

# 覆盖泡沫粗糙海面的激光散射特性研究

亓 晓 韩香娥

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

**摘要** 对潜通信及对潜探测中蓝绿激光将穿透海水表面, 大气/海水界面由于风速及其他外力作用而呈现复杂状况, 将影响蓝绿激光在界面的传输特性。针对泡沫-海面复合模型, 采用矢量辐射传输理论、米氏理论以及粗糙面散射理论对泡沫海面的散射特性进行了分析。采用基尔霍夫近似针对 JONSWAP 海谱, 讨论了泡沫海面在蓝绿激光波段的后向散射系数与入射角、风速、风区以及海水温度、含盐度等参量的关系。结果表明: 随着海面上方风速、风区及介电常数的增大, 泡沫层对海面的激光散射具有相当大的影响, 尤其是在入射角度较大的状态下。

**关键词** 散射; 矢量辐射传输; 米氏理论; 粗糙海面; 蓝绿激光

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0829003

## Study of Laser Scattering Characteristics of Rough Sea Surface with Foams

Qi Xiao Han Xiang'e

School of Physics and Optical Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** The blue-green laser penetrates the sea surface in submarine communication and detection, and its propagation through atmospheric-sea characteristics is influenced by wind speed and other acting force. Based on the volume-surface composite model of rough sea surface with foam layer driven by wind, the rough surface scattering theory, Mie theory and vector radiative transfer (VRT) theory, the laser scattering characteristics of rough sea surface are analyzed. Using Kirchhoff approximation for the JONSWAP spectrum, the dependence of the backscattering coefficient of the sea surface on the incident angle, the wind speed, the wind area, as well as the temperature and salinity are discussed. The results suggest that foam layer has a considerable effect on the scattering characteristics especially at large incident angle, with the increasing wind speed, wind area and the dielectric constant.

**Key words** scattering; vector radiative transfer; Mie theory; rough sea surface; blue-green laser

**OCIS codes** 290.1350; 010.5620; 240.6700; 140.7300

## 1 引 言

随着激光雷达在民用和军事等领域的广泛应用, 海面激光散射特性作为目标与环境光学特性的重要组成部分, 越来越受到人们的重视。从激光对潜通信、激光探测到激光海面漫反射通信, 海面的激光散射特性对应用系统性能产生极大的影响。实际中风速达到一定程度时海面会出现泡沫, 气泡在上层海洋无处不在, 已有研究基于泡沫颗粒米氏散射理论、海水中的光辐射传输模拟表明, 海面上层气泡对光散射有重要贡献。

在模拟海面的电磁散射实验研究中, 建立一种适合我国海情的海面模型具有重要意义, 现阶段海谱主

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-03-20

作者简介: 亓 晓(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事大气到海水蓝绿激光传输特性方面的研究。

E-mail: XiaoQi\_grace@163.com

导师简介: 韩香娥(1962—), 女, 博士, 教授, 主要从事光传输、散射方面的研究。

E-mail: xehan@mail.xidian.edu.cn(通信联系人)

要有 Neumann 谱、PM 谱、A.K.Fung 谱、联合：北海波浪计划(JONSWAP)谱、文氏谱等<sup>[1]</sup>,其中,PM 谱和 JONSWAP 谱是国际上最常使用的海谱,本文考虑我国海情选用 JONSWAP 谱。同时,对于实际海面泡沫而言,是由多个球型水泡粒子组成,计算时需考虑海面泡沫的分布,本文采用文献[7]给出的满足伽马分布的泡沫模型。

微波段,麻省理工大学在 Manahan 等<sup>[2]</sup>的基础上提出了将泡沫视为随机气泡层,国内郭立新等<sup>[3]</sup>针对动态粗糙海面电磁散射提出了双尺度法,金亚秋<sup>[4]</sup>首次将电磁散射与矢量辐射传输理论结合,利用双尺度方法计算了含泡沫海面的散射系数,以上为海面微波散射的研究提供了较为系统的理论。

可见光波段,国外利用辐射传输理论研究了风速对海面反射率的影响,考虑大气和海面的耦合<sup>[5-6]</sup>;国内,王新涛等<sup>[7]</sup>研究了粗糙海面对掠入射激光的散射特性,司立宏等<sup>[8]</sup>研究了激光通过海水-空气界面的反射、折射及能量透射率,均未考虑泡沫影响。目前粗糙海面在蓝绿光波段的散射研究较少,泡沫海面的散射特性未见相关报道。

与微波段相比,海水对蓝绿光波段的吸收较小,不能沿用微波段介电模型;对通常海面而言,海面的平均曲率半径远大于入射波长,因此微波段双尺度法不再适用;本文中泡沫视为外层水膜、内层空气核的分层球粒子,尺寸通常介于微米至毫米量级,与泡沫尺寸相比,蓝绿波长极短,在采用矢量辐射方程计算时,与微波段采用 Rayleigh 近似不同,采用米氏理论计算。

本文将粗糙面散射和离散粒子的体散射结合起来,运用粗糙面散射理论、矢量辐射传输理论(VRT)和米氏散射理论,结合蓝绿激光波段海水介电模型,考虑粗糙海面的散射、泡沫粒子的多次散射以及粗糙海面与泡沫粒子之间的耦合散射,辨别泡沫的微结构,并联系实际海况时的泡沫覆盖率,分析了覆盖泡沫海面的激光散射特性。

## 2 蓝绿激光波段的海水媒质特性

在研究电磁波与海面的相互作用中,海水的介电常数是一个非常重要的参数,它通常是波长(频率)、海水温度和含盐度的函数。微波段通常采用 Dybe 模型,但由于波长以及海水吸收特性的不同,此模型不再适用于蓝绿光波段。

1995年,Quan 等<sup>[9]</sup>在之前所有实验数据的基础上,总结出了海水折射率  $n$  的经验方程为海水温度、含盐度和入射波长的函数:

$$n(S, T, \lambda) = n_0 + (n_1 + n_2 T + n_3 T^2)S + n_4 T^2 + \frac{n_5 + n_6 S + n_7 T}{\lambda} + \frac{n_8}{\lambda^2} + \frac{n_9}{\lambda^3}, \quad (1)$$

式中  $S$  为海水含盐度( $0\% < S < 3.5\%$ ),  $T$  为海水的温度( $0\text{ }^\circ\text{C} < T < 30\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\lambda$  表示波长( $400\text{ nm} < \lambda < 700\text{ nm}$ ),  $n_0 \sim n_9$  为经验参数,具体值详见文献[9],在此不再赘述。早在 1963 年,人们就发现海水对蓝绿激光的吸收最少,目前可穿透海水至 500 m,因此忽略海水折射率的虚部。已知入射波长的情况下,通过测量海水温度及含盐度,就可以通过  $n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$  算得海水的介电常数,其中  $\mu_r$  和  $\varepsilon_r$  分别为海水相对磁导率和介电常数。

## 3 大气/海水界面的激光散射

### 3.1 JONSWAP 海谱

JONSWAP 谱是英国、荷兰、美国、德国等为了适应北海开发的需要于 1968~1969 年在丹麦、德国边境西海岸对海浪进行系统观测得到的,即 JONSWP,它是迄今为止对海浪最为系统的观测,是一种非稳态海谱模型,其一维形式为<sup>[10]</sup>

$$S(\omega) = \alpha g_c^2 \frac{1}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2 \omega_0^2}\right]}, \quad (2)$$

式中  $g_c$  是重力加速度,  $\omega_0$  为峰频率,  $\gamma$  为峰升高因子(平均值为 3.3),  $\sigma$  为峰行参数,无因次常数  $\alpha = 0.076\bar{x}^{-0.22}$ , 无因次风区  $\bar{x} = g_c x / U_{10}^2$  ( $x$  为风区,  $U_{10}$  为 10 m 高度处的风速)。图 1、2 分别为不同风区及风速条件下, JONSWAP 谱随频率的变化规律。

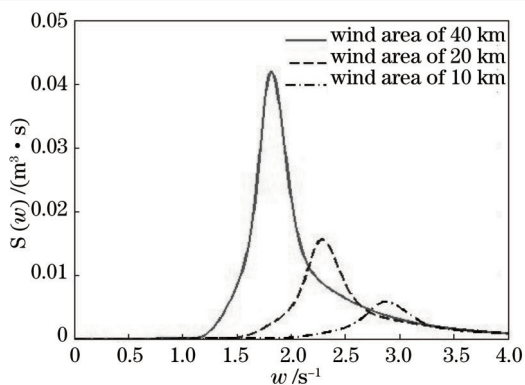


图1 风速为 5 m/s 时, JONSWAP 谱随风区的成长

Fig.1 Growth of JONSWAP spectrum versus wind area under wind speed of 5 m/s

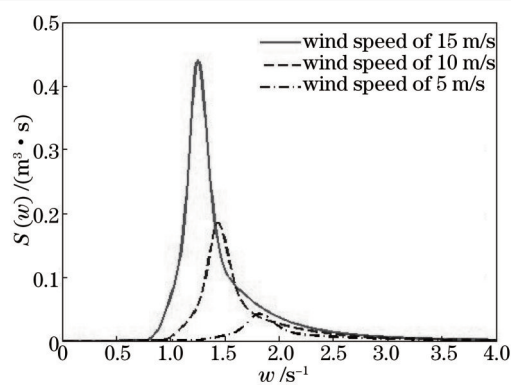


图2 风区为 20 km 时, JONSWAP 谱随风速的成长

Fig.2 Growth of JONSWAP spectrum versus wind speed under wind area of 20 km

由图 1、2 可知,随着风区、风速的增大,海面波动的低频分量在增大,能量向低频转移。也就是说,海面大尺度的起伏增大,浪高增大,而小尺度的毛细波的成分较少,但幅度较大尺度的变化要小。

### 3.2 粗糙海面的散射

在求解粗糙面散射问题中,经典的方法有基尔霍夫近似(KA)和微扰法,二者分别适用于粗糙度与入射波长相比很大或很小的条件下。对于通常海面而言,蓝绿激光波长极短,海面的平均曲率半径远大于入射波。因此,本文仅考虑单尺度波,采用基尔霍夫近似的方法来求解粗糙海面的散射系数。基尔霍夫近似又称为切平面近似,它是假设入射波好像射到与该点相切的一个无限大平面上,在表面的任何一点都产生平面界面的反射。

在海面上半空间散射时的双基地散射系数为<sup>[11]</sup>

$$\sigma_{pq}^r = \frac{(k_i q |U_{pq}|)^2}{q_z^4 \delta^2 |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{q_x^2 + q_y^2}{2q_z^2 \delta^2 |\rho''(0)|}\right], \quad (3)$$

式中  $k_i$  为波数,  $\delta$  为高度起伏均方根,  $\rho(\mathbf{R})$  为归一化相关函数( $\mathbf{R}$  为照射面中心到观测点的距离矢量),  $q$  为相位因子,  $q_x$ 、 $q_y$ 、 $q_z$  分别为相位因子分量,  $U_{pq}$  为与极化有关的系数。

### 3.3 覆盖泡沫的粗糙海面的矢量辐射传输方程

图 3 为覆盖泡沫的粗糙海面的示意图,泡沫层中的矢量辐射传输方程可表示为

$$\begin{aligned} \cos \theta_s \frac{d}{dz} \bar{I}(\theta_s, \varphi_s, z) &= -\bar{K}_e(\theta_s, \varphi_s) \cdot \bar{I}(\theta_s, \varphi_s, z) + \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi/2} d\theta' \times \sin \theta_s \cdot \bar{P}(\theta_s, \varphi_s, \theta', \varphi') \bar{I}(\theta', \varphi', z) + \\ &\bar{Q}(z, \theta_s, \varphi_s) - \cos \theta_s \frac{d}{dz} \bar{I}(\pi - \theta_s, \varphi_s, z) = -\bar{K}_e(\theta_s, \varphi_s) \bar{I}(\pi - \theta_s, \varphi_s, z) + \\ &\int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi/2} d\theta' \sin \theta_s \cdot \bar{P}(\pi - \theta_s, \varphi_s; \theta', \varphi') \times \bar{I}(\theta', \varphi', z) + \\ &\int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi/2} d\theta' \sin \theta_s \times \bar{P}(\pi - \theta_s, \varphi_s; \pi - \theta', \varphi') \cdot \bar{I}(\theta', \varphi', z) + \bar{Q}(z, \theta_s, \varphi_s), \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\theta_s$ 、 $\varphi_s$ 、 $\theta'$ 、 $\varphi'$  分别为散射角、散射方位角、入射角、入射方位角,  $\bar{I}(\theta_s, \varphi_s, z)$  是  $4 \times 1$  柱矢量,它包含缩减强度和漫射强度,  $\bar{K}_e$  是消光矩阵,  $\bar{Q}$  为海面下方的热发射源,在主动适量辐射传输理论中,波从上方空气中入射,故  $\bar{Q} = \mathbf{0}$ ,

$\bar{P}(\theta_s, \varphi_s, \theta', \varphi')$  是相矩阵,它包含粒子之间多次散射的耦合关系。可写为  $\bar{P}(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \begin{bmatrix} (v, v') & (v, h') \\ (h, v') & (h, h') \end{bmatrix}$ , 其中

$$\begin{aligned} (h, h') &= n_0 \int_0^{2\pi} d\phi' \left| \int_{\text{inh}}(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \right|^2 = n_0 \frac{8\pi}{k^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{n(n+1)} S_n^0(\cos \theta) S_n^0(\cos \theta') \right|^2 + \\ &n_0 \frac{16\pi}{k^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=m}^{\infty} [n(n+1)]^{-1} [A_n s_n^m(\cos \theta) t_n^m(\cos \theta') + B_n t_n^m(\cos \theta) t_n^m(\cos \theta')] \right\}^2, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $n_0$  为单位体积的泡沫层中的粒子个数,  $k$  为介质中的波数,  $A_n, B_n$  为散射系数,  $t_n^m, s_n^m$  为满足递推关系的函数<sup>[4]</sup>。

对于实际海面, 泡沫是由多个球形水泡粒子组成, 如图 3 所示,  $d$  为多泡沫粒子组成的泡沫层厚度, 计算其散射时需考虑海面泡沫的分布, 本文采用满足伽马分布的泡沫模型, 如图 4 所示。  $\varepsilon_a, \varepsilon_b$  分别为泡沫粒子外层和内层介质中的相对介电常数,  $b, a$  分别泡沫粒子的内外半径。单个泡沫的平均外半径  $a$  取为 250  $\mu\text{m}$ , 平均厚度取为 20  $\mu\text{m}$ , 泡沫层的平均厚度  $d$  取为 2 cm。利用米氏理论, 消光系数  $K_e$  和散射系数  $K_s$  分别为

$$K_e = -n_0 \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(A_n + B_n), \quad (6)$$

$$K_s = n_0 \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left[ |A_n|^2 + |B_n|^2 \right], \quad (7)$$

式中  $n_0$  与单位体积中散射泡沫粒子的所占的体积占空比  $f_s$  成正比, 即  $n_0 = f_s / (4\pi a^3 / 3)$ , 这里体积占空比  $f_s$  可表示为与 19.5 m 处的风速  $U_{19.5}$  的关系, 即  $f_s = [0.01 \exp(0.06 U_{19.5}) - 0.01] / d$ , 其中  $U_{19.5} > 2 \text{ m/s}$ 。

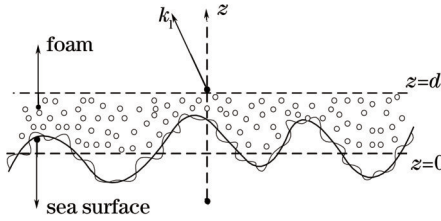


图 3 覆盖泡沫的粗糙海面

Fig.3 Rough sea surface with foams

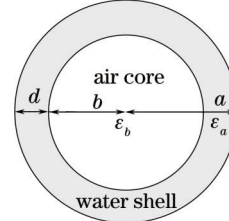


图 4 泡沫结构

Fig.4 Foam structure

根据文献[12], 含泡沫海面双站散射系数定义为

$$\sigma_{pq}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) = \frac{4\pi \cos \theta_s I_p(\theta_s, \phi_s)}{I_q(\theta_i, \phi_i)}, \quad (8)$$

式中  $I_p$  与  $I_q$  分别为散射强度及入射强度,  $\theta_i$  与  $\phi_i$  分别为入射角与入射角方位。首先通过米氏理论求解出单个粒子的散射结果, 继而利用常数变易法和边界条件, 将微分积分 VRT 方程解出, 运用迭代法解出各阶解<sup>[13]</sup>。进而得到含泡沫海面零阶散射系数  $\sigma_{pq(a)}^{(0)}$  和一阶散射系数  $\sigma_{pq(b)}^{(1)}, \sigma_{pq(c)}^{(1)}, \sigma_{pq(d)}^{(1)}$  及  $\sigma_{pq(e)}^{(1)}$ , 其各阶解表示的散射过程如图 5 所示, 它们分别表示图 5(a)~(e) 中的含泡沫海面散射过程。

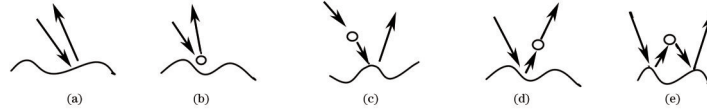


图 5 零阶解和一阶解的散射过程示意图

Fig.5 Scattering process schematic of the zero-order and the first-order solutions

图 5 所示过程详细公式见文献[13], 鉴于篇幅不在赘述。综合上述各过程, 可以得到泡沫覆盖区域的海面散射系数为

$$\begin{aligned} \sigma_{pq}^{\text{Foam}}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) &= \sigma_{pq(a)}^{(0)}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) + \sigma_{pq(b)}^{(1)}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) + \\ &\sigma_{pq(c)}^{(1)}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) + \sigma_{pq(d)}^{(1)}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) + \sigma_{pq(e)}^{(1)}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i). \end{aligned} \quad (9)$$

由于海面泡沫覆盖率不仅依赖于风速, 还依赖于风区和改变泡沫生存期的因子, 如水温、低层大气的热稳定性。不同的统计模型给出了不同的结果: 当气-海温差适中, 大气稳定时, 泡沫覆盖率  $C = 2.32 \times 10^{-6} U_{10}^{3.4988}$ ; 当气-海温差大于  $2^\circ\text{C}$  小于  $12^\circ\text{C}$ , 即大气处于非稳态时, 泡沫覆盖率  $C = 0.43 \times 10^{-6} U_{10}^{3.6824}$ ,  $U_{10}$  为海面上方 10 m 处的风速, 本文仅针对大气稳定时的覆盖率进行计算。

基于上述分析, 可以得到考虑了泡沫覆盖率的风驱海面的总散射系数为

$$\sigma_{pq}(\theta_i, \phi_i) = C \sigma_{pq}^{\text{Foam}}(\theta_i, \phi_i) + (1 - C) \sigma_{pq}^{\text{KA}}(\theta_i, \phi_i), \quad (10)$$

式中  $\sigma_{pq}^{\text{KA}}$  为利用 KA 计算的海面散射系数。

### 4 数值结果及分析

在这里取风速为 10 m/s,海水温度为 20 ℃,盐度为 3.5 ‰,微波段入射频率为 8.93 GHz,介电常数由 Dybe 公式算出为 46.236+i39.149;蓝绿光波段,采用水下通信常用波长 532 nm,粗糙度参数基于 JONSWAP 谱通过计算得到,介电常数由(1)式算出为 1.800。

图 6 为两个波段的后向散射系数随入射角的变化图,可以看出:蓝绿光波段的散射系数远小于微波段,主要因为与微波段相比,蓝绿激光在海水中的衰减很小、穿透力强,因此散射系数远远小于微波段。

图 7~9 为海水温度为 25 ℃、含盐度为 2‰、风向角为 320°等条件下的后向散射系数。图 7 为海面有无泡沫的条件下,后向散射系数随入射角的变化。入射角大于 30°,泡沫对散射的影响开始体现,由于泡沫粒子的体散射,降低了蓝绿光的穿透力,散射系数大于粗糙海面。

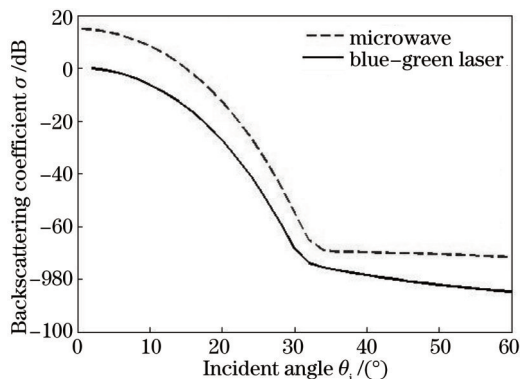


图 6 风区为 20 km 时,风速为 8 m/s 时,微波段与蓝绿光波段泡沫海面后向散射系数随入射角变化的仿真结果

Fig.6 Simulation results of backscattering coefficient with incident angle under wind area of 20 km, wind speed of 8 m/s and with foams

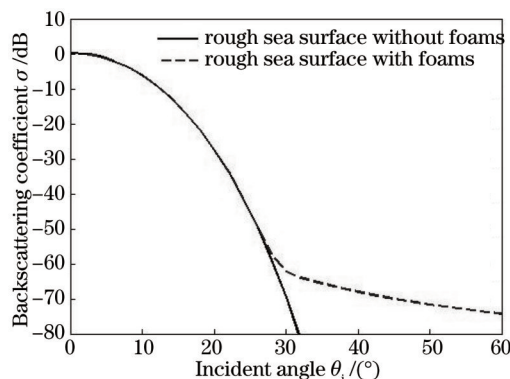


图 7 风区为 20 km 时,风速为 8 m/s 时,有无泡沫海面,后向散射系数随入射角变化仿真结果

Fig.7 Simulation results of backscattering coefficient with incident angle under wind area of 20 km, wind speed of 8 m/s and with or without foams

图 8 为风区为 20 km 时不同风速下的散射系数。接近垂直入射时,散射系数随风速增大而减小;入射角 10°~30°风速越大,散射系数越大,原因在这个角度范围内海面粗糙度对散射起主要作用,粗糙度越大散射系数越大;大于 40°后,泡沫体散射发挥主要作用,散射系数随风速增大。图 9 给出了风速为 10 m/s,不同风区条件下泡沫海面的后向散射系数。本文仅考虑风速对泡沫覆盖率的影响,同一风速下不再考虑泡沫层对散射的贡献。入射角 10°~40°范围内,风区越大,大尺度波所占的成分越大,如图 1、2 所示,切平面近似结果起主导作用的范围越大,散射系数越大,下降的越缓慢。

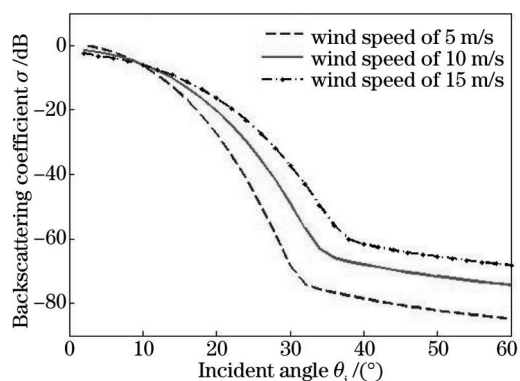


图 8 风区为 20 km 时,不同风速下,后向散射系数随入射角变化的仿真结果

Fig.8 Simulation results of backscattering coefficient with incident angle under wind area of 20 km and different wind speeds

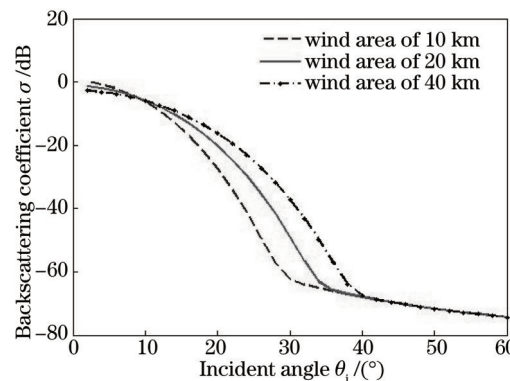


图 9 风速 10 m/s,不同风区条件下,后向散射系数随入射角变化的仿真结果

Fig.9 Simulation results of backscattering coefficient with incident angle under wind speed of 10 m/s and different wind areas

图 10 给出了风区为 20 km, 风速为 10 m/s 时, 不同介电常数下后向散射系数随入射角的变化, 由图可得后向散射系数随介电常数递增, 与微波段变化趋势一致。

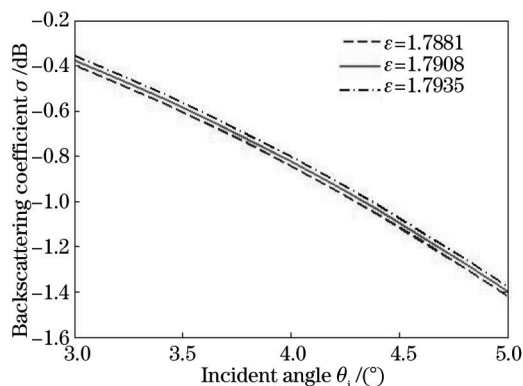


图 10 风区为 20 km, 风速为 10 m/s 时, 不同介电常数下, 后向散射系数随入射角的变化仿真结果

Fig.10 Simulation result of backscattering coefficient versus incident angle under wind area of 20 km, wind speed of 10 m/s and different dielectric constants

## 5 结 论

运用基尔霍夫近似并结合米氏理论和 VRT 理论, 研究了蓝绿激光波段“泡沫-海面”复合模型的后向散射特性。考虑了粗糙海面、泡沫粒子及粗糙面与粒子之间的耦合散射, 并联系实际海况, 分析了泡沫海面的激光散射特性。数值计算结果表明: 1) 相同的外界条件下, 由于波长以及在海水中的衰减等差异, 蓝绿光波段的散射系数远小于微波段; 2) 不同的入射角度范围, 影响散射系数的因素不尽相同, 近乎垂直和大角度入射时, 泡沫的体散射又起到主导影响,  $10^\circ \sim 30^\circ$  范围内, 海面起伏对散射的影响大于泡沫的体散射; 3) 在接近垂直与大角度入射时, 泡沫粒子对海面散射的影响不同。基于上述分析, 水下通信或探测时应综合考虑泡沫、风速、风区以及入射角的影响。仅对单尺度海浪进行分析, 对海面上方飞沫、水雾层等结构的存在未加以考虑, 以上因素都制约着最终计算结果, 想要得到更精确、更符合实际情况的后向散射系数, 就需要对粗糙海面的内部结构和周边环境进行更深入的研究。

## 参 考 文 献

- Xu Delun, Yu Dingyong. Random Wave Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 195-205.  
徐德伦, 于定勇. 随机海浪理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 195-205.
- Manahan E C, MacNiocail G. Oceanic Whitecaps and Their Role in Air-Sea Exchange Process[M]. Boston: D.Reidel Publishing, 1986: 113-123.
- Guo Lixin, Wang Yunhua, Wu Zhensen. Study on the electromagnetic scattering and Doppler spectra from two-scale time-varying fractal rough sea surface[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(1): 96-101.  
郭立新, 王运华, 吴振森. 双尺度动态分形粗糙海面的电磁散射及多普勒谱研究[J]. 物理学报, 2005, 54(1): 96-101.
- Jin Yaqiu. Remote Sensing Theory of Electromagnetic Scattering and Thermal Emission[M]. Beijing: Science Press, 1993: 16-26.  
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.
- Z Jin, T P Charlock, K Rutledge, *et al.*. Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere-ocean system with a rough surface[J]. Applied Optics, 2006, 45(28): 7443-7455.
- S V Salinas, S C Liew. Light reflection from a rough liquid surface including wind-wave effects in a scattering atmosphere[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 105(3): 414-424.
- Wang Xintao, Qu Huiming, Qu Hongxing, *et al.*. Grazing incidence laser scattering characteristics of anisotropic rough sea surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 2935-2939.  
王新涛, 屈惠明, 曲红星, 等. 各向异性粗糙海面对掠入射激光的散射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2935-2939.
- Si Lihong, Ao Faliang, He Ning. Behavior analysis of laser beam traversing the sea surface[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2006, 26(6): 430-433.

- 司立宏, 敖发良, 何 宁. 激光在海水界面上的传输特性分析[J]. 桂林电子科技大学学报, 2006, 26(6): 430-433.
- 9 Xiaohong Quan, Edward S Fry. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. Technical Note, 1995, 34(18): 3477 ~ 3480
- 10 Zhang Shuang, Zhang Xiaohui, Sun Chunsheng. Laser reflection performance from the rough sea surface with geometrical optical method [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(3): 28-31
- 张 爽, 张晓晖, 孙春生. 计算海面激光反射特性的几何光学方法研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(3): 28-31.
- 11 Ulaby F T, Moore R K. Microwave Remote Sensing Volume II Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. Huang Peikang, Wang Yifei, Transl. Beijing: Science Press, 1987, 297-304.
- 乌拉比 F T, 穆尔 R K. 微波遥感 (第2卷 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论)[M]. 黄培康, 汪一飞, 译. 北京: 科学出版社, 1987, 297-304.
- 12 Wu Gengkun, Jin Guangrong, Ji Tingting, *et al.*. Study of electromagnetic scattering from two-dimensional rough sea surface based on improved Wen's spectrum[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(13): 134203.
- 吴庚坤, 姬光荣, 姬婷婷, 等. 基于文氏改进谱的二维粗糙海面模型及其电磁散射研究[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 134203.
- 13 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(09): 6158-6166.
- 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(09): 6158-6166.

栏目编辑: 史 敏