

## 海面冰层对声波的反射和散射特性\*

刘胜兴<sup>1)2)†</sup> 李整林<sup>2)</sup>

1)(厦门大学海洋与地球学院, 水声通信与海洋信息教育部重点实验室, 厦门 361102)

2)(中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190)

(2017年6月19日收到; 2017年8月17日收到修改稿)

北极海面冰层复杂多变, 其对声波的反射和散射严重影响冰下水声信道的传输特性, 建立海面冰层的声波反射和散射模型对冰下水声通信研究具有重要意义. 假设海面冰层为多层固体弹性介质且冰-水界面粗糙, 满足微扰边界条件, 导出声波从海水介质入射到海面冰层时相干反射系数满足的线性方程组. 对相干反射系数随声波频率、掠射角、冰层厚度的变化进行数值分析. 进一步引入根据散射声场功率谱密度计算散射系数的方法, 改变掠射角, 对冰层厚度、散射掠角对散射系数的影响进行研究.

**关键词:** 海面冰层, 相干反射系数, 散射系数, 冰下水声信道

**PACS:** 43.20.+g, 43.30.+m

**DOI:** 10.7498/aps.66.234301

## 1 引言

随着冰雪的加速融化, 北极地区吸引了各国政府, 尤其是美国、俄罗斯和加拿大等北极周边国家的高度关注, 人们希望在北冰洋开辟新航道, 并对海底储藏的丰富油气资源进行高效开发利用<sup>[1]</sup>. 据美国国家地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 估计, 北极地区蕴藏全球30%以上未开采的天然气资源和13%的未开采石油资源<sup>[2]</sup>. 另一方面, 北极冰雪的快速融化可能给全球气候和环境带来灾难性的影响, 如海平面快速上升、海洋回流减缓和局部出现极端恶劣天气<sup>[3,4]</sup>. 因此, 组建水声传感网络对北极冰-水系统实施高效监测成为极其重要的研究课题<sup>[5,6]</sup>.

要在北极地区组建水声传感网络, 首先必须了解冰下水声信道的传输特性, 海面冰层对声波的反射、散射也与冰下水声信道的传输特性密切相关<sup>[7-10]</sup>. 实验测量是了解海面冰层对声波反射和散射最可靠、最直接的一种方法. Langleben<sup>[11]</sup>测量了加拿大坦夸里海峡海面冰层在20—450 kHz频

段的镜像反射系数, 结果表明: 1) 当掠射角小于 $15^\circ$ 时, 反射系数接近1.0, 随着掠射角增大, 反射系数迅速减小, 在大掠射角时其值接近0.1; 2) 在所测量的频率范围内, 反射系数与声波频率基本无关. Yang和Votaw<sup>[12]</sup>测量了北极Ellesmere岛北部海面冰层的低频(小于1 kHz)声反射系数, 发现掠射角为 $14^\circ$ — $26^\circ$ 时, 反射系数与声波频率和掠射角密切相关. 殷敬伟等<sup>[13]</sup>测量了松花江表面冰层对高频(27, 32, 37 kHz)声波的散射强度, 结果表明前向散射系数随散射掠角的变化趋势符合一般界面散射规律. 虽然实验方法直接可靠, 却费时费力. 而且海面冰层结构复杂多变, 其声学特性、物理参数和界面状况与当地环境、气候和形成时间等密切相关<sup>[14,15]</sup>, 在某一海域测得的实验数据通常并不能应用于其他海域. 因此, 建立模型对海面冰层的声反射、散射进行研究是必不可少的.

将海面冰脊模拟为随机分布的半柱椭圆柱刚体, Diachok<sup>[16]</sup>提出了一种计算海面冰层反射系数的Burke-Twershy模型, 导出了反射系数与掠射角、冰脊密度和大小的数学关系式. 该模型的缺

\* 国家自然科学基金(批准号: 41276038)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liusx@xmu.edu.cn

点在于未考虑海面冰-水界面小尺度非均匀性对反射和散射声波的影响, 通常只适用于低频声波. 另外, 该模型假设冰脊为刚性体, 与实际海面冰层的声学特性相差较大. McCammom 和 McDamoel<sup>[17]</sup> 将海面冰层视作多层固体弹性介质, 导出了声波从海水介质入射到海面冰层时反射系数满足的线性方程组, 并假设海面为单层冰面, 用数值方法分析了冰层物理特性对反射系数的影响. Yew 和 Weng<sup>[18]</sup> 将海面冰层模拟为流体饱和多孔弹性介质, 研究了反射系数与声波频率、掠射角的关系. 上述两种弹性介质模型均假设海面冰-水界面是平整的, 未考虑声波散射的影响.

本文在文献<sup>[17]</sup>的工作基础上, 假设海面冰-水界面粗糙, 满足微扰边界条件, 导出了声波从海水介质入射到海面冰层时相干反射系数所满足的线性方程组, 并进一步引入利用散射声场功率谱密度计算散射系数的方法. 假设冰-水界面粗糙度满足高斯分布, 对单层海面冰层的相干反射和散射系数进行了数值分析.

## 2 海面冰层对声波的反射和散射理论

北极海面冰层结构复杂多变, 其声学特性与冰层形成时的环境温度、海水状况及其存续时间等因素有关. 不失一般性, 冰层往往被简化为水平方向密度和声速保持不变、垂直方向不一致的多层固体结构. 设角频率为 $\omega$ 的单位平面声波从海水介质中以掠射角 $\theta_i$ 斜入射到海面冰层, 冰层按垂直方向分为 $n$ 层, 各层间满足位移、应力连续的边界条件, 冰层与海水、冰层与空气之间为粗糙界面, 如图1所示.

若冰层为固体弹性介质, 第 $i$ 冰层的纵波位移势函数 $\varphi_i$ 和横波位移势函数 $\psi_i$ 分别表示为

$$\varphi_i = [A_i(k_x) \exp(j\alpha_i z) + B_i(k_x) \exp(-j\alpha_i z)] \times \exp(-jk_x x), \quad (1)$$

$$\psi_i = [C_i(k_x) \exp(j\beta_i z) + D_i(k_x) \exp(-j\beta_i z)] \times \exp(-jk_x x), \quad (2)$$

式中 $\alpha_i = \sqrt{k_{i,1}^2 - k_x^2}$ ,  $\beta_i = \sqrt{k_{i,t}^2 - k_x^2}$ ,  $k_x$ 为 $x$ 方向的声波波数,  $k_{i,1}$ 和 $k_{i,t}$ 分别为第 $i$ 冰层的纵波和横波波数;  $A_i(k_x)$ ,  $B_i(k_x)$ 分别表示纵波沿 $z$ 正方向

和反方向传播的幅度;  $C_i(k_x)$ 和 $D_i(k_x)$ 分别表示横波沿 $z$ 正方向和反方向传播的幅度. 为表述方便, (1)式和(2)式及后续相关式中均省略了时间因子 $\exp(j\omega t)$ . 海水介质中的位移势函数 $\varphi_w$ 为

$$\varphi_w = [\exp(j\alpha_w z) + R(k_x) \exp(-j\alpha_w z)] \times \exp(-jk_x x), \quad (3)$$

式中 $\alpha_w = \sqrt{k_w^2 - k_x^2}$ ,  $k_w$ 为海水中声波波数;  $R(k_x)$ 为声波沿 $z$ 反方向传播的幅度. 同理, 空气中的位移势函数为

$$\varphi_a = F(k_x) \exp(j\alpha_a z) \exp(-jk_x x), \quad (4)$$

式中 $\alpha_a = \sqrt{k_a^2 - k_x^2}$ ,  $k_a$ 为空气中声波波数;  $F(k_x)$ 为声波沿 $z$ 方向传播的幅度.

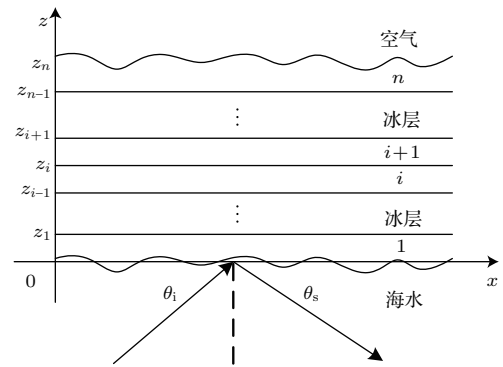


图1 海面冰层对声波的反射和散射模型

Fig. 1. Reflecting and scattering of acoustic wave from sea surface ice.

位移、应力与位移势函数的关系为<sup>[19]</sup>

$$u_{i,z} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} + \frac{\partial \psi_i}{\partial x}, \quad (5)$$

$$u_{i,x} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} - \frac{\partial \psi_i}{\partial z}, \quad (6)$$

$$T_{i,zz} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial z^2} \right) + 2\mu_i \left( \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x \partial z} \right), \quad (7)$$

$$T_{i,zx} = \mu_i \left( 2 \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

式中 $\lambda_i$ 和 $\mu_i$ 分别为第 $i$ 冰层的拉密常数,  $u_{i,z}$ 和 $u_{i,x}$ 分别表示第 $i$ 冰层沿 $z$ 和 $x$ 方向的位移,  $T_{i,zz}$ 和 $T_{i,zx}$ 分别表示第 $i$ 冰层法线和切线方向的应力. 同理可写出海水和空气中位移、应力与位移势函数的关系.

### 2.1 相干反射系数

将(1)式和(2)式代入(5)–(8)式, 利用位移、应力连续的边界条件, 即

$$\begin{cases} u_{i,z}|_{z=z_i} = u_{i+1,z}|_{z=z_i}, \\ u_{i,x}|_{z=z_i} = u_{i+1,x}|_{z=z_i}, \\ T_{i,zz}|_{z=z_i} = T_{i+1,zz}|_{z=z_i}, \\ T_{i,zx}|_{z=z_i} = T_{i+1,zx}|_{z=z_i}, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (9)$$

可得如下线性方程组:

$$\mathbf{B}_i(k_x) \mathbf{A}_i = \mathbf{0}, \quad (10)$$

式中  $\mathbf{A}_i = [A_i, B_i, C_i, D_i, A_{i+1}, B_{i+1}, C_{i+1}, D_{i+1}]^T$  为8阶列向量;  $\mathbf{B}_i(k_x)$  为  $4 \times 8$  阶矩阵;  $i = 1, 2, \dots, n-1$ ;  $\mathbf{0}$  为8阶零向量.

海水和冰层之间的界面非均匀, 若其粗糙度满足零均值且二阶小量可忽略, 则由微扰边界条件<sup>[20]</sup>可得如下线性方程组:

$$\left[ \mathbf{B}_0(k_x) + \frac{\langle \gamma^2 \rangle}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}_0(k_x)}{\partial z^2} + \mathbf{U}_0(k_x) + \mathbf{V}_0(k_x) \right] \times \langle \mathbf{A}_0 \rangle = 0, \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} & \mathbf{U}_0(k_x) \\ &= -\frac{\langle \gamma^2 \rangle}{2\pi} \int d^2q P(q - k_x) \frac{\partial \mathbf{B}_i(q)}{\partial z} \mathbf{B}_0^{-1}(q) \\ & \times \left[ \frac{\partial \mathbf{B}_0(k_x)}{\partial z} - j(q - k_x) \mathbf{b}_0(k_x) \right], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{V}_0(k_x) \\ &= -\frac{\langle \gamma^2 \rangle}{2\pi} \int d^2q P(q - k_x) j(q - k_x) \mathbf{b}_0(q) \mathbf{B}_0^{-1}(q) \\ & \times \left[ \frac{\partial \mathbf{B}_0(k_x)}{\partial z} - j(q - k_x) \mathbf{b}_0(k_x) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $\gamma$  为界面平均粗糙度;  $P(q)$  为界面粗糙度频谱;  $\langle \cdot \rangle$  表示求平均;  $\mathbf{A}_0 = [1, R, A_1, B_1, C_1, D_1]^T$  为6阶列向量;  $\mathbf{B}_0(k_x)$  和  $\mathbf{b}_0(k_x)$  为  $3 \times 6$  阶矩阵;  $\mathbf{B}_0(q)$  和  $\mathbf{b}_0(q)$  为  $3 \times 3$  阶矩阵. 同理可得空气和冰层界面满足的线性方程组为

$$\left[ \mathbf{B}_n(k_x) + \frac{\langle \gamma^2 \rangle}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}_n(k_x)}{\partial z^2} + \mathbf{U}_n(k_x) + \mathbf{V}_n(k_x) \right] \times \langle \mathbf{A}_n \rangle = 0, \quad (14)$$

式中  $\mathbf{A}_n = [F, A_n, B_n, C_n, D_n]^T$  为5阶列向量;  $\mathbf{B}_n(k_x)$  和  $\mathbf{b}_n(k_x)$  为  $3 \times 5$  阶矩阵.

由(10), (11), (14)式一共可得  $4(i-1) + 6$  个线性方程, 对其进行求解即可得  $4i + 2$  个参数  $R, A_i, B_i, C_i, D_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 和  $F, R$  即为相干反射系数.

### 2.2 散射系数

由于冰-水界面粗糙, 声波入射到海面冰层后会被散射. 海水和冰层中散射声场功率谱密度为

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{s}(q) \mathbf{s}^*(q) \rangle &= \frac{\langle \gamma^2 \rangle}{2\pi} P(q - k_x) \\ & \times \left| \mathbf{B}_0^{-1}(q) \left[ \frac{\partial \mathbf{B}_0(k_x)}{\partial z} - j(q - k_x) \mathbf{b}_0(k_x) \right] \langle \mathbf{A}_0 \rangle \right|^2, \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $q$  为散射声波波数在  $x$  方向的分量;  $\mathbf{s}(q) = [s_w, s_{1,l}, s_{1,t}]^T$ ,  $s_w$  为海水中的散射声场,  $s_{1,l}$  和  $s_{1,t}$  分别为第1冰层中纵波和横波的散射声场. 海水中的散射系数为<sup>[20]</sup>

$$S(q) = [(k_w^2 - q^2) / k_w] \langle s_w s_w^* \rangle. \quad (16)$$

### 3 数值计算与分析

假设海面为单冰层, 冰-水界面粗糙, 冰-气界面平整. 海面冰层参数如下<sup>[17]</sup>: 纵波和横波声速分别为3593.4和1809.8 m/s, 相应的衰减系数分别为0.068和0.408 dB·m<sup>-1</sup>·kHz; 密度为917 kg/m<sup>3</sup>; 厚度分别为0.5, 1.0, 10.0, 100.0 m. 海水密度为1000 kg/m<sup>3</sup>; 声速为1500 m/s. 未特别指明时, 冰-水界面平均粗糙度为0.015 m, 粗糙度满足如下高斯谱分布:

$$P(q) = \sqrt{2\pi} L \exp(-q^2 L^2 / 2), \quad (17)$$

式中  $q$  为波数在  $x$  方向的分量,  $L$  为粗糙度相关长度.

当冰层厚度分别为0.5, 1.0, 10.0, 100.0 m时, 相干反射系数与掠射角、声波频率的关系如图2所示. 当声波频率为2 kHz时, 相干反射系数随掠射角的变化曲线如图3所示. 当冰层厚度为1.0 m时, 相干反射系数随声波频率的变化曲线如图4所示. 计算中声波的频率范围为10—10000 Hz, 掠射角范围为0.01°—89.99°.

由图2—图4可知, 相干反射系数具有如下特性.

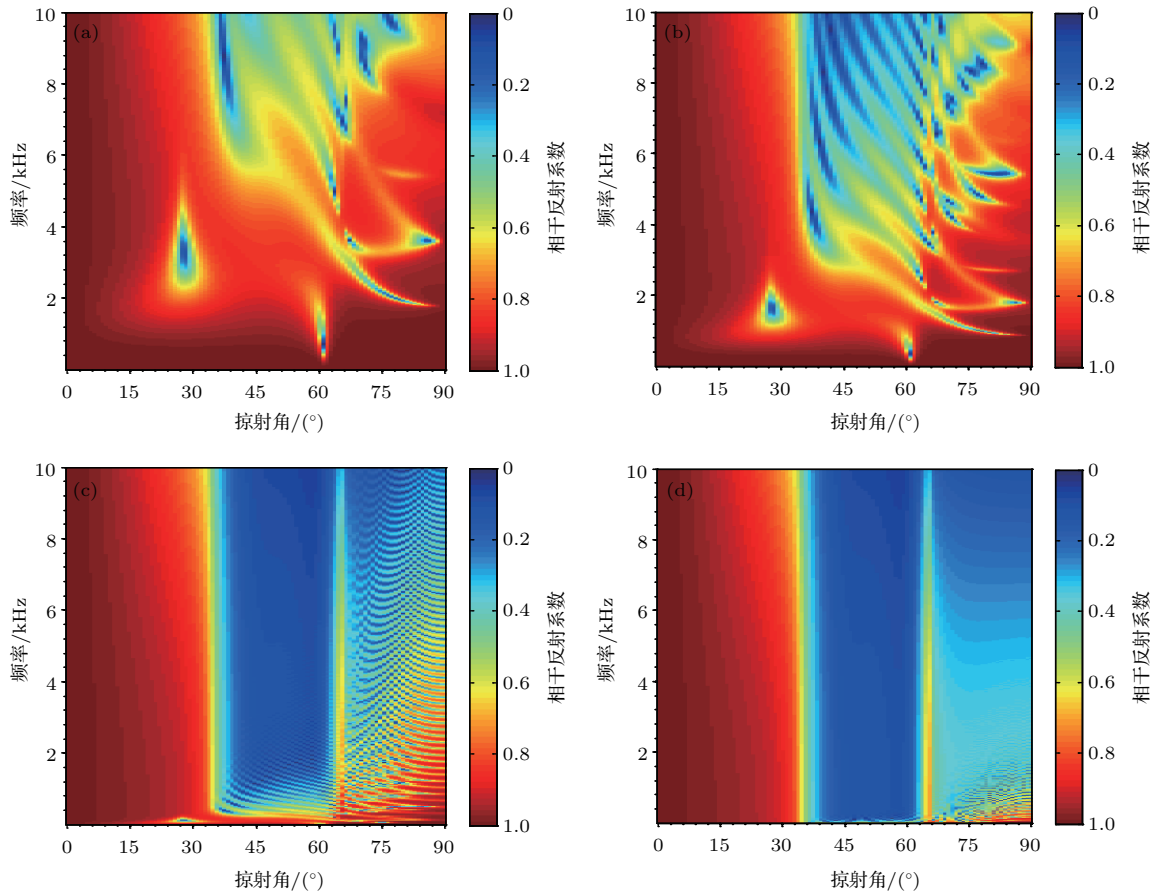


图2 不同冰层厚度时相干反射系数与掠射角和声波频率的关系 (a) 0.5 m; (b) 1.0 m; (c) 10.0 m; (d) 100.0 m  
 Fig. 2. Coherent reflection coefficient versus incident grazing angle and frequency of acoustic wave under different ice thicknesses: (a) 0.5 m; (b) 1.0 m; (c) 10.0 m; (d) 100.0 m.

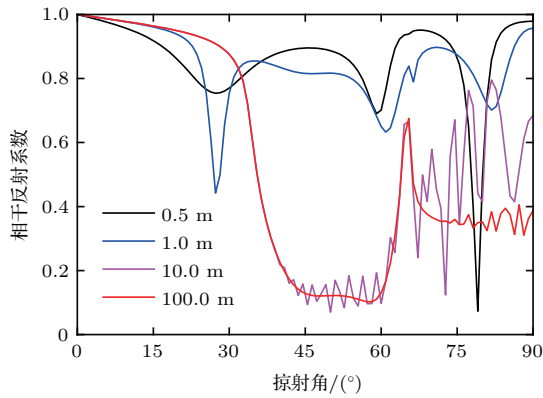


图3 声波频率为 2 kHz 时相干反射系数随掠射角的变化曲线  
 Fig. 3. Coherent reflection coefficient versus incident grazing angle with acoustic wave frequency of 2 kHz.

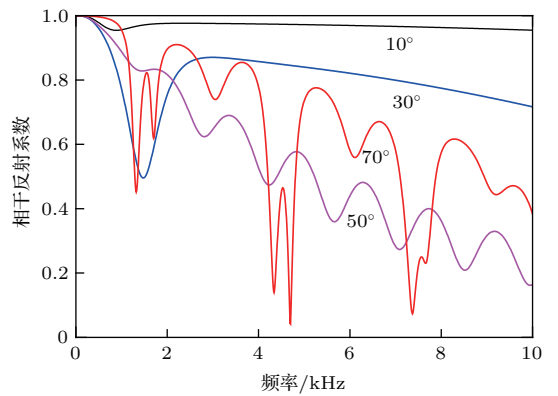


图4 冰层厚度为 1.0 m 时相干反射系数随声波频率的变化曲线  
 Fig. 4. Coherent reflection coefficient versus acoustic wave frequency with ice thickness of 1.0 m.

1) 小角度掠射时, 相干反射系数接近 1.0 (即近似全反射), 与入射声波的频率、冰层厚度基本无关. 随着掠射角的增大, 相干反射系数单调减小, 直到某一极小值, 然后又开始增大; 冰层越薄, 减小的速度越快, 但极小值的数值相对更大. 例如, 图 3 中,

冰层厚度为 0.5 m 时, 相干反射系数随掠射角的增大而下降, 当掠射角约为 27.6° 时, 相干反射系数达到极小值 0.75; 当冰层厚度为 1.0 m, 掠射角约为 28.1° 时, 相干反射系数达到极小值 0.42. 当掠射角较大时, 冰层越薄, 相干反射系数随掠射角的变化

越复杂,但其数值比冰层较厚时的数值大.

2) 大角度掠射时,相干反射系数与声波频率密切相关.相同掠射角时,相干反射系数总体变化趋势是随声波频率的增大而减小,但在某些频率范围内可能出现极小值.例如,图4中,当掠射角为70°,声波频率从10 Hz增大到10 kHz时,相干反射系数从0.997下降到0.380,但在7.37 kHz左右的频率处出现极小值0.075.

3) 冰层厚度对相干反射系数有显著影响.对比图2(a)—图2(d)可见,冰层较厚时,小掠射角条件下相干反射系数更接近1.0,大掠射角条件下相干反射系数较小.冰层较薄时,除少数掠射角外,频率较低的声波的相干反射系数接近1.0.当冰层厚度为0.5 m,且声波频率小于5 kHz时,除少数掠射角外,相干反射系数接近1.0.冰层较厚时,相干反射系数根据掠射角形成三个不同区域,小掠射角时相干反射系数接近1.0,较大掠射角时相干反射系数接近0.1,大掠射角时相干反射系数约为0.4.当冰层厚度为10.0 m,掠射角小于34°时,相干反射系数接近1.0;当掠射角为36°—60°时,相干反射系数约为0.12;掠射角大于60°时,相干反射系数在0.38—0.62范围内变化.

当声波频率为2 kHz,冰层厚度分别为1.0和10.0 m时,散射系数随散射掠角的变化曲线分别如图5和图6所示.由图可见,散射系数具有如下特性.

1) 小角度掠射时,在散射掠角0°—180°范围内散射系数都很小,散射声场可忽略不计.当掠射角为10°时,冰层厚度无论是1.0还是10.0 m,散射系数均小于 $10^{-3}$ .掠射角增大到30°时,散射系数仍然很小,但在散射掠角为100°—160°的方向上出现相对较强的散射.掠射角为50°—70°时,散射系数相对较大,在散射掠角80°—160°方向上出现较强散射,但散射系数具体数值与冰层厚度相关.

2) 在界面粗糙度和相关长度不变的情况下,冰层厚度对散射声场有较大影响.冰层越厚,散射系数越小,向海水介质中散射的声能量也越小.另外,从相干反射系数与声波频率的关系可以看出,散射系数与声波频率有很大关系.在其他条件相同的情况下,声波频率越高,散射系数也越高,但在某些频率范围内可能出现极小值.

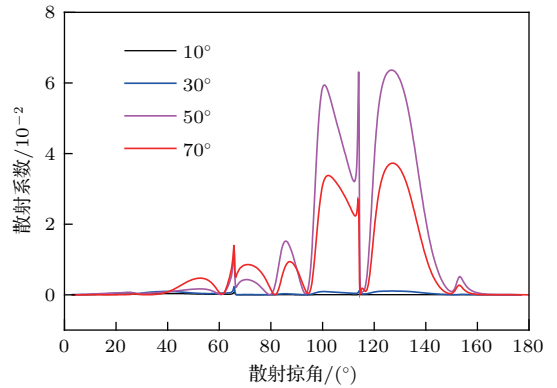


图5 不同掠射角时散射系数随散射掠角的变化曲线(声波频率为2 kHz,冰层厚度为1.0 m)

Fig. 5. Scattering coefficient versus scattering grazing angle under different incident grazing angles (acoustic wave frequency of 2 kHz and ice thickness of 1.0 m).

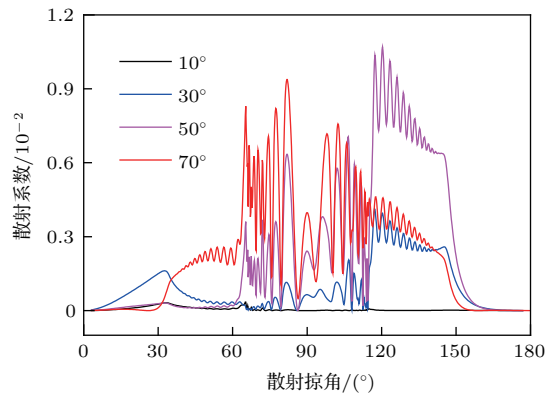


图6 不同掠射角时散射系数随散射掠角的变化曲线(声波频率为2 kHz,冰层厚度为10.0 m)

Fig. 6. Scattering coefficient versus scattering grazing angle under different incident grazing angles (acoustic wave frequency of 2 kHz and ice thickness of 10.0 m).

当声波频率为2 kHz,冰层厚度为0.8 m时,相干反射系数随掠射角的变化曲线如图7所示.其中,黑色、蓝色、紫色、红色曲线对应的冰-水界面平均粗糙度分别为0, 1.5, 3.0, 4.5 cm.图8为掠射角为30°时,散射系数随散射掠角的变化曲线.图7和图8表明冰-水界面粗糙度对相干反射系数和散射系数有显著影响,冰-水界面越粗糙,即平均粗糙度越大,相干反射系数越小,散射系数相对更大,向海水介质中散射的声能量越多.比较图7与文献[17]可发现,若冰-水界面平均粗糙度为0,本文计算所得相干反射系数与文献[17]中计算所得反射系数完全相同.因此,本文提出的海面冰层声波反射模型是对文献[17]模型的一种扩展.

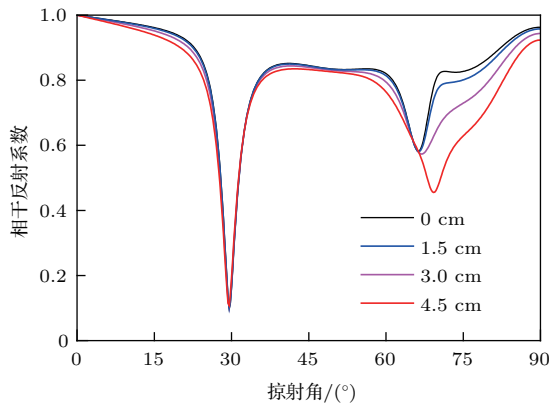


图7 不同冰-水界面粗糙度时相干反射系数随掠射角的变化曲线(声波频率2 kHz, 冰层厚度0.8 m)

Fig. 7. Coherent reflection coefficient versus incident grazing angle under different ice-water interface roughnesses (acoustic wave frequency of 2 kHz and ice thickness of 0.8 m).

海面冰层对声波的反射和散射不仅取决于声波频率、冰层厚度和掠射角,还与冰层中横波和纵波的声速密切相关.由于冰层中横波和纵波的声速大于海水中的声速,因此,当声波从海水介质中入射到海面冰层时,存在两个全反射临界角.根据Snell定律,横波和纵波对应的临界角分别为 $34.0^\circ$ 和 $65.3^\circ$ .掠射角小于 $34.0^\circ$ 时,声波将被全反射;掠射角为 $34.0^\circ$ — $65.3^\circ$ 时,纵波将被全反射,冰层中只有横波;掠射角大于 $65.3^\circ$ 时,冰层中既有横波,也有纵波,但以纵波为主.图3和图7表明掠射角小于 $34.0^\circ$ 时,相干反射系数并不接近于1.0.由图7可知,当掠射角为 $30^\circ$ 时,相干反射系数达到极小值0.1.出现该现象的原因可能是激发了冰-水界面波,即Scholte波.海底Scholte波研究表明,横波声速对Scholte波的传播有重要影响.冰-水界面波的传播特性将在后续研究中深入探讨.

## 4 结 论

本文将海面冰层视作多层固体弹性介质,导出了声波从海水介质入射到海面冰层时相干反射系数满足的线性方程组.假设冰-水界面粗糙度满足高斯分布,引入根据散射声场功率谱密度计算散射系数的方法,对相干反射系数和散射系数进行了数值分析.计算结果表明:小角度掠射(小于 $15^\circ$ )时,相干反射系数接近1.0,散射系数小于0.01,近似全反射,且声波频率和冰层厚度对相干反射系数及散射系数影响较小;大角度(大于 $30^\circ$ )掠射时,声波

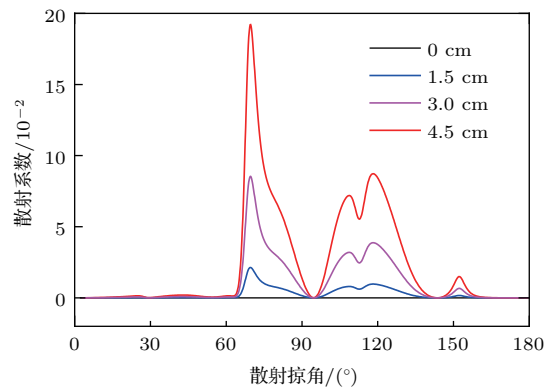


图8 不同冰-水界面粗糙度时散射系数随散射掠角的变化曲线(声波频率2 kHz, 冰层厚度0.8 m, 掠射角 $30^\circ$ )

Fig. 8. Scattering coefficient versus scattering grazing angle under different ice-water interface roughnesses (acoustic wave frequency of 2 kHz, ice thickness of 0.8 m and incident grazing angle of  $30^\circ$ ).

频率和冰层厚度对相干反射系数和散射系数有显著影响.冰层越厚,相干反射系数和散射系数越小.当冰层很厚时,如大于10.0 m,将在较宽频率范围内形成一条相干反射系数极小的区域,在该区域内散射系数相对较大.冰-水界面粗糙度对相干反射系数和散射系数有重要影响,界面越粗糙,即平均粗糙度越大,相干反射系数越小,散射系数越大.

## 参考文献

- [1] Li Q H, Wang N, Zhao J P, Huang H N, Yin L, Huang Y, Li Y, Xue S H, Ren X M, Li T 2014 *J. App. Acoust.* **33** 471 (in Chinese) [李启虎, 王宁, 赵进平, 黄海宁, 尹力, 黄勇, 李宇, 薛山花, 任新敏, 李涛 2014 应用声学 **33** 471]
- [2] Gautier D L, Bird K J, Charpentier R R, Grantz A, Houseknecht D W, Klett T R, Moore T E, Pitman J K, Schenk C J, Schuenemeyer J H, Sorensen K, Tennyson M E, Valin Z C, Wandrey C J 2009 *Science* **324** 1175
- [3] ACIA 2004 *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [4] Kang J C, Yan Q D, Sun B, Wen J H, Wang D L, Sun J Y, Meng G L, Kumiko G A 1999 *Chin. J. Pol. Res.* **11** 301 (in Chinese) [康建成, 颜其德, 孙波, 温家洪, 汪大立, 孙俊英, 孟广林, Kumiko G A 1999 极地研究 **11** 301]
- [5] Mikhalevsky P N, Sagen H, Worcester P F, Baggeroer A B 2015 *Arctic* **68** 1
- [6] Mikhalevsky P N, Gavrilov A N, Baggeroer A B 1999 *IEEE J. Ocean. Eng.* **24** 183
- [7] Marsh H W, Mellen R H 1963 *J. Acoust. Soc. Am.* **35** 552
- [8] Duckworth G, LePage K, Farrell T 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 747

- [9] LePage K, Schmidt H 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 1783
- [10] Alexander P, Duncan A, Bose N 2012 *Sci. Edu.* **41** 250
- [11] Langleben M P 1970 *J. Geophys. Res.* **75** 5243
- [12] Yang T C, Votaw C W 1981 *J. Acoust. Soc. Am.* **70** 841
- [13] Yin J W, Du P Y, Zhu G P, Zhang M H, Han X, Zhang X, Sun H, Sheng X L 2016 *J. App. Acoust.* **35** 58 (in Chinese) [殷敬伟, 杜鹏宇, 朱广平, 张明辉, 韩笑, 张晓, 孙辉, 生雪莉 2016 应用声学 **35** 58]
- [14] Jezek K C, Stanton T K, Gow A J, Lange M A 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 1903
- [15] Rothrock D A, Thorndike A S 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **85** 3955
- [16] Diachok O I 1976 *J. Acoust. Soc. Am.* **59** 1110
- [17] McCammom D F, McDamoel S T 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **77** 499
- [18] Yew C H, Weng X 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 342
- [19] Ewing W M, Jardetzky W S, Press F 1957 *Elastic Waves in Layered Media* (New York: McGraw-Hill)
- [20] Kuperman W A, Schmidt H 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **86** 1511

# Reflecting and scattering of acoustic wave from sea ices\*

Liu Sheng-Xing<sup>1)2)†</sup> Li Zheng-Lin<sup>2)</sup>

1) (Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

2) (State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

( Received 19 June 2017; revised manuscript received 17 August 2017 )

## Abstract

In order to build an efficient underwater acoustic sensor network in the Arctic Ocean environment, transmission characteristics of under-ice acoustic channels need comprehensive understanding. The reflecting and scattering of acoustic waves from sea ices have great influences on under-ice acoustic channels. Both topology and structure of sea surface ices are very complex and variable. The physical dimension, acoustic property and interface roughness of sea ices depend not only on local environment, but also on climate and formation time. Therefore, it is of great significance to develop a model of reflecting and scattering of acoustic waves from sea ices for investigating the sound propagation in the under-ice environment. Assuming that sea ices are a multi-layered elastic solid medium and the ice-water interface is rough and satisfies the boundary condition of perturbation, we develop a system of linear equations to solve the coherent reflection coefficient of the incident sound wave from water to sea ice. The coherent reflection coefficient is a function of the frequency of sound wave and incident grazing angle, and is numerically evaluated. The influences of ice thickness and ice-water interface roughness on the coherent reflection coefficient are analyzed. Furthermore, the method of calculating scattering coefficient by using the power spectrum density of the scattering field is introduced. The scattering coefficient as a function of the scattering grazing angle is numerically evaluated. The influences of ice thickness and ice-water interface roughness on scattering coefficient are analyzed. The results show that both the coherent reflection coefficient and the scattering coefficient are dependent on the frequency of acoustic wave, ice thickness and grazing angle. The coherent reflection coefficient is close to 1.0 and the scattering coefficient is less than 0.01 when incident grazing angle is less than  $15^\circ$ . In addition, the frequency of acoustic wave and ice thickness have weak influences on them. However, the frequency of acoustic wave and ice thickness have significant influences on the coherent reflection coefficient and the scattering coefficient when the incident grazing angle is big, say, greater than  $30^\circ$ . In general, the thicker the ice is, the smaller the coherent reflection coefficient and the scattering coefficient are. The coherent reflection coefficient is less than 0.18 when the ice thickness is greater than 10.0 m and the frequency of acoustic waves is greater than 2 kHz. The ice-water interface roughness has great influences on both the coherent reflection coefficient and the scattering coefficient. The rougher of the ice-water interface is, the smaller the coherent reflection coefficient is, and the bigger the scattering coefficient is.

**Keywords:** sea ices, coherent reflection coefficient, scattering coefficient, under-ice acoustic channels

**PACS:** 43.20.+g, 43.30.+m

**DOI:** 10.7498/aps.66.234301

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41276038).

† Corresponding author. E-mail: liusx@xmu.edu.cn