

## 浅海起伏海面下气泡层对声传播的影响

姚美娟 鹿力成 孙炳文 郭圣明 马力

Effects of wind-generated bubbles layer on sound propagation underneath rough sea surface in shallow water

Yao Mei-Juan Lu Li-Cheng Sun Bing-Wen Guo Sheng-Ming Ma Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 024303 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191208

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191208>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

海面随机起伏对噪声场空间特性的影响规律

Ocean surface wave effect on the spatial characteristics of ambient noise

物理学报. 2017, 66(1): 014301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.014301>

丛聚的含气泡水对线性声传播的影响

Linear-wave propagation in liquids containing bubbly clusters

物理学报. 2018, 67(17): 174301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180728>

含混合气泡液体中声波共振传播的抑制效应

Restraining effect of resonant propagation of acoustic waves in liquids with mixed bubbles

物理学报. 2019, 68(7): 074301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182299>

深海海底山环境下声传播水平折射效应研究

Horizontal refraction effects of seamounts on sound propagation in deep water

物理学报. 2018, 67(22): 224302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181480>

粗糙海面与其上方多目标复合散射的混合算法

Hybrid algorithm for composite electromagnetic scattering from the multi-target on and above rough sea surface

物理学报. 2017, 66(5): 050301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.050301>

基于声散射的水下气泡群空间关联性研究

Spatial correlation of underwater bubble clouds based on acoustic scattering

物理学报. 2017, 66(1): 014305 <https://doi.org/10.7498/aps.66.014305>

## 浅海起伏海面下气泡层对声传播的影响\*

姚美娟<sup>1)2)</sup> 鹿力成<sup>1)2)†</sup> 孙炳文<sup>1)2)</sup> 郭圣明<sup>1)2)</sup> 马力<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院声学研究所, 北京 100190)

2) (中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

(2019年8月7日收到; 2019年10月21日收到修改稿)

分析了起伏海面下风浪引起的气泡层对海面反射损失和对声传播的影响. 一方面, 气泡层会改变原来水中的声速剖面; 另一方面, 气泡层会对声波产生散射和吸收作用. 考虑以上两方面的因素, 分析了不同风速下气泡层对海面反射损失和声传播损失的影响, 仿真发现, 在风速大于 10 m/s 时, 对于 2 kHz 以上频率时气泡层对小掠射角下海面反射损失的影响不可忽视. 在给定的水声环境中, 当声源深度和接收深度都为 7 m 时, 风速为 16 m/s 的风浪下生成的气泡层, 在 10 km 处对 3 kHz 的声传播损失的影响达到 8.1 dB. 当声源深度和接收深度都为 18 m 时, 风速为 16 m/s 的风浪下生成的气泡层, 在 10 km 处对 3 kHz 的声传播损失的影响达到 4 dB.

关键词: 起伏海面, 气泡层, 声传播

PACS: 43.60.Ac, 43.60.Bf

DOI: 10.7498/aps.69.20191208

## 1 引言

理想状态下的平整海面对声波的反射系数为  $-1$ , 这种良好的反射作用不会引起海面反射损失; 而海面风浪作用引起的起伏海面对声波同时具有反射和散射的作用<sup>[1-4]</sup>, 会引起海面反射损失<sup>[5-7]</sup>, 同时风浪搅拌引起的海面附近的气泡层既能改变原来的水中声速剖面, 还会对声波具有散射和吸收作用<sup>[8-10]</sup>, 因此起伏海面下的气泡层也是影响声传播的重要因素之一.

国内外学者先后研究了强风浪时起伏海面引起的信号相关性的改变<sup>[11]</sup>、信号到达时间的起伏<sup>[12,13]</sup>等现象. 2016年, Jones 等<sup>[14]</sup>以起伏海面下的声传播模型——Ramsurf 模型为基准比较了不同风速下的海面反射损失模型; 2018年, Zou 和 Badiey<sup>[15]</sup>指出了起伏海面对经过一次海面反射的宽带信号

声压幅度的影响; 2019年, Liu 和 Li<sup>[16]</sup>研究了不同风速的起伏海面下浅海声场的波动特性, 但都没有同时考虑强风浪引起的气泡层对声传播的影响.

强风浪时需要同时考虑起伏海面和近海面气泡层对声传播的影响. 2005年, Ainslie<sup>[17]</sup>基于 HN 气泡群模型考虑了风浪下气泡层对海面反射损失的影响, 包含了风力引起的气泡层对入射声波的折射效应以及吸收和散射效应, 但他只给出了风速为 10 m/s 时的单位体积内的气泡总体积计算式, 在具体计算时对于粗糙海面的反射系数计算和气泡引起的声场衰减系数计算也相对简化.

本文将起伏海面下气泡层对声传播的影响研究工作更推进一步, 在具体计算时, 采用适用性更广的小斜率散射理论来计算粗糙海面的反射系数, 并且考虑了气泡层引起的声波衰减系数对频率的依赖关系; 另外, 在分析气泡层对海面反射损失的影响基础上, 基于起伏海面下的声传播模型——

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11904382) 和中国科学院声学研究所青年英才计划 (批准号: 201701) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [luce\\_1983@sina.com](mailto:luce_1983@sina.com)

Ramsurf 模型, 考虑气泡层引起的声波折射效应和吸收散射效应, 将水中的声速剖面进行修正, 将气泡层引起的声衰减系数作为水体衰减系数输入到 Ramsurf 模型中, 分析了起伏海面下气泡层对声传播损失的影响. 本文全面考虑了风力引起的起伏海面和气泡层两种因素, 直接着眼于声传播损失的计算, 可以直接应用于声纳方程中.

## 2 海面气泡层对声反射系数的影响

### 2.1 海面声反射系数求解

粗糙海面散射 (见图 1) 的理论方面, 目前较为热点的是小斜率近似散射理论<sup>[18,19]</sup>. 根据小斜率近似理论, 可将海面粗糙度表示为幂率粗糙度谱: 入射到粗糙海面  $z = f(x)$  上的平面波为  $\exp(i\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r})$ , 其中  $\mathbf{r} = (x, z)$ ,  $\mathbf{k}_i = (k_{ix}, k_{iz}) = (k_{ix}, -\kappa_{iz})$ , 且有  $\kappa_{iz} = [k^2 - k_{ix}^2]^{1/2} > 0$ ,  $k = \omega/c$  是辐射波数.

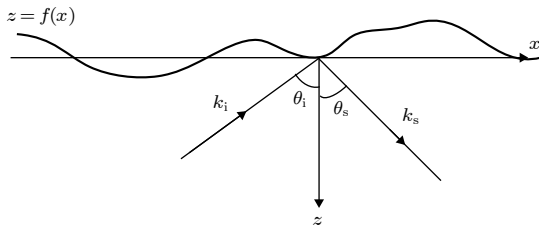


图 1 一维粗糙海面散射示意图

Fig. 1. Scattering geometry of one-dimensional rough sea surface.

该表面下方的散射场  $\psi_s$  可以用  $\mathbf{T}$  (传递) 矩阵表示为

$$\psi_s(\mathbf{r}, k_{ix}) = \int dk_{sx} \exp[i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}] \mathbf{T}(k_{sx}, k_{ix}). \quad (1)$$

对于一维表面  $f(x)$ , 仅考虑水平和竖直方向上的位移, Voronovich 提出将传递矩阵  $\mathbf{T}$  表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}(k_{sx}, k_{ix}) \\ &= A(k_{sx}, k_{ix}) \int dx \exp[i(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s) \cdot \mathbf{r}]|_{z=f(x)} \\ & \quad \times \Phi(k_{sx}, k_{ix}, x), \end{aligned} \quad (2)$$

其中函数  $\Phi(k_{sx}, k_{ix}, x)$  与起伏表面  $f(x)$  有关.

传递矩阵  $\mathbf{T}$  可以用小斜率序列表示:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_0 + \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + \dots, \quad (3)$$

其中  $\mathbf{T}_0$  可认为是一阶斜率函数,  $\mathbf{T}_1$  是二阶斜率函数,  $\mathbf{T}_2$  是三阶斜率函数, 依此类推. 等式右边的前

两项可以写为

$$\mathbf{T}_0(k_{sx}, k_{ix}) = -\frac{2\kappa_{iz}}{v_z} \frac{1}{2\pi} \int dx \cdot \exp[i\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}]|_{z=f(x)}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1(k_{sx}, k_{ix}) &= -\frac{i\kappa_{iz}}{v_z} \frac{1}{2\pi} \int dx \cdot \exp[i\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}]|_{z=f(x)} \\ & \quad \times \int dK_1 \cdot \exp[iK_1 x] F(K_1) \\ & \quad \times [k\beta_{1+i} + k\beta_{s-1} - v_z], \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{v} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s = (v_x, -v_z)$ ,  $v_x = k_{ix} - k_{sx}$ ,  $v_z = \kappa_{iz} + k_{sz}$ ;  $k\beta_{1+i} = [k^2 - (K_1 + k_{ix})^2]^{1/2}$ , 并且有  $\text{Im}[\beta_{1+i}] > 0$ ;  $k\beta_{s-1} = [k^2 - (k_{sx} - K_1)^2]^{1/2}$ , 并且有  $\text{Im}[\beta_{s-1}] > 0$ ;  $F(K)$  是  $f(x)$  的傅里叶变换. 则对于一维表面双基地散射截面可以写成如下的形式:

$$\begin{aligned} \sigma\delta(k_{ix} - k'_{ix}) &= \frac{k_{sz}^2}{k} [\langle T(k_{sx}, k_{ix}) T(k_{sx}, k'_{ix})^* \rangle \\ & \quad - \langle T(k_{sx}, k_{ix}) T(k_{sx}, k'_{ix}) \rangle^*], \end{aligned} \quad (6)$$

散射截面表示成

$$\sigma = \sigma_{00} + \sigma_{01} + \sigma_{11} + \dots, \quad (7)$$

其中  $\sigma_{00}$  为二阶散射截面,  $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{11}$  则分别对应第三和第四阶, 即

$$\sigma^{(2)} = \sigma_{00}, \quad (8)$$

$$\sigma^{(3)} = \sigma^{(2)} + \sigma_{01}, \quad (9)$$

$$\sigma^{(4)} = \sigma^{(3)} + \sigma_{11}. \quad (10)$$

此方法与扰动理论式是一样的, 并且包含了变量  $F(K)$ ,  $f(x)$  存在于指数函数  $\exp[i\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}]|_{z=f(x)}$  中, 对传递矩阵进行平均得到

$$\begin{aligned} & \langle T_0(k_{sx}, k_{ix}) \rangle \\ &= -\frac{2\kappa_{iz}}{v_z} \frac{1}{2\pi} \int \exp[iv_x x] \langle \exp[-iv_z f(x)] \rangle dx \\ &= -\exp[-\chi^2/2] \delta(k_{sx} - k_{ix}), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \langle T_1(k_{sx}, k_{ix}) \rangle \\ &= -\frac{i\kappa_{iz}}{v_z} \frac{1}{(2\pi)^2} \int \exp[iv_x x] dx \\ & \quad \times \int \exp[iK_1 x] (k\beta_{1+i} + k\beta_{s-1} - v_z) dK_1 \\ & \quad \times \int \exp[-iK_1 x'] \langle \exp[-iv_z f(x)] \rangle dx' \\ &= \kappa_{iz} \exp[-\chi^2/2] \delta(k_{sx} - k_{ix}) \\ & \quad \times \int dK_1 W(K_1) g(K_1), \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $\chi = v_z h$ ,  $g(K_1) = k\beta_{i+1} + k\beta_{s-1} - v_z$ ,  $W(K_1)$  为表面粗糙度幅度谱, 它是粗糙面相关函数的傅里叶变换.  $h$  为粗糙海面的波高均方根.

对于  $\langle \mathbf{T} \rangle$  的小斜率近似, 使用前两项已相对精确:

$$\langle \mathbf{T} \rangle = \langle \mathbf{T}_0 \rangle + \langle \mathbf{T}_1 \rangle, \quad (13)$$

$$\langle \mathbf{T}_0 \rangle = \exp \left[ -\frac{v_z^2 h^2}{2} \right] \delta(k_{sx} - k_{ix}), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{T}_1 \rangle &= \kappa_{iz} \exp \left[ -\frac{v_z^2 h^2}{2} \right] \delta(k_{sx} - k_{ix}) \\ &\times \int dK_1 W(K_1) g(K_1). \end{aligned} \quad (15)$$

计算反射系数的方法如下:

$$\langle \mathbf{T}(k_{sx}, k_{ix}) \rangle = R(k_{ix}) \delta(k_{ix} - k_{sx}). \quad (16)$$

因此可以得到小斜率近似下的反射系数为

$$\begin{aligned} R(k_{ix}) &\approx \exp \left[ -\frac{v_z^2 h^2}{2} \right] \\ &\times \left[ -1 + \kappa_{iz} \int dK_1 W(K_1) g(K_1) \right], \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $k_{ix} \equiv k_{sx} = k \sin \theta_i$ ,  $\kappa_{iz} \equiv |k_{sz}| = k \cos \theta_i$ ,  $v_z = 2k \cos \theta_i$ . 其中  $W(K_1)$  作为表面粗糙度幅度谱, 与海面波浪谱有关. 目前已有多种形式的海面波浪谱, 本文将采用国际上最为广泛应用的 PM 谱<sup>[20,21]</sup>.

对于 PM 谱, 一维粗糙度幅度谱  $W(K_1)$  为<sup>[6]</sup>

$$W(K_1) = \begin{cases} \left[ \frac{a}{8|K_1|^3} \right] \cdot \frac{2}{\pi} \left[ \arcsin \left( \frac{|K_1|}{K_L} \right) \right. \\ \left. - \frac{|K_1| \sqrt{K_L^2 - K_1^2}}{K_L^2} \right], & |K_1| < K_L, \\ \left[ \frac{a}{8|K_1|^3} \right], & |K_1| > K_L, \end{cases} \quad (18)$$

其中  $a = 8.1 \times 10^{-3}$ ,  $g$  是重力加速度,  $U$  为海面上方 19.5 m 高处 的风速,  $K_L$  是与风速有关的量:  $K_L = (\sqrt{\beta g})/U^2$ ,  $\beta = 0.74$ .

## 2.2 气泡层结构的声反射系数求解

### 2.2.1 气泡群建模

Ainslie<sup>[17]</sup> 对 Hall-Novarini (HN) 气泡群模型<sup>[22]</sup> 进行了修正, 假设气泡半径大小在 10—1000  $\mu\text{m}$  之间, 则气泡群的分布函数为

$$n(a) = (1.6 \times 10^{10}) G(a, z) \left( \frac{v_{10}}{13} \right)^3 \times \exp \left[ -\frac{z}{L(v_{10})} \right], \quad (19)$$

其中  $a$  为气泡半径, 单位为  $\mu\text{m}$ ;  $z$  为深度, 单位为 m,  $v_{10}$  为海面上方 10 m 处的风速, 单位为 m/s,  $L(v_{10})$  是与风速有关的量, 单位为 m;  $G(a, z)$  是与气泡半径和 水深有关的量:

$$L(v_{10}) = \begin{cases} 0.4, & v_{10} \leq 7.5, \\ 0.4 + 0.115(v_{10} - 7.5), & v_{10} > 7.5, \end{cases}$$

$$G(a, z) = \begin{cases} [a_{\text{ref}}/a]^4, & a_{\text{min}} \leq a \leq a_{\text{ref}}(z), \\ [a_{\text{ref}}/a]^{x(z)}, & a_{\text{ref}}(z) < a \leq a_{\text{max}}. \end{cases}$$

在  $G(a, z)$  表达式中的两个变量  $a_{\text{ref}}(z)$  和  $x(z)$  与水深  $z$  的关系分别为:

$$a_{\text{ref}}(z) = 54.4 + 1.984 \times 10^{-6} z,$$

$$x(z) = 4.37 + \left( \frac{z}{2.55} \right)^2.$$

#### 1) 气泡层对声波的折射效应

Ainslie<sup>[17]</sup> 给出了修正后的含气泡层的水中声速:

$$\frac{c_w^2}{c_m(z)^2} = 1 + \frac{\rho_w c_w^2}{\kappa_0(z) P(z)} U(z), \quad (20)$$

其中  $c_w$  是不含气泡的水中声速,  $c_m$  是修正后的含气泡水中声速. 其中  $P(z)$  是水中的绝对流体静力压强,  $U(z)$  是单位体积内气泡的总体积, Ainslie 仅给出了风速为 10 m/s 时的  $U(z)$  表达式, 本文推导了不同风速下的  $U(z)$  表达式:

$$\begin{aligned} U(z) &= \int_{a_{\text{min}}}^{a_{\text{max}}} V(a) n(a) da = \frac{4}{3} \pi \int_{a_{\text{min}}}^{a_{\text{max}}} a^3 n(a) da \\ &= 1.6 \times 10^{10} \times \left( \frac{v_{10}}{13} \right)^3 \times \exp \left( -\frac{z}{L} \right) \\ &\times \frac{4}{3} \pi \left\{ \int_{a_{\text{min}}}^{a_{\text{ref}}} \frac{a_{\text{ref}}^4(z)}{a} da + \int_{a_{\text{ref}}}^{a_{\text{max}}} \frac{a_{\text{ref}}^{x(z)}(z)}{a^{x(z)-3}} da \right\} \\ &= 1.6 \times 10^{10} \times \left( \frac{v_{10}}{13} \right)^3 \times \exp \left( -\frac{z}{L} \right) \\ &\times \frac{4}{3} \pi a_{\text{ref}}^4(z) \left\{ \ln \frac{a_{\text{ref}}(z)}{a_{\text{min}}} \right. \\ &\left. + \frac{1 - [a_{\text{ref}}(z)/a_{\text{max}}]^{x(z)-4}}{x(z) - 4} \right\}. \end{aligned}$$

在频率为 2 kHz、水中声速  $c_w$  为 1490 m/s 时 (温度取 10  $^\circ\text{C}$ , 盐度取 35 psu), 海表面风速分别为 7, 10, 13 和 16 m/s 时的水中声速剖面的变化

如图 2 所示, 海表面 0—10 m 以内的水中声速有不同程度的改变, 在风速为 13 m/s 时, 海面表层水中声速的改变达到 32 m/s 左右.

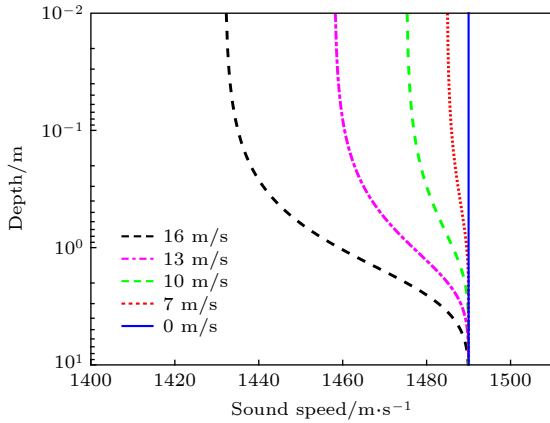


图 2 气泡层引起的水中声速剖面的改变

Fig. 2. variation of the sound speed profile due to bubbles layer.

### 2) 气泡层对声波的吸收散射效应

水中气泡对声能量具有散射和吸收的作用, 引起声能量的衰减. 衰减系数的计算方法为<sup>[8]</sup>

$$\alpha_b(z) = 4.34 \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{4\pi a^2 n(a) [\delta/(ka)]}{(Y^2 - 1)^2 + \delta^2} da, \quad (21)$$

其中  $Y = f_r/f$ ,  $f$  是声频率,  $f_r$  是半径为  $a$  的气泡在水深为  $z$  处的共振频率, 另外,  $\delta$  是阻尼常数. 图 3 是频率为 2 kHz 时不同海表风速下风浪引起的气泡层的水中衰减系数计算结果.

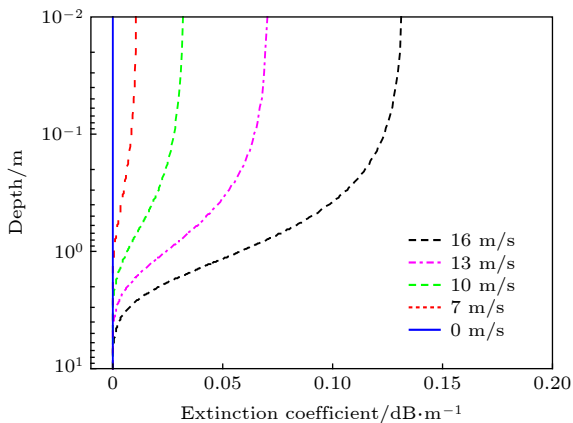


图 3 气泡层引起的声能量的衰减系数

Fig. 3. Extinction coefficient due to bubbles layer.

### 2.2.2 气泡层多层结构的声反射系数求解

研究气泡层对海面反射损失的影响时, 由于气泡层对声波的折射效应和消减效应随水深而变化,

因此考虑将气泡层划分为在垂直方向上的多层结构, 这里需要用到一种求解多层结构的反射系数的递归方法<sup>[23]</sup>.

如图 4 所示, 将气泡混合层划分为垂直方向上的多层结构, 包括最底层的 layer 1 和最顶层的 layer  $m$ , 以及中间的  $m - 2$  个隔层, 最上面 3 层的反射系数为

$$R_{(m-2)m} = \frac{R_{(m-2)(m-1)} + R_{(m-1)m} \exp(2i\phi_{m-1})}{1 + R_{(m-2)(m-1)} R_{(m-1)m} \exp(2i\phi_{m-1})}, \quad (22)$$

计算出  $R_{(m-2)m}$ , 下移一层至  $m - 3$  层, 计算下一个反射系数, 即

$$R_{(m-3)m} = \frac{R_{(m-3)(m-2)} + R_{(m-2)m} \exp(2i\phi_{m-2})}{1 + R_{(m-3)(m-2)} R_{(m-2)m} \exp(2i\phi_{m-2})}. \quad (23)$$

由此递归算法, 最后可求得总的反射系数为

$$V_c = R_{1m} = \frac{R_{12} + R_{2m} \exp(2i\phi_2)}{1 + R_{12} R_{2m} \exp(2i\phi_2)}, \quad (24)$$

其中  $\phi_j \equiv k_j h_j \sin \theta_j$  是声场穿过厚度为  $h_m$  的薄层的路径产生的与角度有关的垂直相移. 其中  $k_j$  是第  $j$  层的波数,  $h_j$  是第  $j$  层的厚度,  $\theta_j$  是第  $j$  层的人射波的掠射角.

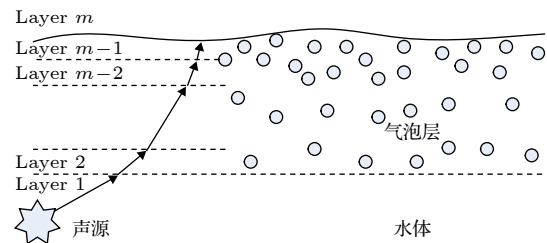


图 4 气泡层的多层结构示意图

Fig. 4. Layered structure geometry of the bubbles layer.

考虑小掠射角入射的声波, 水中声速为 1490 m/s 等声速剖面, 分别在风速为 7, 10 和 13 m/s 下计算海面反射损失 (分别对应图 5, 图 6 和图 7), 以  $-\ln |V_c|$  计算海面反射损失 (单位为奈培).

图 5(a) 是不考虑气泡层影响时起伏海面的海面反射损失计算, 图 5(b) 在图 5(a) 的基础上加入了气泡层对声波的消减效应, 不同风速下气泡层引起的声波衰减系数如图 3 所示; 图 5(c) 在图 5(a) 的基础上加入了气泡层对声波的折射效应, 不同风

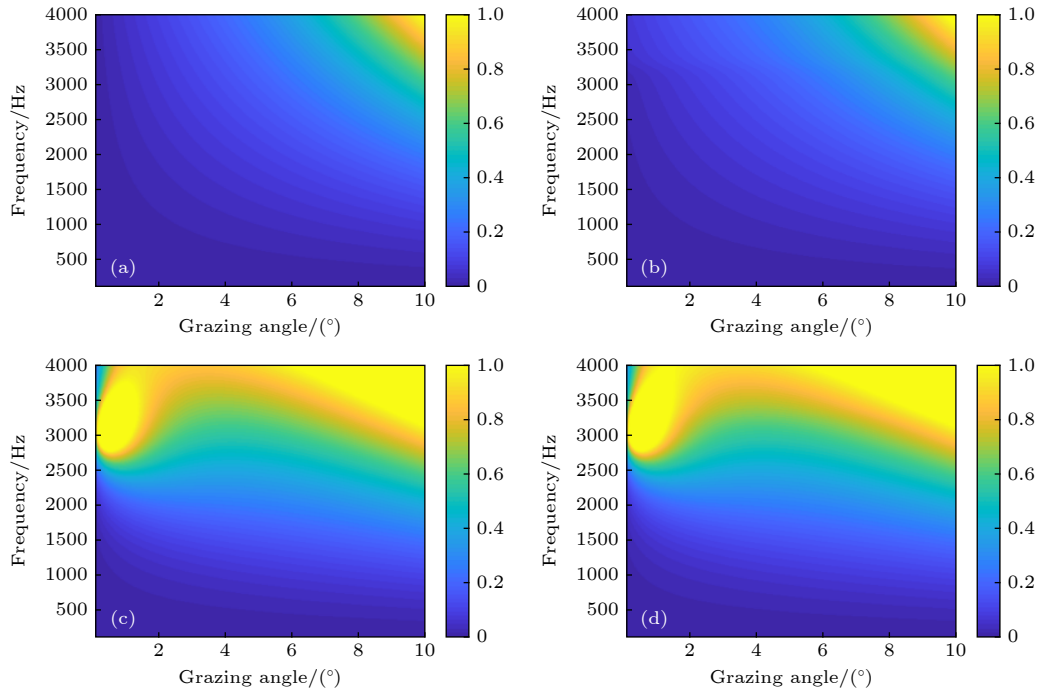


图 5 风速为 7 m/s 时起伏海面下气泡层对海面反射损失的影响 (a) 无气泡层; (b) 考虑气泡层对声波的消减效应; (c) 考虑气泡层对声波的折射效应; (d) 同时考虑气泡层对声波的折射效应和消减效应

Fig. 5. Effects of the bubbles layer underneath the rough sea surface on reflection loss in nepers with a wind speed of 7 m/s: (a) Rough sea surface; (b) rough sea surface + scattering and absorption effect of the bubbles layer; (c) rough sea surface + refraction effect of the bubbles layer; (d) rough sea surface + scattering and absorption effect of the bubbles layer + refraction effect of the bubbles layer.

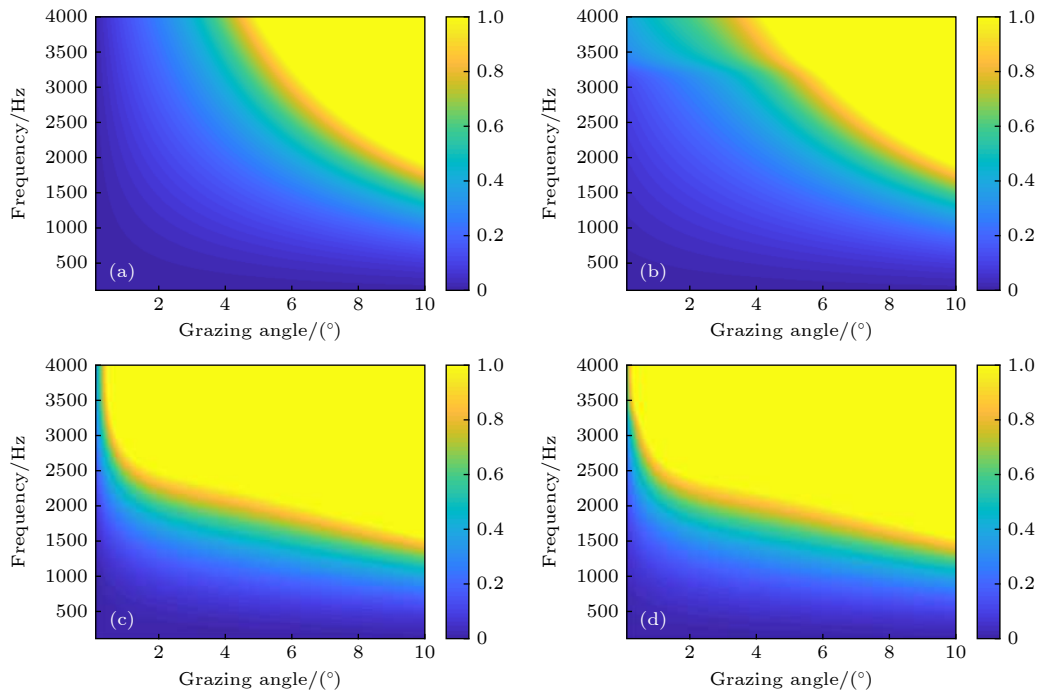


图 6 风速为 10 m/s 时起伏海面以及气泡层对海面反射损失的影响 (a) 无气泡层; (b) 考虑气泡层对声波的消减效应; (c) 考虑气泡层对声波的折射效应; (d) 同时考虑气泡层对声波的折射效应和消减效应

Fig. 6. Effects of the bubbles layer underneath the rough sea surface on reflection loss in nepers with a wind speed of 10 m/s: (a) Rough sea surface; (b) rough sea surface + scattering and absorption effect of the bubbles layer; (c) rough sea surface + refraction effect of the bubbles layer; (d) rough sea surface + scattering and absorption effect of the bubbles layer + refraction effect of the bubbles layer.

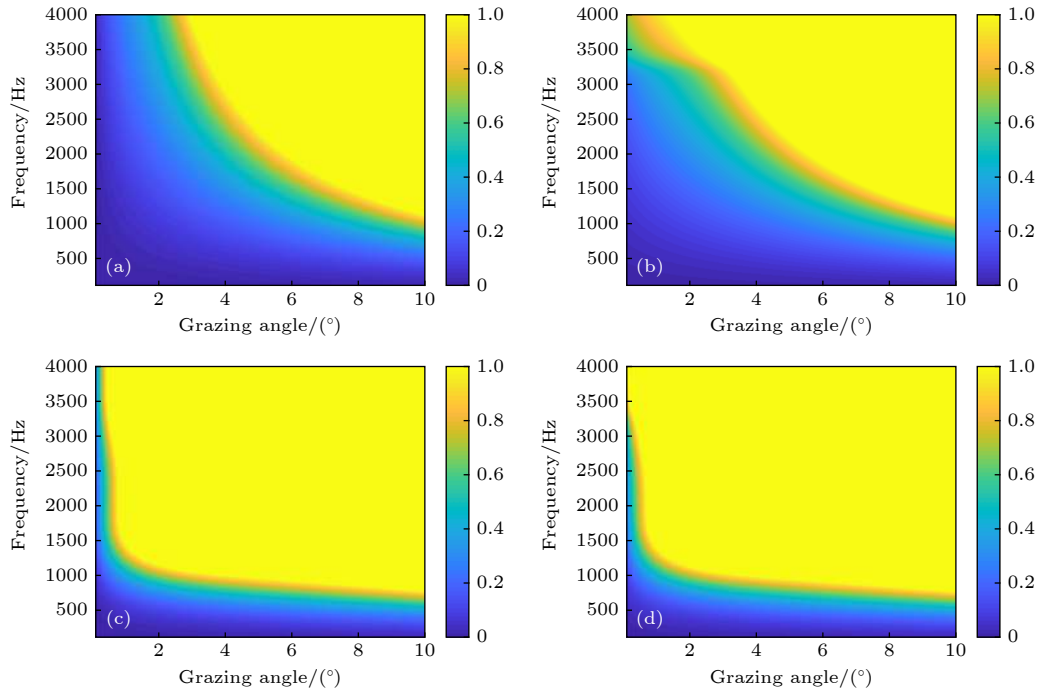


图 7 风速为 13 m/s 时起伏海面以及气泡层对海面反射损失的影响 (a) 无气泡层; (b) 考虑气泡层对声波的消减效应; (c) 考虑气泡层对声波的折射效应; (d) 同时考虑气泡层对声波的折射效应和消减效应

Fig. 7. Effects of the bubbles layer underneath the rough sea surface on reflection loss in nepers with a wind speed of 13 m/s: (a) Rough sea surface; (b) rough sea surface + scattering and absorption effect of the bubbles layer; (c) rough sea surface + refraction effect of the bubbles layer; (d) rough sea surface + scattering and absorption effect of the bubbles layer + refraction effect of the bubbles layer.

速下气泡层引起的声速剖面的变化如图 2 所示, 将海表以下 0—10 m 的水体分为 100 层, 利用上述递归方法逐层计算, 最顶层的反射系数利用 (17) 式求得; 图 5(d) 是在图 5(a) 的基础上同时考虑了气泡层对声波的折射效应和消减效应. 后续图 6 和图 7 的子图考虑的因素排序与图 5 一致.

观察图 5, 在风速为 7 m/s 时, 起伏海面的粗糙度较小, 此时由于风浪搅拌引起的气泡层对声速剖面结构的改变以及对声波的散射作用都较小, 因此, 海面反射损失相对较小; 图 5(c) 与图 5(a) 相比, 气泡层的折射效应对于 3 kHz 以上的海面反射损失影响较为明显. 观察图 6, 图 6(c) 与图 6(a) 相比, 在频率大于 2 kHz 时, 起伏海面下气泡层因素很大程度地改变了海面反射损失; 图 6(c) 与图 6(d) 相差较小, 此时, 相对于气泡层对声波的散射和吸收效应, 气泡层对声波的折射效应起主要作用. 可见, 风速大于 10 m/s 时, 在频率大于 2 kHz 时, 海面粗糙度和气泡层对小掠射角下声传播的影响不可忽视.

观察图 7, 相对于图 5 和图 6, 由于风速的增加, 图 7 中起伏海面下的海面反射损失以及气泡层

对海面反射损失的影响都较大, 并且在风速为 13 m/s 时, 气泡混合层对 1 kHz 以上小掠射角下的海面反射损失的影响已经较为明显.

### 3 气泡层对声传播损失的影响

本文提出的起伏海面下含有气泡层时的声传播计算方法的总体思路是: 以起伏海面下的 Ramsurf 声传播模型为模型基础, 利用 Monte-Carlo 方法<sup>[24]</sup>产生一维 PM 谱起伏海面作为海面边界的输入参数; 在考虑气泡层的影响时, 将不含气泡的水中声速剖面用 (20) 式进行修正得到含有气泡层的水中声速剖面 (如图 2 所示), 作为模型中的声速剖面参数; 同时利用 (21) 式计算气泡层引起的声波衰减系数 (如图 3 所示) 作为模型的水中衰减参数.

水声环境为 80 m 水深, 声源深度 SD 为 7 m, 接收深度 RD 为 7 m; 不含气泡的水中声速为 1490 m/s 等声速, 考虑气泡层影响时用 (20) 式进行修正. 分别在风速为 7, 10, 13 和 16 m/s 下计算起伏海面下不考虑气泡层和起伏海面下考虑气泡

层时的传播损失曲线. 用宽带非相干方法以 1/3 倍频程的带宽计算中心频率为 3 kHz 的传播损失曲线 (频率间隔取 10 Hz), 每个频率采用 40 次 Monte-Carlo 方法的平均, 以下图 8(a)—图 8(d) 分别是风速为 7, 10, 13 和 16 m/s 时的声传播损失曲线, 其中红色曲线是平整海面下计算所得, 绿色曲线是起伏海面下不考虑气泡混合层因素计算所得, 蓝色曲线是起伏海面下考虑气泡层因素计算所得.

观察图 8(a), 风速为 7 m/s 时, 在距离为 10 km 处, 红色曲线和绿色曲线相差 5 dB, 而绿色曲线和蓝色曲线几乎重合, 这是由于气泡层引起的衰减系数以及声速剖面的结构上的改变都较小, 因此, 气泡层对声传播损失的影响较小. 观察图 8(b), 风速为 10 m/s 时, 在距离为 10 km 处, 红色曲线和绿色曲线相差 4.5 dB, 绿色曲线和蓝色曲线相差 0.4 dB. 观察图 8(c), 风速为 13 m/s 时, 在距离为 10 km 处, 红色曲线和绿色曲线相差 6.7 dB, 绿色曲线和蓝色曲线相差 2.6 dB. 观察图 8(d), 风速为 16 m/s 时, 在距离为 10 km 处, 红色曲线和绿色曲线相差 11.2 dB, 绿色曲线和蓝色曲线相差 8.1 dB. 可见, 风速越大, 起伏海面和气泡层对声传播的影

响越大.

保持其他条件不变, 将声源深度 SD 和接收深度 RD 均设为 18 m, 利用同样的方法分别在风速为 7, 10, 13 和 16 m/s 下计算起伏海面下不考虑气泡层和起伏海面下考虑气泡层时的传播损失曲线, 以下图 9(a)—图 9(d) 分别是风速为 7, 10, 13 和 16 m/s 时的声传播损失曲线.

观察图 9(a), 风速为 7 m/s 时, 与图 8(a) 类似, 绿色曲线和蓝色曲线几乎重合, 风速较小时, 气泡层对声传播损失的影响较小. 观察图 9(b), 风速为 10 m/s 时, 在距离为 10 km 处, 红色曲线和绿色曲线相差 8.6 dB, 绿色曲线和蓝色曲线相差 0.8 dB. 观察图 9(c), 风速为 13 m/s 时, 在距离为 10 km 处, 红色曲线和绿色曲线相差 9.9 dB, 绿色曲线和蓝色曲线相差 2.5 dB. 观察图 9(d), 风速为 16 m/s 时, 在距离为 10 km 处, 红色曲线和绿色曲线相差 10 dB, 绿色曲线和蓝色曲线相差 4 dB. 根据 HN 气泡群模型风浪引起的气泡层只改变了 10 m 水深范围以内的声速和声衰减系数, 但由于波导是一个整体, 风浪引起的气泡层仍然会影响发射深度和接收深度大于 10 m 时的声传播.

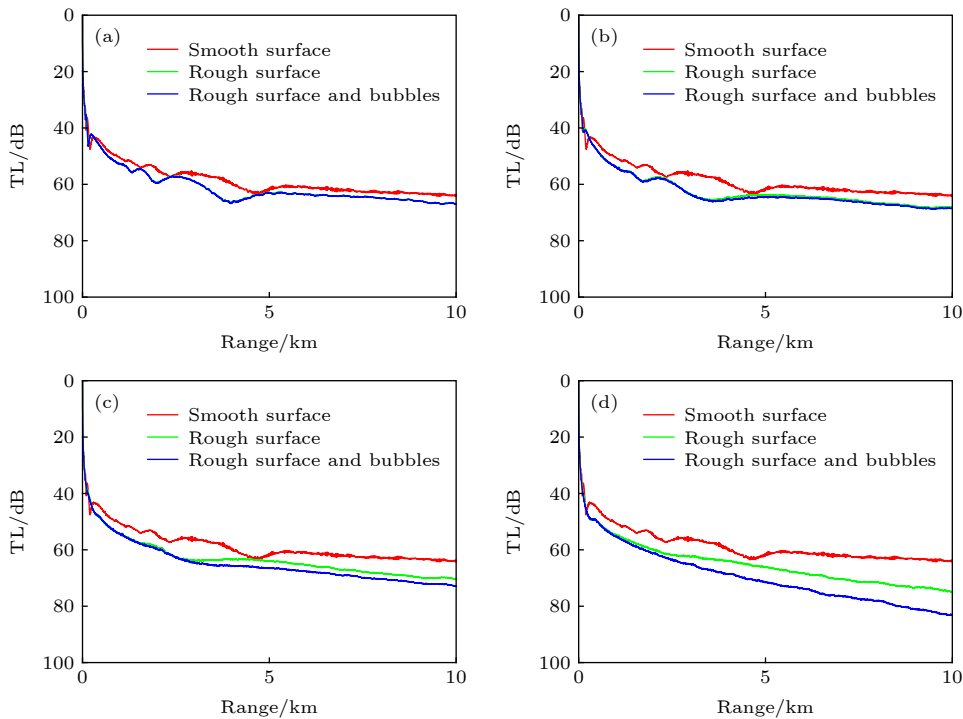


图 8 不同风速时平整海面、起伏海面不考虑气泡层因素和起伏海面考虑气泡层因素时的传播损失曲线比较 (SD = 7 m, RD = 7 m) (a)  $v = 7$  m/s; (b)  $v = 10$  m/s; (c)  $v = 13$  m/s; (d)  $v = 16$  m/s

Fig. 8. Comparison of the transmission loss curves with different wind speeds (SD = 7 m, RD = 7 m): (a)  $v = 7$  m/s; (b)  $v = 10$  m/s; (c)  $v = 13$  m/s; (d)  $v = 16$  m/s.



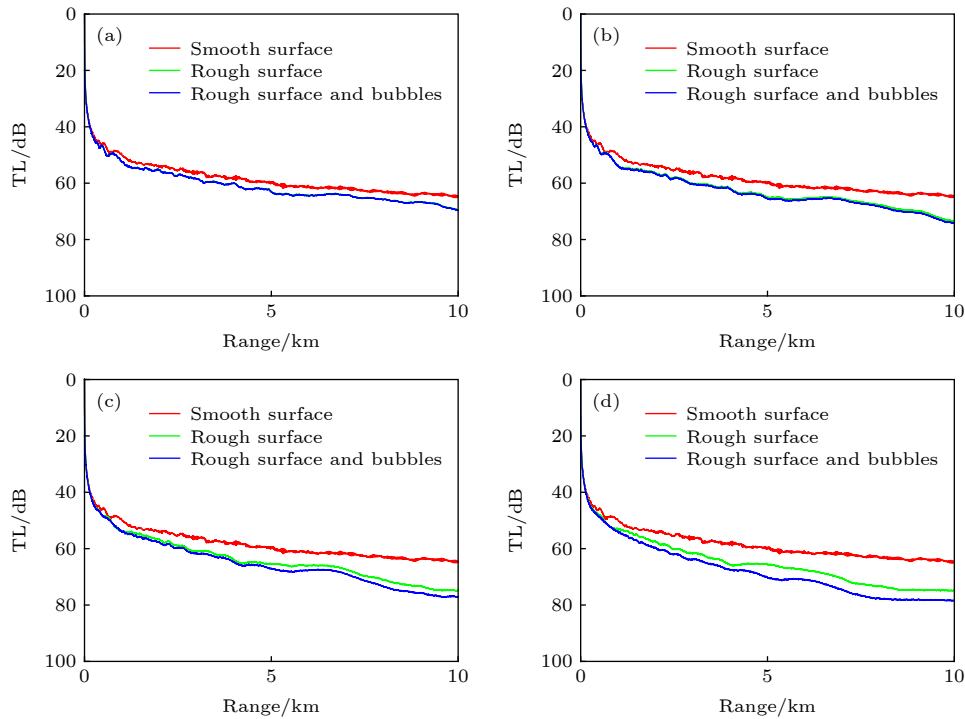


图9 不同风速时平整海面、起伏海面不考虑气泡层因素和起伏海面考虑气泡层因素时的传播损失曲线比较 ( $SD = 18$  m,  $RD = 18$  m) (a)  $v = 7$  m/s; (b)  $v = 10$  m/s; (c)  $v = 13$  m/s; (d)  $v = 16$  m/s

Fig. 9. Comparison of the transmission loss curves with different wind speeds ( $SD = 18$  m,  $RD = 18$  m.): (a)  $v = 7$  m/s; (b)  $v = 10$  m/s; (c)  $v = 13$  m/s; (d)  $v = 16$  m/s.

## 4 结 论

大风浪下在近起伏海面处会产生气泡层, 气泡层不但会改变原来的水中声速剖面, 还会因为散射吸收等引起声波的衰减, 本文提出了起伏海面下含有气泡层时的声传播计算方法, 并且从海面反射损失和声传播损失两个方面分析了起伏海面下气泡层对声传播的影响, 仿真实验表明, 在风速为  $10$  m/s 以上时, 气泡层对于频率大于  $2$  kHz 时小掠射角下的海面反射损失的影响较为显著; 在风速为  $13$  m/s 以上时, 气泡层对于频率大于  $1$  kHz 时小掠射角下的海面反射损失的影响较为显著. 在给定的水声环境中, 当声源深度和接收深度都为  $7$  m 时, 风速为  $13$  m/s 的风浪下生成的气泡层, 在  $10$  km 处对  $3$  kHz 的声传播损失的影响达到  $2.6$  dB; 风速为  $16$  m/s 的风浪下生成的气泡层, 在  $10$  km 处对  $3$  kHz 的声传播损失的影响达到  $8.1$  dB. 当声源深度和接收深度都为  $18$  m 时, 风速为  $13$  m/s 的风浪下生成的气泡层, 在  $10$  km 处对  $3$  kHz 的声传播损失的影响达到  $2.5$  dB; 风速为  $16$  m/s 的风浪下生成的气泡层, 在  $10$  km 处对

$3$  kHz 的声传播损失的影响达到  $4$  dB.

本文提出的起伏海面下含有气泡层时的声传播计算方法, 可为高海况下大风浪天气时的声场预报等提供模型基础和算法支撑, 不同风速下的仿真数据结果可为目标定位、水声环境监测等提供数据参考; 另外, 本文全面直接着眼于起伏海面下风浪引起的气泡层对声传播损失的影响, 可以直接应用于声纳方程中. Ramsurf 模型在计算时只考虑前向散射. 对于强起伏界面下后向散射为主的情况, 是下一步的工作方向.

## 参考文献

- [1] Martin S, Michael B P 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** 137
- [2] Tindle C T, Deane G B 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 2783
- [3] Tindle C T, Deane G B, Preisig J C 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 66
- [4] Preisig J C, Deane G B 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **116** 2067
- [5] Chapman D M F 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **73** 520
- [6] Williams K L, Thorsos E I, Elam W T 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **116** 1975
- [7] Zhou J X, Zhang X Z, Peng Z H, Martin J S 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 98
- [8] Keiffer R S, Novarini J C, Norton G V 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **97** 227
- [9] Vossen R V, Ainslie M A 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **130** 3413

- [10] Dahl P H, Choi J W, Williams N J, Graber H C 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **124** EL163
- [11] Yang T C 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 2595
- [12] Park C, Seong W, Gerstoft P, Hodgkiss W S 2011 *J. Acoust. Soc. Am.* **129** 98
- [13] Karjadi E A, Badiy M, Kirby J T, Bayindir C 2012 *IEEE J. Ocean. Eng.* **37** 112
- [14] Jones A D, Duncan A J, Maggi A 2016 *IEEE J. Ocean. Eng.* **41** 689
- [15] Zou Z G, Badiy M 2018 *IEEE J. Ocean. Eng.* **43** 1187
- [16] Liu R Y, Li Z L 2019 *Chin. Phys. B* **28** 014302
- [17] Ainslie M A 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **118** 3513
- [18] Thorsos E I, Broschat S L 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **97** 2082
- [19] Broschat S L, Thorsos E I 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **101** 2615
- [20] Persion W J, Moskowitz L 1964 *J. Geophys. Res.* **69** 5181
- [21] Thorsos E I 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 335
- [22] Hall M V 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 1103
- [23] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (New York: Springer Business Media) p50
- [24] Guo L X, Wang R, Wu Z S 2009 *Basic Theory and Method of Random Rough Surface Scattering* (Beijing: Science Press) p4 (in Chinese) [郭立新, 王蕊, 吴振森 2009 随机粗糙面散射的基本理论与方法 (北京: 科学出版社) 第4页]

# Effects of wind-generated bubbles layer on sound propagation underneath rough sea surface in shallow water<sup>\*</sup>

Yao Mei-Juan<sup>1)2)</sup> Lu Li-Cheng<sup>1)2)†</sup> Sun Bing-Wen<sup>1)2)</sup>Guo Sheng-Ming<sup>1)2)</sup> Ma Li<sup>1)2)</sup>1) (*Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)2) (*Key laboratory of Underwater Acoustics Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

( Received 7 August 2019; revised manuscript received 21 October 2019 )

## Abstract

The reflection coefficient of the flat sea surface in the ideal condition to the incident sound wave is  $-1$ . The perfect reflection effect does not introduce reflection loss. However, the sea surface is usually rough due to the wind. The wind-generated rough sea surface has not only reflection effect, but also scattering effect on the sound wave. At the same time, the wind-generated bubbles layer also has significant effect on the sound propagation. On the one hand, the bubbles layer can change the sound speed profile and result in the refraction of the incident sound wave. On the other hand, the bubbles layer has scattering effect and absorption effect on the incident sound wave and leads to the sound wave to attenuate. In fact, the rough sea surface and the bubbles layer are two main factors affecting the sound propagation in the windy weather at sea. Many researchers have paid much attention to the effect of the wind-generated rough sea surface on the sound propagation, but few of them have considered the effect of the wind-generated bubbles layer on the sound propagation. Based on the Ramsurf sound propagation model under the rough sea surface, the effects of wind-generated bubbles layer underneath rough sea surface on reflection loss and sound propagation with different wind speeds are analyzed. Based on the Hall-Novarini bubbles population model, the sound speed profile in the bubbles layer is modified and the attenuation coefficient due to scattering and absorption of the bubbles layer is calculated. The simulation results shows that when the wind speed is 10 m/s, the effect of the bubbles layer is significant on reflection loss with the frequencies higher than 2 kHz. In the given underwater acoustic environment, for a frequency of 3 kHz, when the source depth and the receiver depth are both 7 m, the enhancement of the transmission loss due to the bubbles layer is 2.6 dB for a wind speed of 13 m/s, and the enhancement is 8.1 dB for a wind speed of 16 m/s. And when the source depth and the receiver depth are both 18 m, the enhancement of the transmission loss due to the bubbles layer is 2.5 dB for a wind speed of 13 m/s and the enhancement is 4 dB for a wind speed of 16 m/s.

**Keywords:** rough sea surface, bubbles layer, sound propagation

**PACS:** 43.60.Ac, 43.60.Bf

**DOI:** [10.7498/aps.69.20191208](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191208)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11904382) and the Young Elite Researcher Project of Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 201701).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [luce\\_1983@sina.com](mailto:luce_1983@sina.com)