

表面声道对深海风成噪声垂直空间特性的影响规律*

蒋光禹¹⁾²⁾ 孙超^{1)2)†} 谢磊¹⁾²⁾ 刘雄厚¹⁾²⁾³⁾

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

3) (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)

(2018年9月30日收到; 2018年11月20日收到修改稿)

水下风成噪声的垂直空间特性包括噪声垂直方向性和垂直相关性, 研究海洋环境对其影响规律对提升声呐性能、增加海洋环境参数反演的准确性具有重要意义. 本文利用 Pekeris 割线下的简正波理论描述噪声的传播过程, 研究了深海环境下存在表面声道时, 表面声道以下噪声垂直空间特性的变化规律及其原因. 研究表明, 在临界深度以上, 表面声道的存在导致噪声垂直方向性在水平凹槽边缘靠近海底方向上的峰值升高, 噪声垂直相关性随垂直距离增加先后周期地向正相干和负相干方向偏移; 在临界深度以下, 表面声道的存在导致水平方向上的噪声能量增强, 噪声垂直相关性整体向正相干方向偏移. 当表面声道的参数变化时, 表面声道的厚度变化对噪声垂直空间特性影响较大, 而表面声道内的声速梯度变化对噪声垂直空间特性几乎没有影响. 结合各类简正波的变化分析表明, 存在表面声道时, 噪声源激发的折射简正波阶数增加, 强度增强, 是表面声道引起噪声垂直空间特性变化的主要原因.

关键词: 水下风成噪声, 表面声道, 噪声垂直方向性, 噪声垂直相关性, 简正波

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m, 43.50.+y

DOI: 10.7498/aps.68.20181794

1 引言

水下风成噪声是海洋环境噪声的主要组成成分之一^[1]. 对声呐设备而言, 风成噪声是限制其性能的重要干扰^[2]. 另一方面, 风成噪声中包含许多环境和声场信息, 如海底底质^[3,4]、海面粗糙度和海面风速^[5,6]等. 深入了解海洋环境对风成噪声特性(包括噪声级、噪声方向性、噪声相关性等)的影响规律, 有利于提高声呐性能, 扩大其探测范围, 并且有利于提高利用风成噪声反演海洋环境参数的准确性.

风成噪声建模是研究海洋环境对其影响规律的基础. 20世纪60年代初, Cron 和 Sherman^[7]建

立了最早的噪声模型, 即 C/S 模型, 该模型假设海深无限深, 噪声源均匀分布在海洋表面并具有 $\cos^m \alpha$ (通常 $m = 1$ 或 $m = 2$, α 是以垂直向下为 0° 记的俯仰角) 的指向性, 仅适用于海深较深或海底作用不明显的情况; Kuperman 和 Ingenito^[8] 假设具有一定强度和相关性的单极子源随机均匀地分布在海面以下某一深度的无穷大平面上, 结合波动理论, 考虑海底的作用, 给出了一般分层海洋环境下的噪声模型, 简称 K/I 模型; Carey 等^[9] 将抛物方程声传播模型应用于噪声建模当中, 建立了距离有关环境下的噪声模型; Perkins 和 Kuperman 等^[10] 利用二维声传播模型模拟三维环境下的噪声

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 11534009)、国家自然科学基金 (批准号: 51479169) 和中科院声场声信息国家重点实验室开放课题研究基金 (批准号: SKLA201702) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: csun@nwpu.edu.cn

传播, 将噪声模型由二维拓展到了三维.

在以上噪声模型的基础上, 业内学者开展了大量关于海洋环境对噪声特性影响的研究. 在浅海环境下, Hamson^[11]研究了声速剖面 and 海底底质对噪声方向性和噪声级的影响; Yang 和 Yoo^[12]给出了噪声垂直方向性的简正波表达式, 分析了海底底质和声速剖面对噪声垂直方向性的影响; Rouseff 和 Tang^[13]以及江鹏飞等^[14]结合实验数据分析了内波引起的噪声垂直方向性变化, 周建波等^[15]研究了海面随机起伏对噪声级、噪声垂直方向性和垂直相关性的影响. 在深海环境下, Carey 等^[9]研究了斜坡地形对噪声垂直方向性的影响; Buckingham^[16]研究了声吸收损失对噪声方向性和相关性的影响; 刘珊珊和李风华^[17]以及王璟琰和李风华等^[18]分析了不同海底参数下的噪声垂直相关性.

本文主要关注表面声道对深海风成噪声垂直空间特性 (包括噪声垂直方向性和噪声垂直相关性) 的影响. 一般来说, 深海的声速分布呈现典型的“三层结构”, 即表面混合层、主跃变层和深海等温层^[19]. 其中, 表面混合层的厚度与纬度和季节之间存在明显的依赖关系^[20]. 在表面混合层内, 海水温度几乎不随深度变化, 声速分布呈现微弱的正梯度. 已有研究表明, 当存在表面混合层且声源位于混合层内部时, 一部分声能量将被限制在混合层内传播, 该声道称为表面声道^[21], 同时在表面声道以下更大的深度范围内, 声传播特性也将会发生一定的变化. 由于噪声源靠近海面, 表面声道的存在将导致噪声传播特性发生改变, 进而影响噪声场特性. Urick^[22]指出, 存在表面声道时其内部的噪声级上升, 水平方向上的噪声能量增强. 但在表面声道以下更大的深度范围内, 表面声道引起的噪声特性变化仍待研究.

针对上述问题, 本文选用 K/I 模型描述噪声源的几何分布, 以 Pekeris 分支割线^[23]下的简正波理论描述噪声的传播过程, 研究了存在表面声道时, 表面声道以下深度上噪声垂直方向性和噪声垂直相关性的变化, 并分析了表面声道参数变化的影响. 最后, 利用简正波声传播理论解释了表面声道引起噪声垂直空间特性变化的原因.

2 声传播理论与噪声场模型

2.1 声传播理论

为准确描述近场和远场噪声的传播过程, 本文选用 Pekeris 分支割线下的简正波声传播模型. 在分层介质中, 点源声场的波函数 $\psi(r, z)$ 满足亥姆霍

兹方程

$$[\nabla^2 + k^2(z)] \psi(r, z) = f_s(z, \omega) \frac{\delta(r)}{2\pi r}, \quad (1)$$

其中 ∇ 表示拉普拉斯算子, $k(z)$ 为波数, $c(z)$ 为海水声速, ω 为信号角频率, r, z 分别为距离和深度, $f_s(z, \omega)$ 为源函数, $\delta(r)$ 为 Dirac 函数.

则波函数的积分表达式为^[24]

$$\psi(r, z) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(k_r, z) H_0^{(1)}(k_r r) k_r dk_r, \quad (2)$$

其中 $\psi(k_r, z)$ 为 Hankel 变换后的波函数, $H_0^{(1)}$ 为零阶第一类 Bessel 函数.

场的这个积分表示可以用回路定理来解算. 根据复变函数中的 Cauchy 定理, 回路积分等于回路中所围的极点留数之和及绕分支割线左右岸的积分. 在分层介质传播理论中, 一般有两种分支割线取法, 即 EJP (Ewing-Jardetsky-Press) 割线^[25]和 Pekeris 割线. 本文选用 Pekeris 割线, 其示意图见图 1.

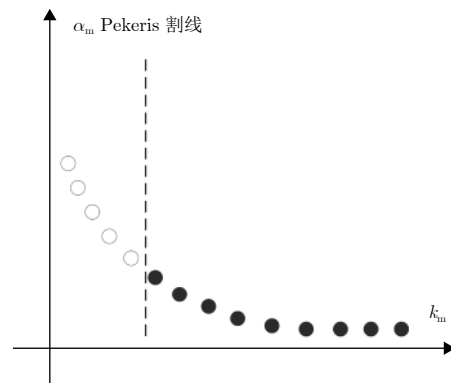


图 1 Pekeris 分支割线示意图
Fig. 1. Pekeris branch cut map.

图 1 中, 虚线表示 Pekeris 分支割线, 实心圆极点和空心圆极点分别对应于“正规”简正波和“非正规”简正波. Bartberger^[26]指出, 当信号频率高于 100 Hz 时, Pekeris 割线积分的贡献可以忽略不计, 声场格林函数的简正波表达式 (即仅计入“正规”和“非正规”简正波, 忽略 Pekeris 割线积分) 在近场和远场均可给出准确的计算结果.

$$\begin{aligned} G(r, z, z_0) &= \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{2\pi}{k_{rm} r}} \Psi_m(z_0) \Psi_m(z) e^{i(k_{rm} + i\alpha_m)r} \\ &= \sum_{m=1}^M a_m(r) \Psi_m(z), \\ a_m(r) &\equiv \sqrt{\frac{2\pi}{k_{rm} r}} \Psi_m(z_0) e^{i(k_{rm} + i\alpha_m)r}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 z_0 为声源深度, ρ 为海水密度, $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位, $\Psi_m(z)$ 为模态函数, k_{rm} 为第 m 阶简正波的水平波数, α_m 为第 m 阶简正波的吸收系数, a_m 为模态系数, M 为简正波总阶数, 其中包含“正规”和“非正规”简正波. 理论上, 存在无穷多阶“非正规”简正波, 因此 M 应为 ∞ . 但在数值计算中, 计入无穷多阶“非正规”简正波是不可能的. 在本文的数值仿真中, 计入尽可能多的“非正规”简正波 (设置简正波搜寻的相速度上限为 100000 m/s), 即 M 取足够大的值, 以保证计算结果的准确性.

2.2 噪声场模型

本文采用 K/I 模型来描述噪声源的几何分布, 即假设无限多单极子噪声源分布于海面以下某一无限大平面上, 噪声源深度小于 $\lambda/4$ (λ 为波长), 且各噪声源之间互不相关. 图 2 为噪声源几何分布示意图.

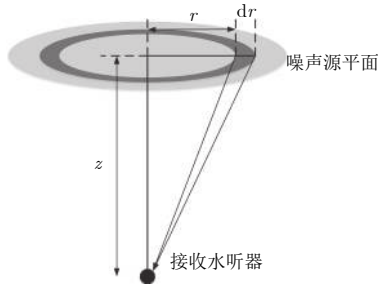


图 2 噪声源几何分布示意图
Fig. 2. Geometric distribution of the noise sources.

考虑半径为 r , 宽度为 dr 的圆环, 假设该圆环内所有噪声源到深度为 z 的接收水听器的声场传递函数均为 $G(r, z, z_0)$, 则圆环内所有噪声源在深度 z 处产生的声压为

$$p(r, z) = G(r, z, z_0) \sum_{n=1}^{N(r)} q_n e^{i\varphi_n} = G(r, z, z_0) Q e^{i\varphi(r)}, \quad (4)$$

其中, $N(r)$ 为圆环内噪声源个数, q_n 为单个噪声源激发的随机声压振幅, Q 为圆环内所有噪声源叠加后的声压振幅, φ_n 为单个噪声源的随机相位, $\varphi(r)$ 为圆环内所有噪声源叠加产生的随机相位. 假定单位面积内的噪声源强度为 $S(r)$ (单位为 $\text{dB}/\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}/\text{m}^2$), 则 (4) 式可改写为

$$p(r, z) = G(r, z, z_0) \sqrt{2\pi r dr S(r)} e^{i\varphi(r)}. \quad (5)$$

2.3 噪声的垂直方向性

噪声的垂直方向性描述了垂直面内各方向上

的噪声能量分布, 可由垂直阵通过常规波束形成测得. 在某一俯角 θ 上, 垂直阵的常规波数形成响应即代表该方向上的噪声能量. 假设垂直阵中各阵元深度为 $z_j, j = 1, 2, \dots, J$, 则对于某一圆环内的噪声源所产生的噪声场, 垂直阵的常规波束形成响应为

$$B(r, \theta) = \left\langle \left| \sum_{j=1}^J p(r, z_j) e^{ikz_j \sin \theta} \right|^2 \right\rangle, \quad (6)$$

其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示集合平均. 将 (5) 式代入 (6) 式, 有

$$B(r, \theta) = 2\pi r S(r) \left| \sum_{j=1}^J G(r, z_j, z_0) e^{ikz_j \sin \theta} \right|^2 dr. \quad (7)$$

由于各圆环的贡献是互不相关的, 垂直阵对噪声场的常规波束形成响应为

$$B(\theta) = \int_0^\infty 2\pi r S(r) \left| \sum_{j=1}^J G(r, z_j, z_0) e^{ikz_j \sin \theta} \right|^2 dr. \quad (8)$$

将 (3) 式代入 (8) 式中有

$$B(\theta) = \int_0^\infty \left| \sum_{m=1}^M a_m(r) \sqrt{2\pi r S(r)} \sum_{j=1}^J \Psi_m(z_0, z_j) e^{ikz_j \sin \theta} \right|^2 dr. \quad (9)$$

令

$$b_m(\theta) \equiv \sum_{j=1}^J \Psi_m(z_0, z_j) e^{ikz_j \sin \theta}, \quad (10)$$

$$\rho_{m_1 m_2} \equiv \int_0^\infty 2\pi r S(r) a_{m_1}(r) a_{m_2}^*(r) dr, \quad (11)$$

则 (9) 式可改写为

$$B(\theta) = \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M \rho_{m_1 m_2} b_{m_1}(\theta) b_{m_2}^*(\theta), \quad (12)$$

式中当 $m_1 = m_2$ 时, $b_m(\theta) b_m^*(\theta)$ 为第 m 阶简正波的垂直方向性; $\rho_{m_1 m_2}$ 为右端各项的叠加系数. 在浅海环境下, 各阶简正波之间的相干程度较弱, (11) 式中交叉项的叠加系数 $\rho_{m_1 m_2}, m_1 \neq m_2$ 可近似为 0^[8,12], 因此交叉项 $\sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M \rho_{m_1 m_2} b_{m_1}(\theta) b_{m_2}^*(\theta), m_1 \neq m_2$ 可忽略不计. 在深海环境下, 相邻阶简正波的相干程度增强, $\rho_{m_1 m_2}, m_1 \neq m_2$ 不可近似为 0^[27], 则交叉项 $\sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M \rho_{m_1 m_2} b_{m_1}(\theta) b_{m_2}^*(\theta), m_1 \neq$

m_2 也不能忽略.

将 (3) 式代入 (11) 式可得

$$\rho_{m_1 m_2} = \frac{4\pi^2}{\sqrt{k_{r m_1} k_{r m_2}}} \Psi_{m_1}(z_0) \Psi_{m_2}(z_0) \times \int_0^\infty S(r) e^{i(k_{r m_1} - k_{r m_2})r - (\alpha_{m_1} - \alpha_{m_2})r} dr. \quad (13)$$

由 (13) 式可知, $\Psi_m(z_0)$ 直接影响与第 m 阶简正波相关的叠加系数 $\rho_{m m'}$ 和 $\rho_{m' m}$ 的大小, 进而影响 (12) 式中右端与第 m 阶简正波相关的叠加项的强度, 并最终决定第 m 阶简正波在其来波方向上对噪声场能量贡献的大小. 因此, 本文中定义 $\Psi_m(z_0)$ 为第 m 阶简正波的简正波强度.

2.4 噪声的垂直相关性

噪声的垂直相关性描述了垂直两接收点上噪声的相关程度. 对于深度为 z_1 和 z_2 的两个接收点, 噪声的垂直相关系数定义为归一化后的噪声互谱密度. 噪声互谱密度的表达式为

$$S_{12} = \langle p(z_1) p^*(z_2) \rangle. \quad (14)$$

仅考虑半径为 r , 宽度为 dr 的圆环内的噪声源的贡献, 有

$$dS_{12} = \langle p(r, z_1) p^*(r, z_2) \rangle. \quad (15)$$

将 (5) 式代入 (15) 式, 有

$$dS_{12} = 2\pi r S(r) dr G(r, z_1, z_0) G^*(r, z_2, z_0). \quad (16)$$

由于各圆环的贡献是互不相关的, (14) 式可改写为

$$S_{12} = \int_0^\infty 2\pi r S(r) G(r, z_1, z_0) G^*(r, z_2, z_0) dr. \quad (17)$$

将 (3) 式代入 (17) 式, 有

$$S_{12} = \int_0^\infty 2\pi r S(r) \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M a_{m_1}(r) a_{m_2}^*(r) \times \Psi_{m_1}(z_1) \Psi_{m_2}(z_2) dr. \quad (18)$$

将 (11) 式代入 (18) 式, 可得

$$S_{12} = \sum_{m_1=1}^M \sum_{m_2=1}^M \rho_{m_1 m_2} \Psi_{m_1}(z_1) \Psi_{m_2}(z_2). \quad (19)$$

在浅海环境下, 由于 $\rho_{m_1 m_2}, m_1 \neq m_2$ 可近似为 0, (19) 式退化为右端非交叉项的叠加之和, 此时 S_{12} 的表达式与 Kuperman 和 Ingenito^[8] 给出的表达式一致. 但是, 在深海环境下, $\rho_{m_1 m_2}, m_1 \neq m_2$ 不可近似为 0, 则 (19) 式右端的交叉项 $\sum_{m_1=1}^M$

$\sum_{m_2=1}^M \rho_{m_1 m_2} \Psi_{m_1}(z_1) \Psi_{m_2}(z_2), m_1 \neq m_2$ 也不能忽略.

由 (13) 式可知, 简正波强度 $\Psi_m(z_0)$ 决定了 (19) 式右端与第 m 阶简正波相关的叠加项的强度, 表征第 m 阶简正波对噪声互谱密度 S_{12} 的影响大小.

对 S_{12} 进行归一化处理, 得到噪声的垂直相关系数为

$$\Gamma_{12} = \frac{S_{12}}{\sqrt{S_{11} S_{22}}}. \quad (20)$$

令 $d = |z_1 - z_2|$, 并做变量代换 $z = z_1$, 则 Γ_{12} 可写作 d 和 z 的函数, 即 $\Gamma_{12} = \Gamma(z, d)$. 下文中, 称 $\Gamma(z, d)$ 为深度 z 上的噪声垂直相关函数 $\Gamma(d)$.

3 仿真实验

在第 2 节的理论基础上, 本节将对有无表面声道及表面声道参数变化时的噪声垂直方向性和垂直相关性进行仿真分析.

3.1 仿真环境

首先, 图 3 给出了仿真中无表面声道时的海洋环境. 其中, 声速剖面为标准 Munk 曲线^[28], 声道轴深度 1300 m, 临界深度 4800 m. 存在表面声道时, 保持其他环境参数不变, 仅改变表面声道内的声速分布. 仿真中设定表面声道厚度 100 m, 声道内海水呈等温分布, 受静水压力的影响声道内的声速梯度为 0.0167 s^{-1} ^[29]. 定义存在表面声道时, 临界深度为进入表面声道以下传播的声能量的最小翻转深度. 则存在表面声道时, 临界深度上的声速等于表面声道下界深度上的声速. 仿真条件下, 存在表面声道时的临界深度为 4210 m. 有无表面声道情况下, 声速剖面对比图如图 4 所示. 仿真中, 假设噪声频率为 500 Hz, 设定噪声源深度为 $z_0 = 0.5 \text{ m}$, 单位面积上的噪声源强度为 $S(r) = 0 \text{ dB}/\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}/\text{m}^2$. 如无特殊说明, 下文中保持各项仿真参数不变.

3.2 表面声道对噪声垂直方向性的影响

仿真中噪声垂直方向性由一阵元个数 $J = 20$, 阵元间距为 1 m 的垂直阵通过常规波束形成计算得到. 使用 (12) 式计算得到有无表面声道时, 不同深度上的噪声垂直方向性 $B(\theta)$, 如图 5 所示. 图中 0° 表示海面方向, 180° 表示海底方向. 由于本文仅关注表面声道以下的噪声垂直空间特性, 下文中默

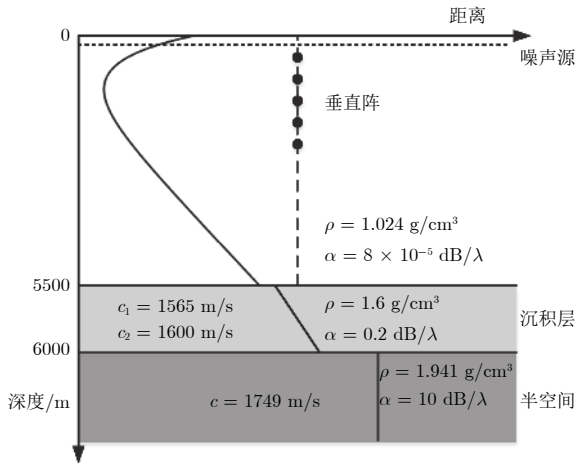


图 3 无表面声道时的海洋环境

Fig. 3. Underwater environment in absence of surface duct.

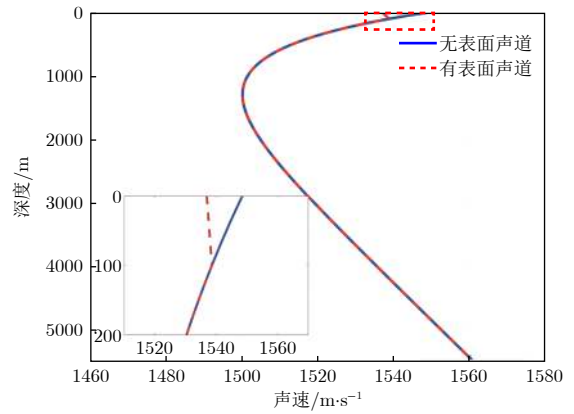


图 4 有无表面声道时的声速剖面

Fig. 4. Sound speed profiles in absence and in presence of surface duct.

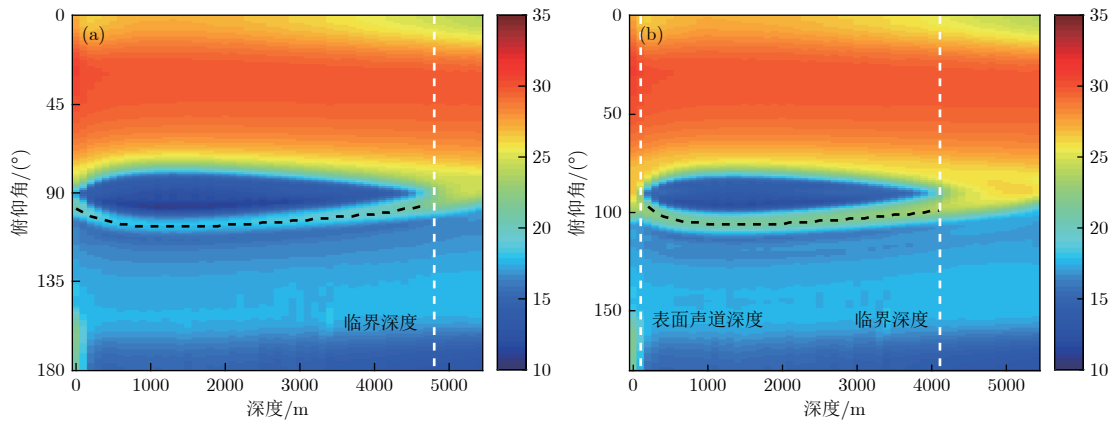


图 5 有无表面声道时不同深度上的噪声垂直方向性 (a) 无表面声道; (b) 有表面声道

Fig. 5. Vertical directionality of the noise at different depths in absence and in presence of surface duct: (a) In absence of surface duct; (b) in presence surface duct.

讨论的深度范围为表面声道以下。

由图 5(a) 和图 5(b) 可以看出, $B(\theta)$ 在有无表面声道时具有某些共同特征: 1) 在临界深度以上, $B(\theta)$ 在水平方向上始终存在一个水平凹槽, 且凹槽宽度随着深度远离声道轴而逐渐减小; 2) 在临界深度以下, 水平凹槽消失. 此外, $B(\theta)$ 在有无表面声道时存在明显的差异: 1) 在临界深度以上, 有无表面声道时, $B(\theta)$ 在水平凹槽的边缘靠近海底的一侧始终存在一个峰值, 如图中黑色虚线所示, 存在表面声道时, 这一峰值的高度明显升高, 即该方向上的噪声能量明显增强; 2) 在临界深度以下, 存在表面声道时, 水平方向上的噪声能量明显增强. 由 $B(\theta)$ 的变化可知, 存在表面声道时, 各深度上来自某一方向的噪声能量增强, 而其他方向的噪声能量几乎不变. 因此, 表面声道的存在同时引起各深度上的噪声级升高.

图 6(a) 和图 6(b) 分别给出了 1300 m (声道

轴深度, 临界深度以上) 和 5000 m (临界深度以下) 深度上, 有无表面声道时的 $B(\theta)$, 图中黑色虚线标明了 90° 方向, 即水平方向. 由图 6(a) 可以看出, 在 1300 m 深度上, $B(\theta)$ 在 90° 方向上存在一个凹槽, 且在 105° 方向上存在一个峰值, 存在表面声道时, 这一峰值的高度上升了大约 3.2 dB. 由图 6(b) 可以看出, 在 5000 m 深度上, $B(\theta)$ 在 90° 方向上的凹槽消失, 存在表面声道时 90° 方向上的噪声能量上升了大约 2.4 dB.

3.3 表面声道对噪声垂直相关性的影响

利用 (19) 式和 (20) 式计算得到有无表面声道时 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直相关函数 $\Gamma(d)$, 分别如图 7(a) 和图 7(b) 所示. 由于 $\Gamma(d)$ 随着垂直距离 d 增加振荡衰减, 当 d 较大时, 可近似认为 $\Gamma(d) = 0$, 即噪声是不相关的. 因此, 本文只关注 $0 \leq d/\lambda \leq 5$ 时的 $\Gamma(d)$.

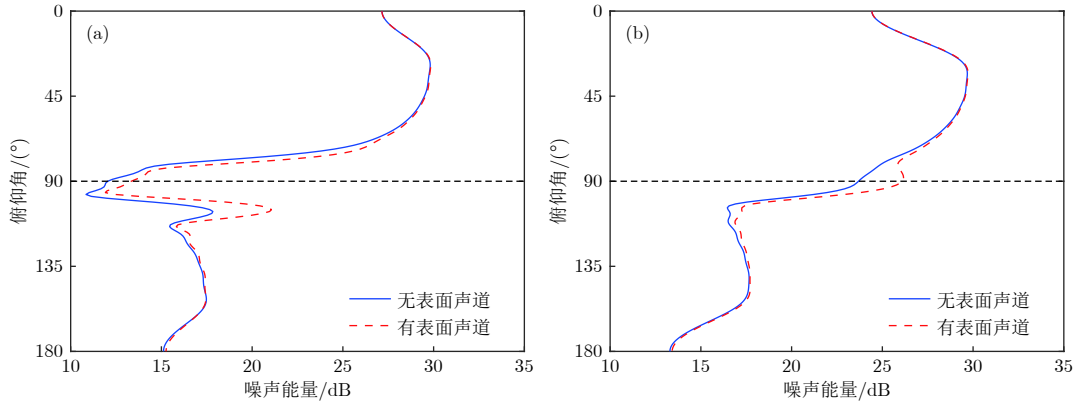


图 6 1300 和 5000 m 深度上有无表面声道时的噪声垂直方向性 (a) 1300 m; (b) 5000 m

Fig. 6. Vertical directionality of the noise at 1300 and 5000 m in absence and in presence of surface duct: (a) 1300 m; (b) 5000 m.

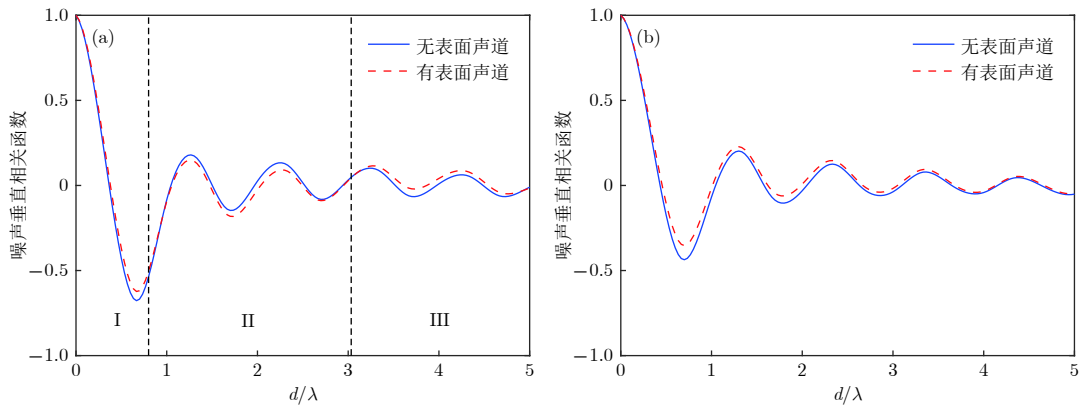


图 7 1300 和 5000 m 深度上有无表面声道时的噪声垂直相关函数 (a) 1300 m; (b) 5000 m

Fig. 7. Vertical coherence function of the noise at 1300 and 5000 m in absence and in presence of surface duct: (a) 1300 m; (b) 5000 m.

可以看出, 在临界深度以上和临界深度以下, 表面声道对噪声垂直相关性的影响规律也不相同. 在 1300 m 深度上, 存在表面声道时的 $\Gamma(d)$ 相较于无表面声道时的 $\Gamma(d)$ 随着垂直距离 d 的增加先后周期地向 +1 和 -1 方向偏移, 即噪声分别更趋近于正相干和负相干. 图 7(a) 中, 有无表面声道时 $\Gamma(d)$ 取值相等的点将 $0 \leq d/\lambda \leq 5$ 划分为三个区间, 如图中黑色虚线所示. 可以看出, 存在表面声道时, $\Gamma(d)$ 在区间 I 和区间 III 内向正相干方向偏移, 在区间 II 内向负相干方向偏移. 但是, 在 5000 m 深度上, 存在表面声道时的 $\Gamma(d)$ 相较于无表面声道时的 $\Gamma(d)$ 整体向正相干方向偏移. 总体来说, 表面声道对噪声垂直相关性的影响较小, 但表面声道的厚度增加将导致其对噪声垂直相关性的影响增强. 该现象将在下文中进一步讨论.

3.4 表面声道参数变化对噪声垂直空间特性的影响

由以上分析可知, 表面声道的存在将对深海噪

声的垂直空间特性产生一定的影响. 本节进一步分析该影响的大小随表面声道参数变化的规律. 由于表面声道对 $B(\theta)$ 的影响更加明显, 本小节中选择 $B(\theta)$ 的变化大小来表征表面声道对噪声垂直空间特性的影响程度. 由 Cox^[30] 的研究可知, 噪声垂直相关性可表示为噪声垂直方向性的函数, 因此表面声道对噪声垂直方向性的影响越大, 其对噪声垂直相关性的影响也越大.

表面声道的参数主要有表面声道的厚度 D 和表面声道内的声速梯度 G . 其中 D 与纬度和季节之间存在一定的关系, 其变化范围大约为 0—300 m. 仿真中考虑较常见的情况, 取 $D = 0$ (无表面声道), $D = 100$ m, $D = 150$ m. 保持其他参数不变, 计算得到 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直方向性 $B(\theta)$ 分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示.

由图 8(a) 和图 8(b) 可以看出, 在 1300 m 深度上, $B(\theta)$ 在 105° 左右的峰值高度随着 D 增大明显升高; 在 5000 m 深度上, 水平方向上的噪声能量随着 D 增大明显增强. 因此, D 增大不改变表面

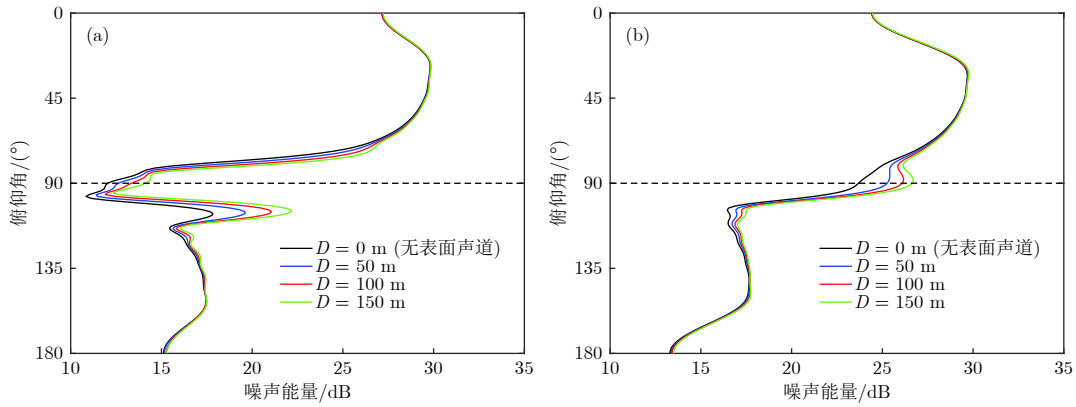


图 8 表面声道厚度为 0 (无表面声道), 50, 100 和 150 m 时, 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直方向性 (a) 1300 m; (b) 5000 m
Fig. 8. Vertical directionality of the noise at 1300 and 5000 m with the thickness of the surface duct varying from 0 to 50, 100, and 150 m: (a) 1300 m; (b) 5000 m.

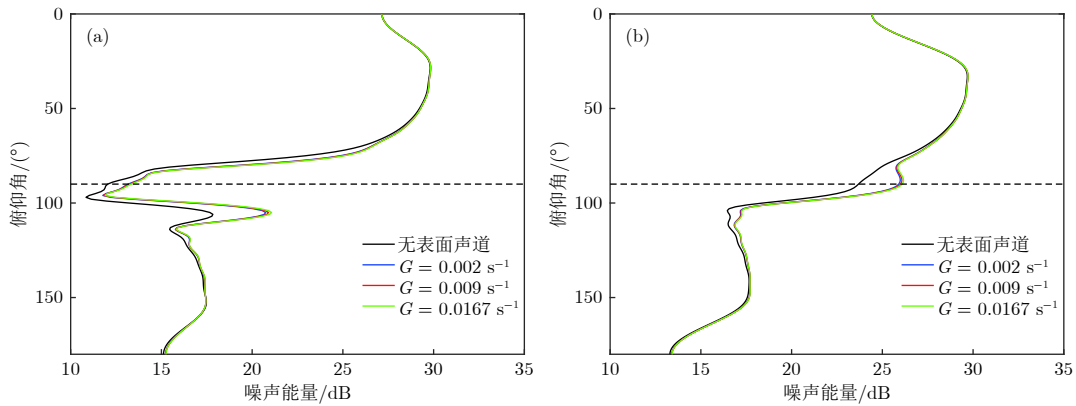


图 9 无表面声道及表面声道内的声速梯度为 0.002, 0.009 和 0.0167 s⁻¹ 时, 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直方向性 (a) 1300 m; (b) 5000 m
Fig. 9. Vertical directionality of the noise at 1300 and 5000 m in absence of surface duct and with the sound speed gradient in the 100 m-thick surface duct varying from 0.002 to 0.009 and 0.0167 s⁻¹: (a) 1300 m; (b) 5000 m.

声道对 $B(\theta)$ 的影响规律, 但其对 $B(\theta)$ 的影响程度明显增强. 相同地, D 增大也不改变表面声道对 $\Gamma(d)$ 的影响规律, 但其对 $\Gamma(d)$ 的影响程度明显增强.

当海洋表面的风浪搅拌作用较强时, 表面声道内的海水温度几乎不随深度变化, 此时表面声道内的声速梯度主要由静水压力引起, 大小约为 0.0167 s^{-1} . 当风浪搅拌作用较弱时, 表面声道内的声速梯度也随之减小. 因此, 实际海洋环境中, 表面声道内的声速梯度常小于 0.0167 s^{-1} [31]. 仿真中选取较常见的声速梯度 $0.002, 0.009$ 和 0.0167 s^{-1} 作为仿真参数, 保持其他参数不变, 计算得到 1300 和 5000 m 深度上的 $B(\theta)$ 分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示.

由图 9(a) 和图 9(b) 可以看出, G 取不同值时 $B(\theta)$ 的变化十分有限, 几乎可以忽略不计. 相同地, G 的变化对 $\Gamma(d)$ 的影响也很小, 几乎可以忽略不计.

根据以上结果可以认为, 表面声道对噪声垂

直空间特性的影响程度仅取决于 D , 而几乎与 G 无关.

4 分析与讨论

4.1 表面声道对各类简正波的影响

无表面声道时, 噪声源在深海声道中激发的简正波可分为三类, 即无效简正波 (invalid mode, IM), 折射简正波 (refracted mode, Refr-M) 和反射简正波 (reflected mode, Refl-M). 其中, IM 指对声场没有能量贡献的简正波; Refr-M 指到达海底之前已经发生翻转, 不与海底作用的简正波; Refl-M 指与海底发生作用的简正波. 存在表面声道时, 一部分 Refr-M 在到达表面声道下边界之前已经翻转, 进入表面声道内传播, 称为陷获简正波 (trapped mode, TM). 本文对 TM 进行单独讨论, 因此, 存在表面声道时, 噪声源激发的简正波分为

IM, TM, Refr-M 和 Refl-M 四类.

定义无表面声道时,海面声速为 c_{N-SD-s} ,海底声速为 c_{N-SD-b} ;有表面声道时,海面声速为 c_{SD-s} ,海底声速为 c_{SD-b} ,表面声道下边界处的声速为 c_{SD-i} .由图 4 可知,各声速始终满足 $c_{SD-s} < c_{SD-i} < c_{N-SD-s} <$

$c_{N-SD-b} = c_{SD-b}$.则根据模态函数的 WKB 近似,有无表面声道时,由噪声源激发的各类简正波的水平波数 k_{rm} 满足表 1 所列的条件.根据各声速的相对大小,表 1 同时给出了存在表面声道时,各类简正波的水平波数 k_{rm} 的区间大小变化情况.

表 1 有无表面声道时各类简正波的水平波数 k_{rm} 所处区间
Table 1. The intervals of k_{rm} for different kinds of normal modes in absence and in presence of surface duct.

简正波类型	Refl-M	Refr-M	TM	IM
无表面声道	$k_{rm} < \frac{\omega}{c_{N-SD-b}}$	$\frac{\omega}{c_{N-SD-b}} < k_{rm} < \frac{\omega}{c_{N-SD-s}}$	—	$\frac{\omega}{c_{N-SD-s}} < k_{rm}$
有表面声道	$k_{rm} < \frac{\omega}{c_{SD-b}}$	$\frac{\omega}{c_{SD-b}} < k_{rm} < \frac{\omega}{c_{SD-i}}$	$\frac{\omega}{c_{SD-i}} < k_{rm} < \frac{\omega}{c_{SD-s}}$	$\frac{\omega}{c_{SD-s}} < k_{rm}$
k_{rm} 区间大小变化	不变	增大	—	减小

根据表 1 内各类简正波的水平波数 k_{rm} 所处的区间,图 10(a) 和图 10(b) 分别给出了无表面声道和有表面声道时,各类简正波的本征值在复平面上的分布示意图.由于存在表面声道时不同类简正波的水平波数 k_{rm} 的区间增大、减小或保持不变,其阶数也将相应地增多、减少或保持不变.如图 10(b) 所示,存在表面声道时,IM 阶数减少,Refr-M 阶数增加,Refl-M 阶数基本不变,同时一部分简正波进入表面声道传播,即出现 TM.

表 2 给出了仿真条件下有无表面声道时各类简正波的阶数.可以看出,与无表面声道相比,存在表面声道时出现 24 阶 TM,同时 IM 减少

154 阶,Refr-M 增加 131 阶,而 Refl-M 的阶数基本不变.

图 11 给出了仿真条件下,有无表面声道时,各阶简正波的简正波强度 $\Psi(z_0)$.图中实线和虚线分别表示无表面声道和有表面声道;黑色、绿色和蓝色分别表示 IM, TM, Refr-M 和 Refl-M.由模态函数的 WKB 近似可知,IM 的模态函数在到达噪声源所在深度 z_0 前已经发生指数衰减,因此 IM 的 $\Psi(z_0)$ 在有无表面声道时均很小,如图 11 中黑色曲线所示.对于其他类简正波,其模态函数的第一个极大值点随着简正波阶数增加逐渐靠近海面,因此其 $\Psi(z_0)$ 随着简正波阶数增加逐渐

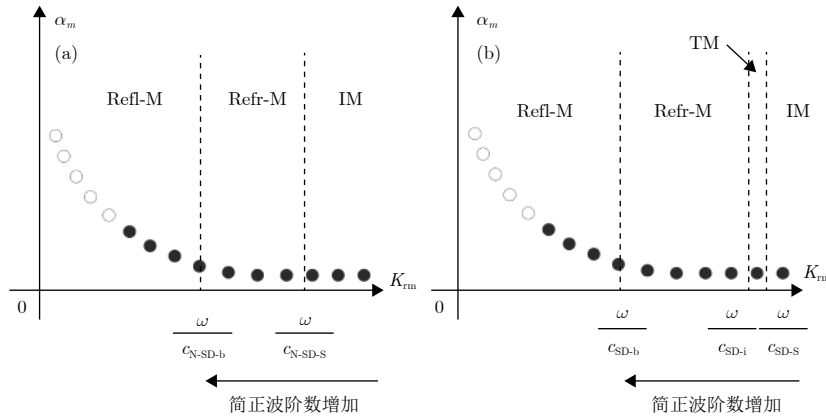


图 10 有无表面声道时,各类简正波的本征值在复平面上的分布 (a) 无表面声道; (b) 有表面声道

Fig. 10. Distribution of different kinds of normal modes on the complex plane in absence and in presence of surface duct: (a) In absence of surface duct; (b) in presence of surface duct.

表 2 仿真条件下有无表面声道时各类简正波的阶数

Table 2. The indexes of different kinds of normal modes in absence and in presence of surface duct under the simulation environment.

简正波类型	Refl-M	Refr-M	TM	IM
无表面声道	751—3611阶(共2861)	590—750阶(共161阶)	—	1—589 阶(共589阶)
有表面声道	752—3611阶(共2860阶)	460—751阶(共292阶)	436—459 阶(共24阶)	1—435 阶(共435阶)

增强,并在简正波阶数较高时趋于某一较大的值.对比图 11 中红色实线和红色虚线可以看出,存在表面声道时 Refr-M 的阶数增加,因此 Refr-M 的 $\Psi(z_0)$ 在更低的阶数开始增强,导致存在表面声道时 Refr-M 的 $\Psi(z_0)$ 明显强于无表面声道的情

况.由图 11 中蓝色实线和蓝色虚线可以看出, Refl-M 的阶数较高,其 $\Psi(z_0)$ 已增强到一个较大值,且 $\Psi(z_0)$ 随阶数增强的速度减缓,因此有无表面声道对 Refr-M 的 $\Psi(z_0)$ 影响较小,几乎可忽略不计.

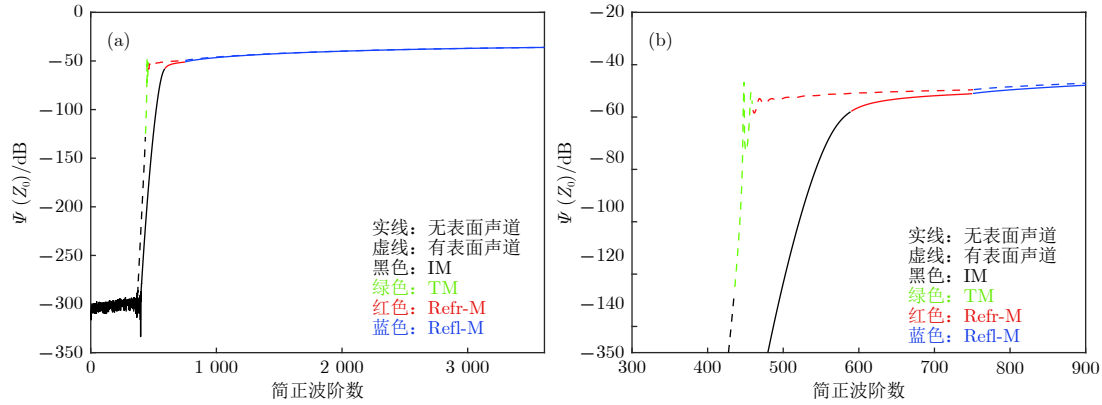


图 11 有无表面声道时各阶简正波的简正波强度 $\Psi(z_0)$ (a) 整体图; (b) 局部放大图

Fig. 11. Modal intensity $\Psi(z_0)$ of noise-sources-generated normal modes in absence and in presence of surface duct: (a) The overall plot; (b) zoom in Fig. (a).

综上,仅考虑对声场有能量贡献的简正波,表面声道对各类简正波的影响主要体现在两个方面,一是出现 TM;二是使 Refr-M 阶数增加,简正波强度增强.

当表面声道的厚度 D 增加时 c_{SD-s} 和 c_{SD-i} 发生同等程度的减小,其他声速不变.结合以上分析,此时 TM 和 Refr-M 的水平波数 k_{rm} 的区间 $\left[\frac{\omega}{c_{SD-i}}, \frac{\omega}{c_{SD-s}}\right]$ 和 $\left[\frac{\omega}{c_{SD-b}}, \frac{\omega}{c_{SD-i}}\right]$ 均增大,相应地 TM 和 Refr-M 的阶数增加,简正波强度增强.当表面声道内的声速梯度 G 增加时, c_{SD-s} 减小,其他声速不变.此时仅 TM 的水平波数 k_{rm} 的区间 $\left[\frac{\omega}{c_{SD-i}}, \frac{\omega}{c_{SD-s}}\right]$ 增大,则 TM 的阶数增加,简正波强度增强,而 Refr-M 的阶数和简正波强度几乎不变.

图 12(a) 和图 12(b) 分别给出了保持其他参数不变, D 和 G 取不同值时,各阶简正波的简正波强度 $\Psi(z_0)$,图中黑色、绿色、红色和蓝色分别表示 IM, TM, Refr-M 和 Refl-M,图 12(a) 中实线、点划线和虚线分别表示 $D = 50, 100$ 和 150 m,图 12(b) 中实线、点划线和虚线分别表示 $G=0.002, 0.009$ 和 0.0167 s^{-1} .为方便观察,图中仅给出关注区域的局部放大图.可以看出, D 增大时, TM 和 Refr-M 的阶数增多,简正波阶数增强; G 增大时,仅 TM 的阶数增多,简正波强度增强,Refr-M 的阶数

和简正波强度均无明显变化.

4.2 各类简正波变化对噪声垂直方向性的影响

由以上分析可知,存在表面声道时,噪声源激发的各类简正波中对声场有能量贡献的有 TM, Refr-M 和 Refl-M.本节依次分析这三类简正波对噪声垂直方向性的影响.

4.2.1 TM 对噪声垂直方向性的影响

图 13 给出了仿真条件下,存在表面声道时,仅计入 TM 计算得到的传播损失.可以看出,这类简正波在传播过程中会发生能量“泄漏”,导致一部分声能量进入表面声道以下传播.由于“泄漏”声能量的出射角度较小,所有“泄漏”能量都在临界深度附近翻转.由其传播特征可知, TM 将对表面声道以下,临界深度以上的噪声垂直方向性产生影响.

图 14 给出了仿真条件下,存在表面声道时,仅考虑 TM 由 (12) 式计算得到的 1300 m 深度上的噪声垂直方向性 $B(\theta)_{TM}$.由图 14 可以看出,在 1300 m 上, $B(\theta)_{TM}$ 在 75° 和 105° 左右存在两个峰值,峰值的高度分别为 1.73 和 0 dB 左右.对比图 6(a) 和图 14 可以看出,在 75° 和 105° 左右, $B(\theta)_{TM}$ 的峰值高度比 $B(\theta)$ 低 20 dB 以上.因此,

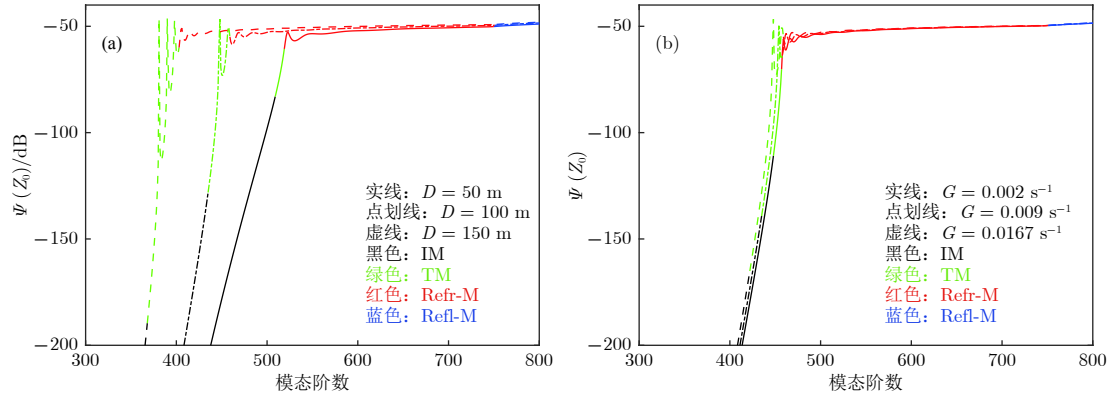


图 12 D 和 G 取不同值时各阶简正波的简正波强度 $\Psi(z_0)$ (a) D 取不同值; (b) G 取不同值

Fig. 12. Modal intensity $\Psi(z_0)$ of noise-sources-excited normal modes with different D and different G : (a) Different D ; (b) different G .

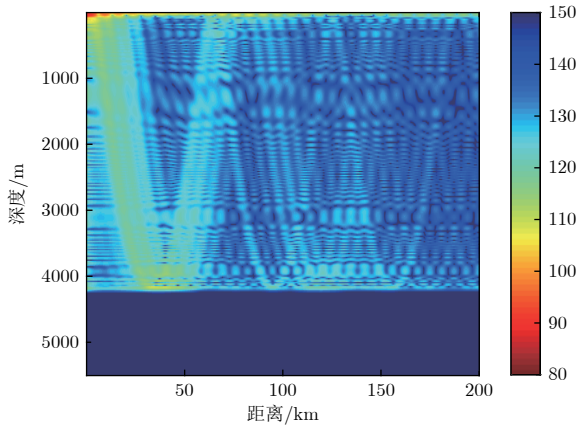


图 13 存在表面声道时, 仅考虑 TM 计算得到的传播损失
Fig. 13. Transmission loss calculated involving only TM in presence of surface duct.

TM 对噪声场的能量贡献很小, 不是表面声道引起噪声垂直方向性变化的主要因素.

4.2.2 Refr-M 对噪声垂直方向性的影响

由模式函数的 WKB 近似可知, 第 m 阶简正波对应于两列俯仰角分别为 $\pi/2 \pm \arccos(k_{rm}/k(z))$ 的声波, 相应地, 其对噪声场的能量贡献也集中在这两个方向上. 由表 1 可知, 在临界深度以上深度 z 处, 无表面声道和有表面声道时 Refr-M 的来波

俯仰角分别覆盖 $\left[\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c(z)}{c_{NoSD-b}}, \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c(z)}{c_{NoSD-s}}\right] \cup \left[\frac{\pi}{2} + \arccos \frac{c(z)}{c_{NoSD-s}}, \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{c(z)}{c_{NoSD-b}}\right]$ 和 $\left[\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c(z)}{c_{SD-b}}, \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c(z)}{c_{NoSD-i}}\right] \cup \left[\frac{\pi}{2} + \arccos \frac{c(z)}{c_{SD-i}}, \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{c(z)}{c_{SD-b}}\right]$. 由于 $c_{N-SD-b} = c_{SD-b}$, $c_{N-SD-s} <$

c_{SD-i} , 存在表面声道时, Refr-M 的俯仰角度覆盖范围将向 90° 方向 (即水平方向) 展宽. 在临界深度以

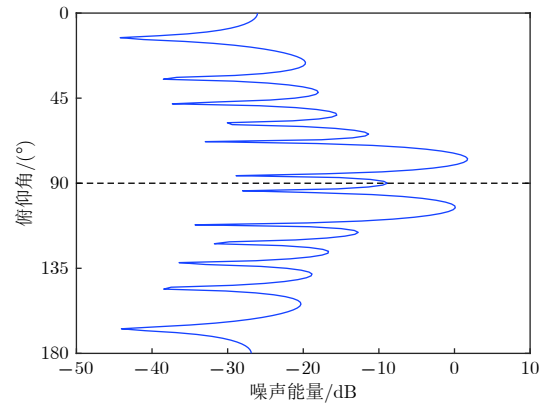


图 14 存在表面声道时, 仅考虑 TM 计算得到 1300 m 深度上的噪声垂直方向性

Fig. 14. Vertical directionality of the noise calculated involving only TM at 1300 m depth in presence of surface duct.

下深度 z 处, $k_{rm} > k(z)$ 的 Refr-M 已经发生翻转, 则无表面声道和有表面声道时, Refr-M 的来波俯仰角分别覆盖 $\left[\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c(z)}{c_{NoSD-b}}, \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{c(z)}{c_{NoSD-b}}\right]$ 和 $\left[\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c(z)}{c_{SD-b}}, \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{c(z)}{c_{SD-b}}\right]$. 由 $c_{N-SD-b} = c_{SD-b}$ 可知, 在临界深度以下, 有无表面声道时 Refr-M 的来波俯仰角范围不变. 另外, 由于表面声道的存在导致 Refr-M 的简正波强度增强, Refr-M 在其来波方向上对噪声场的能量贡献也随之增强.

图 15(a) 和图 15(b) 分别给出了仿真环境下, 有无表面声道时, 仅考虑 Refr-M 计算得到的 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直方向性 $B(\theta)_{Refr-M}$.

在仿真条件下, 由 Refr-M 的水平波数计算可知, 无表面声道和有表面声道时, Refr-M 在 1300 m 深度上的来波俯仰角分别覆盖 $[74^\circ, 75.6^\circ] \cup [104.4^\circ, 106^\circ]$ 和 $[74^\circ, 77.2^\circ] \cup [102.8^\circ, 106^\circ]$. 因此,

图 15(a) 中, 有无表面声道时 $B(\theta)_{\text{Refr-M}}$ 均在 75° 和 105° 左右存在两个峰值, 但峰的宽度在存在表面声道时向水平方向发生一定的展宽. 同时, 由于 Refr-M 的简正波强度在存在表面声道时增强, 图 15(a) 中 $B(\theta)_{\text{Refr-M}}$ 在 75° 和 105° 左右的峰值高度在存在表面声道时均上升了 4.5 dB 左右.

类似地, 在仿真条件下, 由 Refr-M 的水平波

数计算可知, 有无表面声道时, Refr-M 在 5000 m 深度上的来波俯仰角覆盖范围均为 $[84.05^\circ, 95.95^\circ]$. 相应地, 图 15(b) 中, $B(\theta)_{\text{Refr-M}}$ 在有无表面声道时均在 90° 左右存在一个峰值, 且峰的宽度在有无表面声道时无明显变化. 但由于存在表面声道时 Refr-M 的简正波强度增强, 图 15(b) 中 $B(\theta)_{\text{Refr-M}}$ 的峰值高度在存在表面声道时上升了大约 2.6 dB.

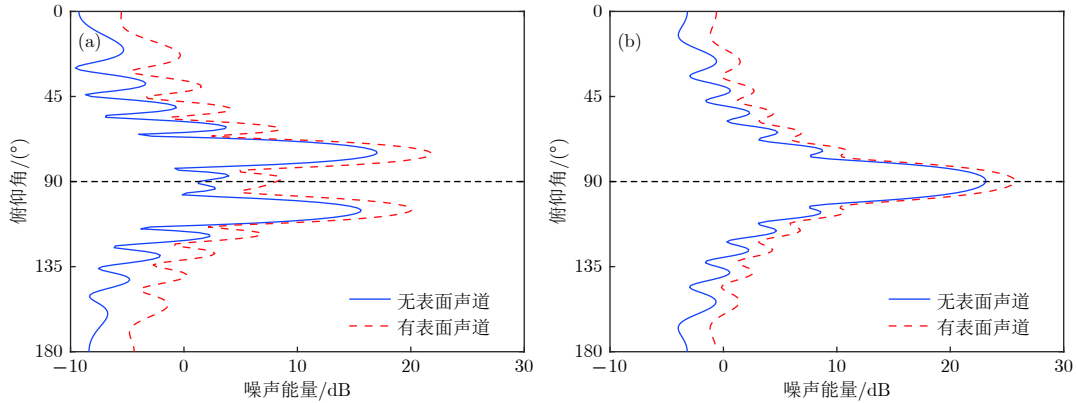


图 15 有无表面声道时, 仅考虑 Refr-M 计算得到的 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直方向性 (a) 1300 m; (b) 5000 m

Fig. 15. Vertical directionality of the noise calculated involving only Refr-M in absence and in presence of surface duct at 1300 and 5000 m: (a) 1300 m; (b) 5000 m.

4.2.3 Refl-M 对噪声垂直方向性的影响

4.1 小节中已经指出, 表面声道的存在对 Refl-M 的水平波数 k_m 的区间范围和简正波强度的影响很小, 几乎可以忽略不计. 因此, Refl-M 的来波方向及其在来波方向上贡献的噪声能量在有无表面声道时无明显变化.

图 16(a) 和图 16(b) 分别给出了仿真条件下, 有无表面声道时, 仅考虑 Refl-M 计算得到的 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直方向性 $B(\theta)_{\text{Refl-M}}$.

可以看出, 在 1300 和 5000 m 深度上, 存在表面声道时 $B(\theta)_{\text{Refl-M}}$ 均未发生明显的变化.

对比图 6(a)、图 15(a) 和图 16(a) 可以看出, 在 1300 m 深度上, Refl-M 对噪声垂直方向性 $B(\theta)$ 的影响很小, 存在表面声道时 Refr-M 在 105° 左右对噪声场的能量贡献增强导致 $B(\theta)$ 在该方向上的峰值高度上升, 但 Refr-M 在 75° 左右的噪声能量贡献增强被来自海面的直达噪声能量所掩盖, $B(\theta)$ 在该方向上变化并不明显. 相同地, 由图 6(b)、图 15(b)

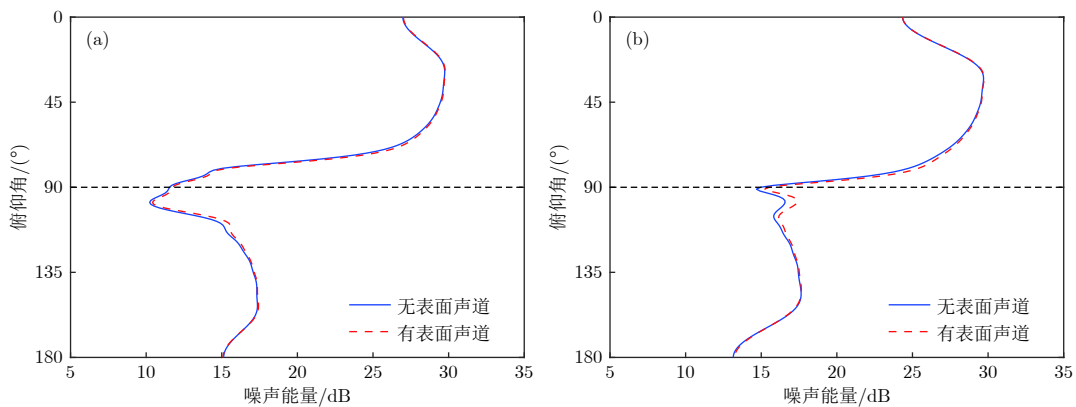


图 16 有无表面声道时, 仅考虑 Refl-M 计算得到的 1300 和 5000 m 深度上的噪声垂直方向性 (a) 1300 m; (b) 5000 m

Fig. 16. Vertical directionality of the noise calculated involving only Refl-M in absence and in presence of surface duct at depth 1300 and 5000 m: (a) 1300 m; (b) 5000 m.

和图 16(b) 可以看出, 在 5000 m 深度上, Refl-M 对 $B(\theta)$ 的影响很小, 存在表面声道时 $B(\theta)$ 在水平方向上的高度上升是由 Refr-M 在水平方向上的噪声能量贡献增强引起的.

4.3 各类简正波变化对噪声垂直相关性的影响

分析表明, IM 和 TM 对表面声道以下噪声场的能量贡献很小, 几乎可以忽略不计. 因此, 噪声垂直相关性受 IM 和 TM 的影响可近似忽略, 主要由 Refr-M 和 Refl-M 决定.

图 17(a) 和图 17(b) 分别给出了仿真条件下, 有无表面声道时, 1300 和 5000 m 深度上考虑全波场得到的噪声垂直相关函数 $\Gamma(d)$, 仅考虑 Refr-M 得到的噪声垂直相关函数 $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ 和仅考虑 Refl-M 得到的噪声垂直相关函数 $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$. 图中 $\Gamma(d)$, $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ 和 $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$ 分别以黑色、蓝色和红色曲线给出; 且实线和虚线分别表示无表面声道和有表面声道.

图 17(a) 中, 蓝色实线和蓝色虚线基本重合, 表明表面声道的存在对 $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$ 几乎没有影响, 原因是有无表面声道时 Refl-M 的阶数和简正波强度几乎没有发生变化. 对比图 17(a) 中红色实线和红色虚线可以看出, 表面声道的存在导致 $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ 的振荡周期变大, 幅度衰减变快. 结合 (18) 式可知, 该现象是由 Refr-M 的阶数增加和简正波强度增强引起的. 需要指出的是, 存在表面声道时 Refr-M 的阶数增加, 简正波强度增强, 导致其对 $\Gamma(d)$ 的影响变大, 使 $\Gamma(d)$ 向 $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ 方向发生更大幅度的偏移, 是存在表面声道时 $\Gamma(d)$ 发生变化的主要原因. 对比图 17(a) 中所有实线可以看出, 黑色实

线和蓝色实线基本重合, 即无表面声道时 $\Gamma(d)$ 与 $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$ 基本一致, Refr-M 对 $\Gamma(d)$ 几乎没有影响. 对比图 17(a) 中所有虚线可以看出, 当红色虚线位于 0 以上时, 黑色虚线偏离蓝色虚线向 +1 (即正相干) 方向靠近, 而当红色虚线位于 0 以下时, 黑色虚线偏离蓝色虚线向 -1 (即负相干) 方向靠近. 因此, 存在表面声道时, Refr-M 对 $\Gamma(d)$ 的影响增强, 导致存在表面声道时的 $\Gamma(d)$ 相较于无表面声道时的 $\Gamma(d)$ 随着 d 的增加先后周期地向正相干和负相干方向偏移.

图 17(b) 中的结果与图 17(a) 是类似的, 不同的是, 在临界深度以下, 有能量贡献的 Refr-M 已经临近其翻转深度, 其模态函数随深度振荡的周期增大, 导致 $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ 的振荡周期也随之变大. 如图 17(a) 中红色实线和红色虚线所示, 有无表面声道时 $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ 在 $0 \leq d/\lambda \leq 5$ 范围内几乎均大于 0. 因此, 作为 Refr-M 和 Refl-M 共同作用的结果, 有无表面声道时 $\Gamma(d)$ 均偏离 $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$ 向正相干方向靠近, 但在有表面声道时, Refr-M 的影响更大, 导致 $\Gamma(d)$ 偏离 $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$ 的幅度更大. 因此, 存在表面声道时的 $\Gamma(d)$ 相较于无表面声道时的 $\Gamma(d)$ 整体向正相干方向偏移.

由 4.2 和 4.3 节的分析可知, 表面声道对噪声垂直空间特性的影响主要是由存在表面声道时噪声源激发的 Refr-M 阶数增加, 简正波强度增强引起的. 因此, 当表面声道的厚度 D 增加时, Refr-M 的阶数增加, 简正波强度增强, 表面声道对噪声垂直空间特性的影响程度也随之增强; 当表面声道内的声速梯度 G 增加时, Refr-M 的阶数和简正波强度无明显变化, 则表面声道对噪声垂直空间特性的影响程度也无明显变化.

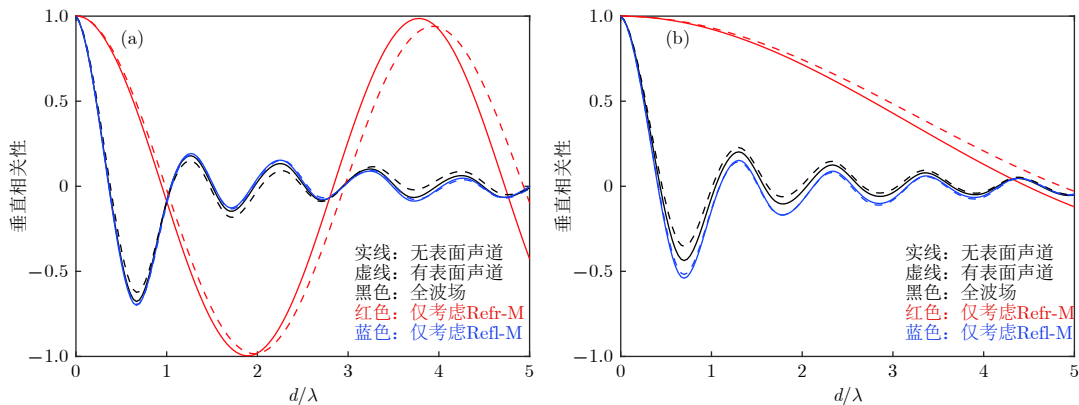


图 17 有无表面声道时, 1300 和 5000 m 深度上的 $\Gamma(d)$, $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ 和 $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$ (a) 1300 m; (b) 5000 m

Fig. 17. $\Gamma(d)$, $\Gamma(d)_{\text{Refr-M}}$ and $\Gamma(d)_{\text{Refl-M}}$ in absence and in presence of surface duct at 1300 and 5000 m: (a) 1300 m; (b) 5000 m.

5 结 论

本文以 Pekeris 割线下的简正波模型描述噪声信号的传播过程,研究了深海环境下,表面声道对表面声道以下风成噪声垂直空间特性(包括噪声垂直方向性和垂直相关性)的影响.研究表明,在临界深度以上和临界深度以下,表面声道对噪声垂直空间特性的影响规律不同:在临界深度以上,表面声道的存在导致噪声垂直方向性在水平凹槽边缘靠近海底方向上的峰值升高,噪声垂直相关性随垂直距离增加先后周期地向正相干和负相干方向偏移;在临界深度以下,表面声道的存在导致水平方向上的噪声能量增强,噪声垂直相关性整体向正相干方向发生偏移.当表面声道的厚度增加时,表面声道对噪声垂直空间特性的影响明显增强;当表面声道内的声速梯度增加时,表面声道对噪声垂直空间特性的影响程度无明显变化.进一步分析表明,表面声道的存在引起噪声源激发的折射简正波的阶数增加、简正波强度增强,导致折射简正波在其来波方向上对噪声场的能量贡献增强,对噪声垂直相关性的影响增大,是表面声道引起噪声垂直空间特性变化的主要原因.

感谢西北工业大学航海学院周建波博士后的讨论.

参考文献

- [1] Carey W M, Evans R B 2011 *Ocean Ambient Noise* (New York: Springer) pp1-7
- [2] Waite A D 2002 *Sonar for Practising Engineer* (Hoboken: John Wiley & Sons) pp 86-89
- [3] Yin B Y, Ma L, Lin J H 2012 *Acta Acustica* **37** 424 (in Chinese) [殷宝友, 马力, 林建恒 2012 声学学报 **37** 424]
- [4] Jiang P F, Lin J H, Sun J P, Yi X J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 014306 (in Chinese) [江鹏飞, 林建恒, 孙军平, 衣雪娟 2017 物理学报 **66** 014306]
- [5] Chapman N R, Cornish J W 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 782
- [6] Lin J H, Chang D Q, Ma L, Li X J, Jiang G J 2001 *Acta Acustica* **26** 217 (in Chinese) [林建恒, 常道庆, 马力, 李学军, 蒋国健 2001 声学学报 **26** 217]
- [7] Cron B F, Sherman C H 1962 *J. Acoust. Soc. Am.* **34** 1732
- [8] Kuperman W A, Ingenito F 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **67** 1988
- [9] Carey W M, Evans R B, Davis J A, Botseas G 1990 *IEEE J. Oceanic Eng.* **15** 324
- [10] Perkins J S, Kuperman W A, Ingenito F, Fialkows L T, Glattere J 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 739
- [11] Hamson R M 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **78** 1702
- [12] Yang T C, Yoo K 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **101** 2541
- [13] Rouseff D, Tang D 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 1284
- [14] Jiang P F, Lin J H, Ma L, Jiang G J 2013 *Acta Acustica* **38** 724 (in Chinese) [江鹏飞, 林建恒, 马力, 蒋国健 2013 声学学报 **38** 724]
- [15] Zhou J B, Piao S C, Liu Y Q, Zhu H H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 014301 (in Chinese) [周建波, 朴胜春, 刘亚琴, 祝捍皓 2017 物理学报 **66** 014301]
- [16] Buckingham M J 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 950
- [17] Liu S Q, Li F H 2015 *Tech. Acoust.* **34** 143 (in Chinese) [刘珊珊, 李风华 2015 声学技术 **34** 143]
- [18] Wang J Y, Li F H 2016 *Tech. Acoust.* **35** 109 (in Chinese) [王璟琰, 李风华 2016 声学技术 **35** 109]
- [19] Liu B S, Lei J Y 2010 *Principle of Underwater Acoustics* (Haerbin: Harbin Engineering University Press) pp26-27(in Chinese) [刘伯胜, 雷家煜 2010 水声学原理(哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社)第26—27页]
- [20] Wang D Z, Shang E C 2013 *Underwater Acoustics* (Beijing: Science Press) pp24-25(in Chinese) [汪德昭, 尚尔昌 2013 水声学(北京: 科学出版社)第24—25页]
- [21] Labianca F M 1973 *J. Acoust. Soc. Am.* **53** 1137
- [22] Urick R J 1975 *J. Acoust. Soc. Am.* **58** S121
- [23] Pekeris C L 1948 *Geol. Soc. Am. Mem.* **27** 1
- [24] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (New York: Springer) pp25-26
- [25] Ewing W M, Jardetzky W S, Press F 1957 *Elastic Waves in Layered Media* (New York: McGraw-Hill) pp 126-137
- [26] Bartberger C L 1977 *J. Acoust. Soc. Am.* **61** 1643
- [27] Jiang G Y, Sun C, Liu X H, Xie L, Shao X, Kong D Z 2017 *OCEANS Aberdeen*, UK, June 19-22 2017 pp1-6
- [28] Munk W H 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **55** 220
- [29] Duan R 2016 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [段睿 2016 博士学位论文(西安: 西北工业大学)]
- [30] Cox H 1973 *J. Acoust. Soc. Am.* **54** 1289
- [31] Zhang X, Zhang Y G, Zhang S J, Wu S H 2009 *J. Trop. Oceanograph.* **28** 23 (in Chinese) [张旭, 张永刚, 张胜军, 吴世华 2009 热带海洋学报 **28** 23]

Influence of surface duct on the vertical spatial characteristics of wind-generated noise in deep ocean*

Jiang Guang-Yu¹⁾²⁾ Sun Chao^{1)2)†} Xie Lei¹⁾²⁾ Liu Xiong-Hou¹⁾²⁾³⁾

1) (*School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

2) (*Key Laboratory of Ocean Acoustics and Sensing, Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072, China*)

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

(Received 30 September 2018; revised manuscript received 20 November 2018)

Abstract

Vertical spatial characteristics of the wind-generated noise include the noise vertical directionality and the noise vertical coherence, which seriously affect the performance of sonar devices and play an important role in ocean environment parameters inversion. In this paper, we investigate the influence of surface duct on the noise vertical spatial characteristics at the depths below the duct. The Kuperman-Ingenito (K/I) model is employed to describe the distribution of the noise sources, and Pekeris-branch-cut-based normal modes are used to represent the Green's functions between the noise sources and the receivers. Both the noise vertical directionality and the noise vertical coherence are expressed as a function of the normal modes, so that we can investigate the physical reason for the variance of the noise vertical spatial characteristics by analyzing the variance of the normal modes. The numerical simulations on the noise vertical spatial characteristics show that the influence of surface duct above the critical depth is different from that below the critical depth. Above the critical depth, there exists a peak in the noise vertical directionality at the edge of the horizontal notch close to the bottom side. In the presence of surface duct, this peak significantly rises up, and the noise vertical coherence deviates from that in the absence of surface duct and tends to be perfect positive coherence and perfect negative coherence periodically as the vertical distance between the two receivers increases. On the other hand, below the critical depth, the noise power comes from the horizontal direction becomes stronger and the noise vertical coherence tends to be perfect positive coherence in the presence of surface duct as compared with the case in the absence of surface duct. Moreover, the influence will become severer as the thickness of the surface duct increases, while almost keep unchanged when the sound speed gradient in the surface duct varies. The modal analysis indicates that the noise source excites more refracted normal modes with stronger modal intensity in the presence of surface duct, and the excited refracted normal modes become more and stronger if the surface duct is thicker. As the result, the increase of the refracted mode number and the enhancement of their modal intensity cause the vertical spatial characteristics of noise to change.

Keywords: wind-generated noise, surface duct, noise vertical directionality, noise vertical coherence, normal modes

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m, 43.50.+y

DOI: [10.7498/aps.68.20181794](https://doi.org/10.7498/aps.68.20181794)

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11534009), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51479169), and the Opening Project of State Key Laboratory of Acoustics, China (Grant No. SKLA201702).

† Corresponding author. E-mail: csun@nwpu.edu.cn