method of moments is used to study the composite electromagnetic scattering about the sea surface and the trapezoidal cross-section cylinder target beneath it, the curve is obtained by numerical calculation about the complex scattering coefficient changes with the scattering angle, the impact on the composite scattering coefficient is discussed in detail about the surface wind speed, the surface fractal dimension, water temperature, the size and depth of the target and the frequency of the incident wave, the result show that the influence of the surface wind speed, the fractal dimension and the frequency of the incident wave are obvious to the composite scattering coefficient, that the water temperature, the size and depth of the target coefficient have little effect on it.

Keywords: the improved sub-surface model; target composite scatter; method of moments

1 引言

地球表面约有70%的面积被海洋所覆盖,海洋的战略地位备受各国关注^[1]。随着海洋渔业的发展、海洋能源的开发及海洋工程的建设等,对粗糙海面背景与其下方目标复合电磁散射特性的研究就更成为了学者们研究的热点问题。其基本思想是用电磁波照射在物体(面与目标)上,被物体散射后,对散射回波进行反演^[2]获得有用的信息。但对于实际海面如果采用传统的蒙特卡罗法^[3]与经典的带限 Weierstrass 分形模型模拟,其表面轮廓函数与空间波数只满足负幂律关系,而实际的海面不仅满足负幂律谱,还要满足正幂律谱,采用改进的分

形海面模型就能反映整个海面的完全谱^[4];矩量法(MOM)是基于各种微分与积分方程电磁数值方法中的一种,它能充分考虑到面和目标间的所有耦合作用,对复合散射的求解能得到精准的数值解。对于电大尺寸目标电磁散射特性的 MOM 研究,基于目标元感应电流的耦合关系由矩阵元素来反映,可极大地减小内存占用量和计算时间,其优势就更为突出。为此,本文采用矩量法来研究海面与其下方复杂旋转梯形截面柱体目标的复合电磁散射特性,在 TE、TM 波入射情况下,分别讨论海面参数、目标参数及入射波参数对复合散射系数的影响情况,总结出较为精准的数值结果,希望能为相关的实际

问题解决和后续研究提供一些数值参考。

2 海面模型及其介电常数的计算

2.1 改进的一维分形海面模型^[3]

$$z(x, t) = \delta \eta \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} a^{-(D-\delta)m} \cos[K_0 a^m (x + v_x t) + \omega_m t + \beta_m] + \sum_{n=0}^N b^{(D-2)n} \cos[K_0 b^n (x + v_x t) + \omega_n t + \varphi_n] \right\} \quad (1)$$

式中： $\delta, \eta, D(1 < D < 2), \xi, K_0, a(a < 1)$ 与 $b(b > 1)$ 分别表示高度起伏均方根、归一化因子、分维数、正幂律因子、空间波数、空间波数小于与大于基频时的尺度因子， β_m, φ_m 是在 $[-\pi, \pi]$ 内满足均匀分布的随机相位， v_x 是观测者的速度， M, N 均为求和次数。

风驱海面下，海面的空间波数、起伏均方根与风速满足下述特定关系^[4]：

$$\delta = 0.03498 \frac{U_{19.5}^2}{4} \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{0.877^2 g}{U_{19.5}^2} \quad (3)$$

距离海面的高度为 19.5 m 处的风速用 $U_{19.5}$ 来表示。为与 PM 海谱拟合的更好，限定 $\xi = 2.9, b = 1.015, a = \frac{1}{b}, M = N = 400$ 。

2.2 海水的介电常数计算

海水的介电常数可视为海水盐度、温度及入射电磁波频率的函数^[5]，表式为：

$$\epsilon(S, T, \omega) = \epsilon_\infty(S, T) + \frac{\epsilon_1(S, T) - \epsilon_\infty}{1 - i\omega\tau(S, T)} - \frac{i\sigma(S, T)}{\omega\epsilon_0} \quad (4)$$

式中： $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}, \epsilon_\infty = 4.9, \omega = 2\pi f, \epsilon_1, \tau, \sigma$ 与温度 $T(^\circ\text{C})$ 和盐度 $S(\frac{0}{00})$ 的关系表达式分别为：

$$\epsilon_1(S, T) = (87.134 - 0.1949T - 0.01276T^2 + 0.0002491T^3)(1 + 1.613 \times 10^{-5}TS - 0.003656S + 3.21 \times 10^{-5}S^2 - 4.232 \times 10^{-7}S^3)$$

$$\tau(S, T) = (1.768 \times 10^{-11} - 6.086 \times 10^{-13}T + 1.104 \times 10^{-14}T^2 - 8.111 \times 10^{-17}T^3)(1.0 + 2.282 \times 10^{-5}TS - 7.638 \times 10^{-4}S - 7.760 \times 10^{-6}S^2 + 1.105 \times 10^{-8}S^3)$$

$$\sigma(S, T) = S(0.182521 - 0.00146192S + 2.09324 \times 10^{-5}S^2 - 1.28205 \times 10^{-7}S^3) \times \exp\{(T - 25)(0.02033 + 0.0001266(25 - T) + 2.464 \times 10^{-6}(25 - T)^2 - S[1.849 \times 10^{-5} - 2.551 \times 10^{-7}(25 - T) + 2.551 \times 10^{-8}(25 - T)^2])\}$$

3 粗糙面与下方目标复合散射的矩量法理论

3.1 土壤面与下方目标复合电磁散射 (已知条件如图 1 所示) 的积分方程^[4]为：

$$\frac{1}{2}\psi_0(r) = \psi_m(r) + \int_{S_s} [\psi_1(r') \frac{\partial G_0(r, r')}{\partial n'} - G_0(r, r') \times$$

$$\frac{\partial \psi_0(r')}{\partial n'}] ds \quad r \in S_r \quad (5a)$$

$$\frac{1}{2}\psi_1(r) = - \int_{S_s} [\psi_1(r') \frac{\partial G_1(r, r')}{\partial n'} - G_1(r, r') \frac{\partial \psi_1(r')}{\partial n'}] ds - \int_{S_o} \psi_1(r') \frac{\partial G_1(r, r')}{\partial n'} ds \quad r \in S_r \quad (5b)$$

$$\frac{1}{2}\psi_1(r) = - \int_{S_s} [\psi_1(r') \frac{\partial G_1(r, r')}{\partial n'} - G_1(r, r') \frac{\partial \psi_1(r')}{\partial n'}] ds - \int_{S_o} \psi_1(r') \frac{\partial G_1(r, r')}{\partial n'} ds \quad r \in S_o \quad (5c)$$

上、下空间的格林函数分别为：

$$G_0(r, r') = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_0 |r - r'|) \quad (6a)$$

$$G_1(r, r') = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1 |r - r'|) \quad (6b)$$

当场点 r 在粗糙土壤表面上，磁场满足边界条件为：

$$\psi_0(r) = \psi_1(r) \quad r \in S_r \quad (7a)$$

$$\frac{\partial \psi_0(r)}{\partial n} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi_1(r)}{\partial n} \quad r \in S_r \quad (7b)$$

二维空间格林函数的梯度函数为：

$$\frac{\partial G(r, r')}{\partial n'} = \frac{ik}{4} n \cdot \frac{r - r'}{|r - r'|} H_1^{(1)}(k |r - r'|) \quad (8)$$

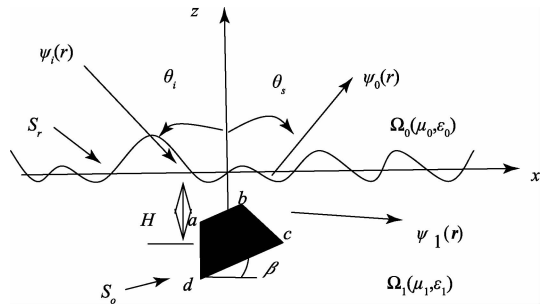


图 1 土壤面与下方目标复合散射的示意

3.2 矩阵方程的建立

在 $[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}]$ 上把粗糙面轮廓沿 x 轴离散，平均分为 N_s 段，则每一段长度为 $\Delta x = \frac{L}{N_s}$ ，每段中点的坐标为 $x_m = (m - 0.5)\Delta x$ ，其中 $m = 1, 2, \dots, N_s$ 。同时用 N_o 等分柱体表面，每段等分长度为 $\Delta C_o = \frac{4ab}{N_o}$ 。利用矩量法离散耦合积分方程得到矩阵方程为：

$$\begin{bmatrix} A & B & 0 \\ C & -\rho D & E \\ F & -\rho G & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $V_1(x) = \psi_0(r), V_2(x) = \frac{\partial \psi_0(r)}{\partial n} \quad r \in S_r$ 分别为粗糙面的磁场和电场， $V_3(x) = \psi_1(r) \quad r \in S_o$ 为目标磁场。4 个 $N_s \times N_s$ 块矩阵 A, B, C, D 均与目标无关，具体表示^[6]为：

$$A_{mm} =$$

$$\begin{cases} -\gamma_n \Delta x \frac{ik_0}{4} (n \cdot r) H_1^{(1)}(k_0 | r_m - r_n |) & m \neq n \\ \frac{1}{2} - \frac{Z''(x_m) \Delta x}{4\pi\gamma_m^2} & m = n \end{cases} \quad (10a)$$

$$B_{mm} = \begin{cases} \gamma_n \Delta x \frac{i}{4} H_1^{(1)}(k_0 | r_m - r_n |) & m \neq n \\ \gamma_m \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)} \left[\frac{k_0 \Delta x \gamma_m}{(2e)} \right] & m = n \end{cases} \quad (10b)$$

$$C_{mm} = \begin{cases} \gamma_n \Delta x \frac{ik_1}{4} (n \cdot r) H_1^{(1)}(k_1 | r_m - r_n |) & m \neq n \\ \frac{1}{2} + \frac{Z''(x_m) \Delta x}{4\pi\gamma_m^2} & m = n \end{cases} \quad (10c)$$

$$D_{mm} = \begin{cases} \gamma_n \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1 | r_m - r_n |) & m \neq n \\ \gamma_m \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)} \left[\frac{k_1 \Delta x \gamma_m}{(2e)} \right] & m = n \end{cases} \quad (10d)$$

式中: $e = 2.171\ 828\ 138$, $Z'(x)$ 、 $Z''(x)$ 分别表示高度起伏函数 $Z(x)$ 的一、二阶导数, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, $k_1 = \omega \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}$, $\gamma_n = \sqrt{1 + [Z'(x_n)]^2}$, $\gamma_m = \sqrt{1 + [Z'(x_m)]^2}$, $n = \frac{-Z'(x_n)x + z}{\sqrt{1 + [Z'(x_n)]^2}}$, $r = \frac{r_m - r_n}{|r_m - r_n|}$ 。

反映面与目标耦合作用的 E, F, G 分别为 $N_s \times N_o$ 、 $N_o \times N_s$ 、 $N_o \times N_s$ 块矩阵, 其具体表达式为:

$$E_{mp} = \gamma_{op} \Delta x \frac{ik_1}{4} (n_o \cdot r_{mp}) H_1^{(1)}(k_1 | r_m - r_{op} |) \quad (10e)$$

$$F_{qn} = \gamma_n \Delta x \frac{ik_1}{4} (n \cdot r_{qn}) H_1^{(1)}(k_1 | r_{oq} - r_n |) \quad (10f)$$

$$G_{qn} = -\gamma_n \Delta x \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1 | r_{oq} - r_n |) \quad (10g)$$

仅由目标信息决定的 J 为 $N_o \times N_o$ 块矩阵, 具体表达式为:

$$J_{qp} =$$

$$\begin{cases} \gamma_{op} \Delta x \frac{ik_1}{4} (n_o \cdot r_{qp}) H_1^{(1)}(k_1 | r_{oq} - r_{op} |) & q \neq p \\ \frac{1}{2} + \frac{Z''_o(x_{op}) \Delta x}{4\pi\gamma_{op}^2} & q = p \end{cases} \quad (10h)$$

式中: $Z'_o(x)$ 和 $Z''_o(x)$ 分别表示埋藏目标的表面轮廓函数的一、二阶导数, $\gamma_{op} = \sqrt{1 + [Z'_o(x_{op})]^2}$, $n_o = \frac{-Z'_o(x_{op})x + z}{\sqrt{1 + [Z'_o(x_{op})]^2}}$, $r_{mp} = \frac{r_m - r_{op}}{|r_m - r_{op}|}$, $r_{qn} = \frac{r_{oq} - r_n}{|r_{oq} - r_n|}$, $r_{qp} = \frac{r_{oq} - r_{op}}{|r_{oq} - r_{op}|}$ 。

3.3 复合散射系数的计算

利用共轭梯度法求解矩阵方程可得 $V_1(x)$ 、 $V_2(x)$, 则上半空间散射场的表达式为:

$$\psi_s(r) = \frac{e^{ik_s r}}{\sqrt{r}} \psi_s^N(\theta_s, \theta_i) \quad (11)$$

在双站散射截面的计算中, 要将 r 放置远场观察, $k_s = k(x \sin \theta_s + z \cos \theta_s)$ 为观察方向的波矢量, 则有:

$$\psi_s^N(\theta_s, \theta_i) = \frac{i}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0}} e^{-i\pi} \int_{S_1} \{V_1(x) ik_0 [Z(x) \sin \theta_s - \cos \theta_s] - V_2(x) \sqrt{1 + [Z(x)]^2}\} \cdot \exp(-ik_s \cdot r) dx \quad (12)$$

当锥形波入射时, 归一化粗糙面与下方目标复合的电磁散射系数^[7]为:

$$\sigma_H(\theta_s) = \frac{|\psi_s^N(\theta_s)|^2}{g \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cos \theta_i \left[1 - \frac{1 + 2 \tan^2 \theta_i}{2(k_0 g \cos \theta_i)^2} \right]} \quad (13)$$

则一维指数粗糙面与下方导体目标复合散射的散射系数为:

$$\sigma = \log_{10} \sigma_H(\theta_s) \quad (14)$$

4 数值计算结果及复合电磁散射特性分析

计算中, 取入射波的频率 $f = 1.0$ GHz, 入射角 $\theta_i = 30^\circ$, 粗糙面长度 $L_x = 160\lambda$, 锥形波的宽度因子 $g = \frac{L}{4}$, 目标尺寸 $ab = 4.0\lambda$, $bc = 8.0\lambda$, 海水温度 $T = 20^\circ\text{C}$, $\xi = 2.9$, $b = 1.015$, $a = \frac{1}{b}$, $M = N = 400$, 分形海面沿 x 轴划分为 1 600 个网格点, 目标沿其表面划分为 100 个网格点, 所有计算结果都是以 50 个粗糙面作为统计样本并取均值后得到的。

4.1 算法验证

为验证糙面与下方目标复合电磁散射矩量法的有效性, 取 $\delta = 0.1\lambda$, $l = 2.0\lambda$, $m_v = 0.1$ g/cm³, 用指数型粗糙地面和其下方梯形截面柱目标的复合散射数值结果与纯粗糙面的数值结果相对照如图 2 所示。当目标 ($ab = 10^{-8}\lambda$, $cd = 2 \times 10^{-8}\lambda$, $H = 100\lambda$) 退化后, 两者的数值结果吻合得很好, 由此可以证明矩量法的准确性。在下面的讨论中复合散射系数随散射角变化的图 (a) 与 (b) 分别表示 TE、TM 波的入射情况。

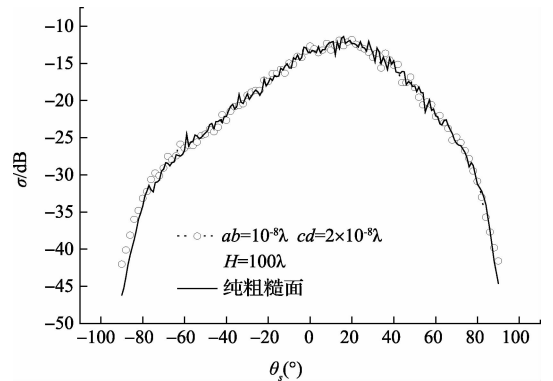


图 2 矩量法的验证

4.2 复合散射系数随海面风速的变化

取 $D = 1.1$, $H = 3.0\lambda$, $f = 1.0$ GHz, $T = 20^\circ\text{C}$ 时,

计算海水的等效介电常数为 $\epsilon=75.15+56.69i$, 在 TE、TM 波入射情形下, 改变海面风速的值, 观察复合散射系数随之变化的情况如图 3 所示。对照可以看出, 对于 TE、TM 波入射都有: 在散射角的大部分范围内, 海面的复合散射系数会随海面风速的增大而增大, 而在镜向上它却随海面风速的增大而减小。原因就在于海面风速越大, 海面的粗糙度就越大, 致使相干散射减小, 非相干散射增强。另外, 在大散射角范围内, TE 波的复合散射系数较 TM 波的小。

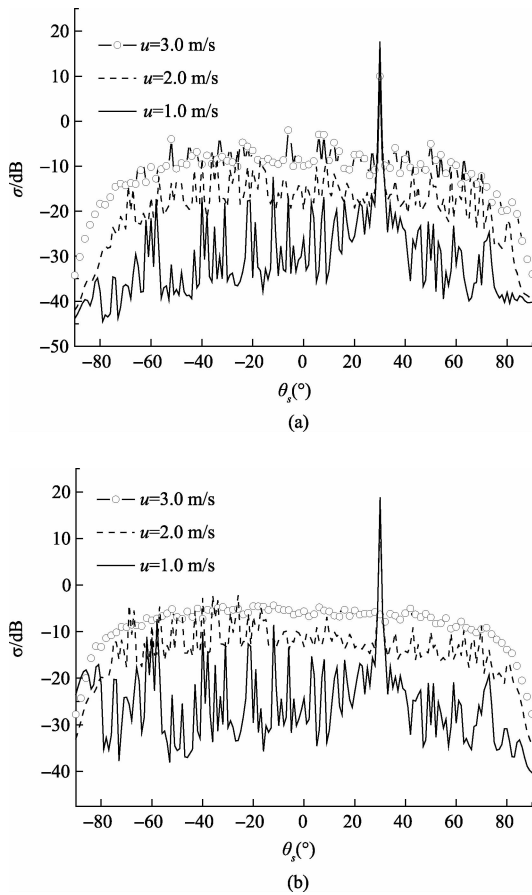


图3 海面风速对复合散射系数的影响情况

4.3 复合散射系数随分维数的变化

计算中, $u=2\text{ m/s}$, $H=3.0\lambda$ 海水的介电常数 $\epsilon=75.15+56.69i$ 。在 TE、TM 波入射情形下, 改变分维数的值, 观察复合散射系数随之变化的情况如图 4 所示。对照可以看出, 对于 TE、TM 波入射均有: 在镜向附近的小范围内, 海面的复合散射系数会随分维数的增大而增大, 但在镜向上复合散射系数几乎不随其变化。原因在于分维数增大, 海面的纵向高度起伏不变, 但海面轮廓的细微结构粗糙度增

大, 致使非相干散射增强。另外, 在大散射角范围内, TM 波的复合散射系数随散射角变化曲线的振荡幅度较 TE 波的大, 且复合散射系数的幅度也大。

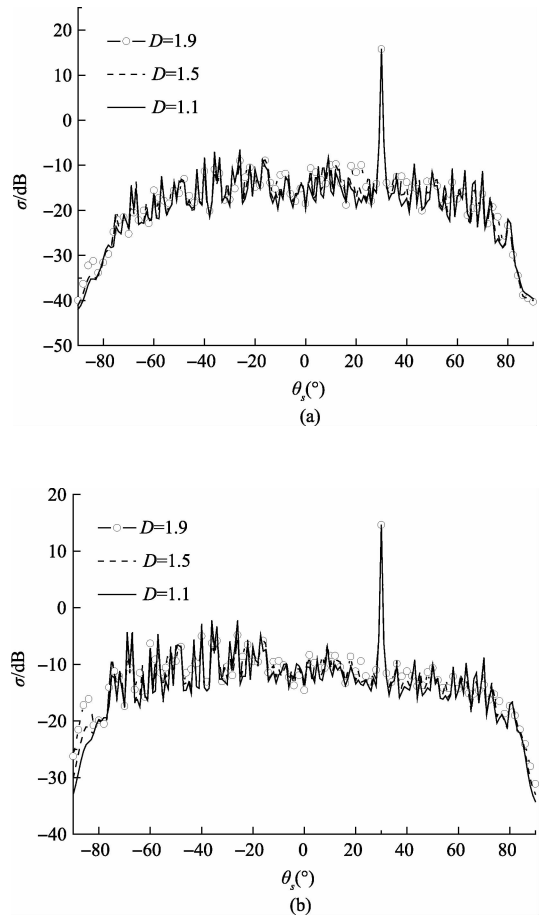


图4 分维数对复合散射系数的影响

4.4 复合散射系数随目标深度的变化

计算中, $u=2\text{ m/s}$, $D=1.1$, 海水介电常数为 $\epsilon=75.15+56.69i$, 在 TE、TM 波入射情形下, 改变目标深度的值, 观察复合散射系数随之变化的情况如图 5 所示。对照可以看出, 无论 TE 还是 TM 波入射, 总体来说, 复合散射系数随目标深度的变化很小。原因就在于海水的盐含量大, 等效介电常数的虚部比其他介质的都大, 电磁波在海水中衰减增强, 致使有效透射电磁波的强度较小。这就是航海领域通常采用声波探测海面下方目标的原因。还可得到, TE 波的复合散射系数随散射角变化曲线的振荡幅度比 TM 波的小, 而且在大散射角范围内, TE 波复合散射系数的幅度较 TM 波的小。

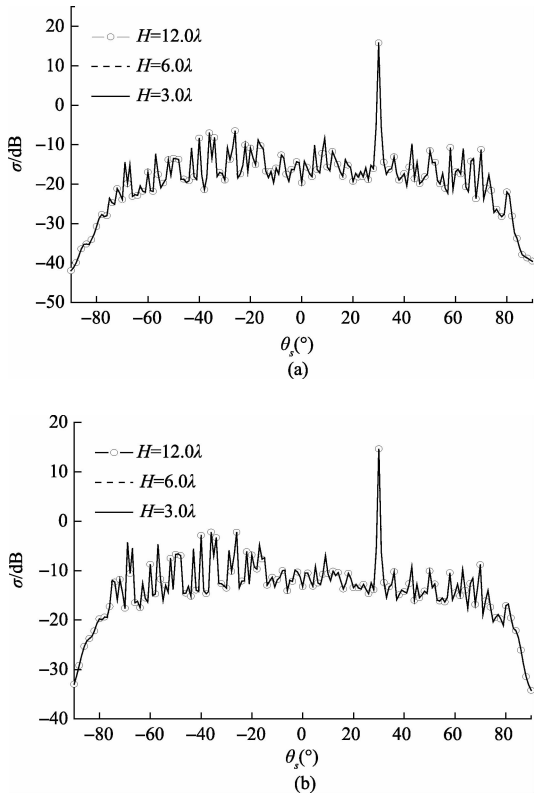


图5 目标深度对复合散射系数的影响

4.5 复合散射系数随目标尺寸的变化

计算中, $u = 2\text{m/s}$, $D = 1.1$, 海水的介电常数为 $\epsilon = 75.15 + 56.69i$ 。在 TE、TM 波入射情形下, 改变目标尺寸的值, 观察复合散射系数随之变化的情况如图 6 所示。对照可以看出, 对于 TE、TM 2 种情形, 无论目标多大, 复合散射结果差异并不是很大, 原因在于海水等效介电常数的虚部较大, 海水可看作高电导体, 有效透射到海面下方的电磁波强度减小, 致使复合散射系数几乎不随目标的变化而变化。另

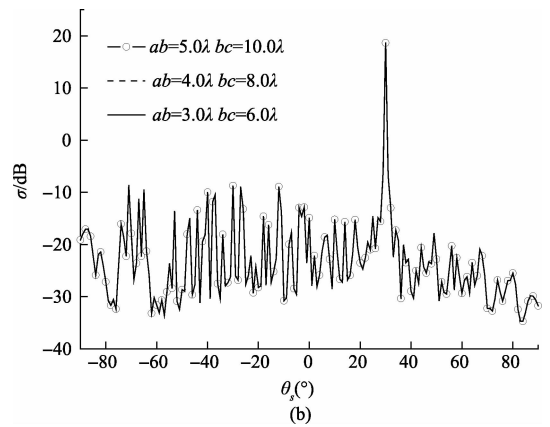
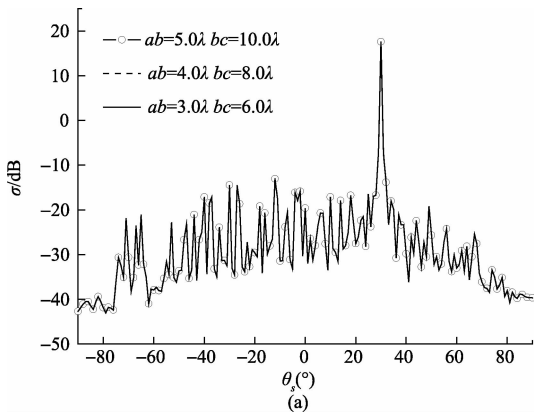
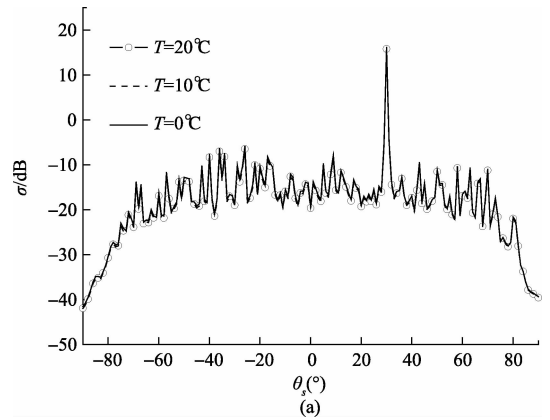
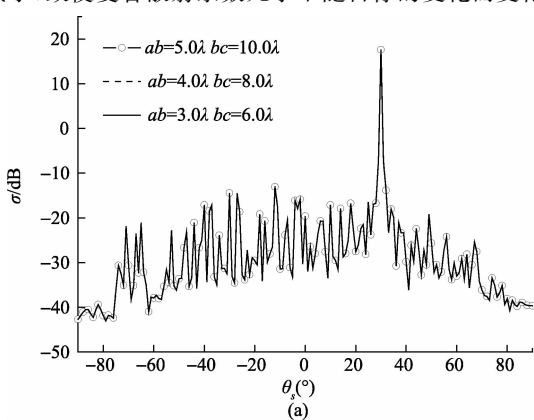


图6 目标尺寸对复合散射系数的影响

外, TE 波复合散射系数的幅度比 TM 波的小, 振荡幅度也小, 但在镜向方向 2 种情形的复合散射系数基本一致。

4.6 复合散射系数随海水温度的变化

计算中, $u = 2\text{m/s}$, $D = 1.1$, 目标高度 $H = 3.0\lambda$, 在 TE、TM 波入射情形下, 改变海水温度的值分别为 $T = 0^\circ$, $T = 10^\circ$, $T = 20^\circ$ 时计算其对应的等效介电常数分别为 $\epsilon = 80.80 + 77.11i$, $\epsilon = 78.49 + 54.86i$, $\epsilon = 75.15 + 56.69i$, 观察复合散射系数随海水温度变化的情况如图 7 所示。对照可以看出, 在 TE、TM 波入射情形下, 复合散射系数在大部分散射角范围内随海水温度的变化很小, 而在大散射角范围内, 复合散射系数随海水温度的增大而减小。总体上是因海水等效介电常数随温度变化的幅度很小, 导致复合散射系数在大部分散射角范围内几乎相等, 但海水等效介电常数的实部随海水温度的增加有较小幅度的减小, 致使海面的反射减弱, 复合散射系数减小。另外, 在大部分散射角范围内, TE 波的复合散射系数较 TM 波的小。



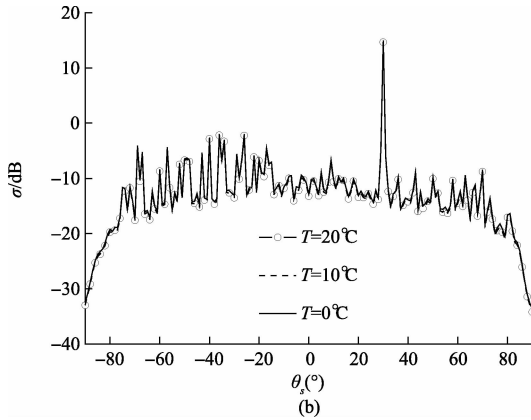


图7 海水温度对复合散射系数的影响

4.7 复合散射系数随入射波频率的变化

计算中, $u = 2\text{m/s}$, $D = 1.1$, 粗糙面的长度 $L = 48\text{m}$, 目标的高度 $H = 0.9\text{m}$, 尺寸 $ab = 1.2\text{m}$, $bc = 2.4\text{m}$, 在 TE、TM 波入射时, 改变其频率分别为 $f = 1.0\text{GHz}$, $f = 2.0\text{GHz}$, $f = 3.0\text{GHz}$, 计算对应的海水等效介电常数各为 $\epsilon = 75.15 + 56.69i$, $\epsilon = 74.28 + 34.53i$, $\epsilon = 72.99 + 29.60i$, 观察复合散射系数随入射波频率变化的情况如图8所示。对照可以看出, 对于 TE、TM 波入射都有: 在大部分散射角范围内, 复合散射系数随入射波频率的增大而增大。原因在于入射波的频率越大, 海面的相对粗糙度就越大, 致使相干散射减小, 非相干散射增强。

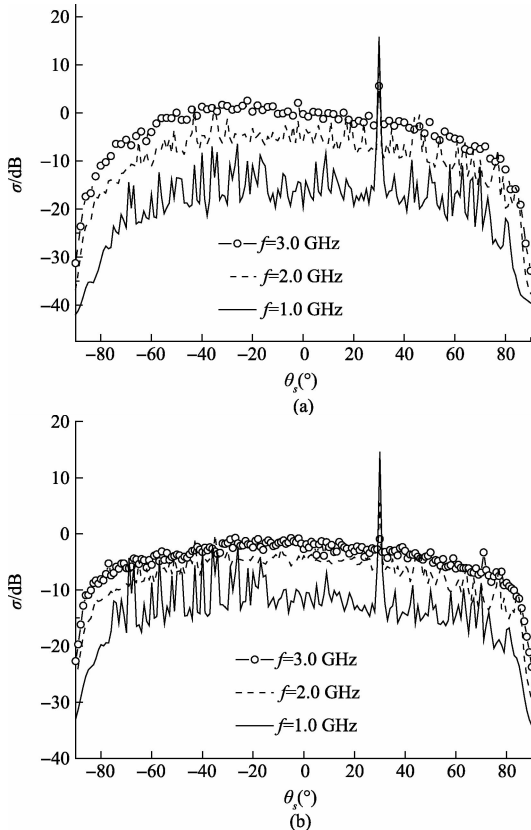


图8 入射波频率对复合散射系数的影响

5 结 论

应用矩量法充分考虑了糙面与目标各自独立的散射及两者间的所有耦合散射, 采用改进的一维分形海面模型既接近实际海面又能反映其细微结构, 通过数值计算得到了 TE、TM 2 种波入射情形下复合散射系数的角分布曲线, 讨论了海面风速、海水温度、海面分维数、目标尺寸和深度及入射波的频率对复合散射系数的影响。结果表明, 海面风速、分维数、入射波频率对复合散射系数的影响明显, 而海水温度、目标尺寸及目标深度对复合散射系数影响较小; TE 波的复合散射系数比 TM 波的小。数值结果只是在一维情况下总结得出的, 对于二维及更为复杂的动态背景下的目标跟踪^[8-9]复合散射情况还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 任新成, 郭立新. 基于改进二维分形海面模型的分层海面电磁散射分析[J]. 上海航天, 2009(4): 1-2.
- [2] 何艳丽, 黄飞龙. 地波雷达在海面风场探测的应用[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 80-82.
- [3] 洪伟伟, 王玲妹, 谢昭, 等. 光在云层中的传输特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 522-523.
- [4] 田炜. 改进的分形海面及其上方目标复合散射研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 55-58.
- [5] 任新成, 郭立新. 改进的一维分形海面模型在分层海面电磁波透射问题中的应用[J]. 海洋通报, 2009, 28(2): 12-13.
- [6] 王春刚, 冯文全, 李春升. 二维分形海面电磁后向散射系数的分析与计算[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(9): 1214-1215.
- [7] 田炜, 任新成. 指数型粗糙面与全埋目标的复合电磁散射研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(4): 39-40.
- [8] 田炜, 任文祥, 杨小桐. 海面与上方目标复合电磁散射的矩量法研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(8): 31-34, 45.
- [9] 王栋, 朱虹, 康凯, 等. 基于背景补偿引导的动态场景下目标跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1433.

作者简介

薛钰川, 1976 年出生, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为课程教学与物理理论。

E-mail: yajdgc@163.com