

深海高能量海底声弹射路径的激发机理研究*

梁民帅¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 吴涵雨¹⁾²⁾³⁾ 江厚萱¹⁾²⁾³⁾ 师俊杰^{1)2)3)†} 孙大军¹⁾²⁾³⁾

1) (哈尔滨工程大学, 水声技术全国重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 工业和信息化部, 哈尔滨 150001)

3) (哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

4) (青岛哈尔滨工程大学创新发展中心, 青岛 266000)

(2025年6月13日收到; 2025年9月9日收到修改稿)

甚低频声波因具有强的穿透性, 其在海洋环境中的传播特性可受到海底深层地质结构的影响. 在已开展的海洋试验中, 垂直阵观测到水面航船的甚低频辐射噪声可激发高能量的深层海底声弹射路径, 但其激发机理尚不明确, 本文针对该现象开展理论基础研究. 基于海底的沉积过程构建包含声速梯度的等效海底模型, 并利用波数积分数值计算方法模拟声波跨海水-海底-海水的传播过程, 深入探究深层海底结构对声传播的影响, 进而揭示高能量海底声弹射现象的激发机理和相关特性规律. 研究表明, 受地质作用影响, 海底沉积层中可产生一定的声速梯度, 该梯度结构使得入射的甚低频声波在深层海底介质中传播时可发生“声翻转”效应, 将大部分能量重新辐射回水声场, 从而激发高能量海底声弹射路径. 在该过程中, 沉积层的厚度和声速结构共同作用影响表层和深层弹射路径的观测特征. 本研究深化了深海甚低频声传播机理的认知, 为利用海底弹射波进行甚低频目标的声探测应用提供理论支撑.

关键词: 甚低频声探测, 声速连续海底, 海底声弹射, 声翻转

PACS: 43.30.+m, 92.10.Wa, 92.10.-c

DOI: 10.7498/aps.74.20250766

CSTR: 32037.14.aps.74.20250766

1 引言

随着声隐身技术的发展和安静/准安静型水下目标的出现, 目标在高频段的噪声辐射强度已大幅降低, 基本淹没在海洋背景噪声中, 这为传统水下声探测技术带来极大挑战. 然而, 当前受限于机械结构的内部振动^[1]和降噪材料的吸声性能^[2], 目标运动时在甚低频段(≤ 100 Hz)的辐射噪声依然很强, 特别是水下探测所关注的线谱信号. 这使得甚低频声探测成为被动探测系统远距离感知目标的重要发展方向^[3-5].

现有研究表明^[6-9], 在深海临界深度以下布放垂直阵是一种有效的目标声探测方式, 该方法主要

利用深海可靠声传播路径具有低传播损失和低环境噪声的优势. 由于深海可靠声路径中直达波和海面一次反射波未与海底发生作用, 在相同距离下, 其传播损失比浅海小 10—20 dB^[10], 并且临界深度以下的环境噪声也比临界深度以上低 5—20 dB^[11]. Zurk 等^[6-8]和 Kniffin 等^[9]指出深海可靠声路径在距离-深度平面存在周期性的干涉结构, 并且该周期结构与声源深度存在函数关系, 可利用该特性进行目标深度的判定, 并据此提出基于傅里叶变换^[6-8]和波束强度干涉零点间距^[9]的深度判定方法. 这些方法适用于甚低频线谱信号探测, 但要获得准确的目标深度估计结果, 则要求一定的距离历程. 另外, 对于宽带辐射信号, 可利用声场频率域的干涉结构^[12,13]和多途时延^[14]进行目标深度估计.

* 青岛市自然科学基金(批准号: 25-1-1-2-zyyd-jch)和哈尔滨工程大学青年科学家培育基金(批准号: 79000017)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shijunjie@hrbeu.edu.cn

除可靠声路径外, 针对声影区的探测技术近年来也取得了重要进展, 使得利用声影区信息进行目标探测成为可能. 该技术主要利用海底声弹射路径的声场特征, 现有声影区探测的研究中, 理论模型主要采用“海水-半无限海底”的简化海底模型, 并提出利用表层海底弹射波的干涉结构^[15]及多径时延^[16-18]等声场特征量估计声源深度和距离信息. 相比高频声波, 甚低频声波具有更长的波长和更强的声穿透能力, 在声传播过程中可穿透海底表层松散沉积物, 与深部海底地层介质发生耦合作用, 激发复杂海底地震波场和携带海底介质信息的海底弹射波, 继而对水下声探测技术所关注的甚低频水声场特性产生重要影响. 本文在深海甚低频 (20—100 Hz) 海试试验中观测到了新的现象: 深海垂直阵可观测到能量显著高于表层海底弹射路径的海底弹射声信号. 特征分析表明该信号来自深部海底地层的声传播路径, 这一发现打破了传统海底弹射区能量主要源于表层海底弹射路径的认知, 为提高海底弹射波探测能力, 实现深海远距离探测提供新的可能. 然而, 目前关于高能量海底声弹射路径的激发机理尚未得到明确阐释.

针对这一机理问题, 本文以深海垂直阵的观测现象为切入点, 详细地描述数据处理过程, 发现并分析深层海底声弹射路径能量显著高于表层海底弹射路径这一特殊现象; 结合观测现象和试验海域的地质构造结构, 构建具有连续声速的等效声学海底模型, 并采用 Wenzel-Kramers-Brillouin (WKB) 近似方法对连续海底模型下的声波系数进行理论分析; 最后, 利用波数积分方法对甚低频声波跨介质传播过程进行数值仿真, 探究该现象的物理机理和海底声速对声场特性的影响规律, 继而阐明高能量深层海底声弹射路径的激发机理.

2 高能量海底声弹射路径现象

2.1 试验场景

深海垂直阵观测试验的时间为 2023 年 4 月, 地点位于南海深海海域, 试验地点的海水深度约为 4360 m; 试验中接收垂直阵采用坐底布放的方式, 其包含 64 个接收基元, 基元间距 7.5 m, 对应中心频率为 100 Hz, 阵列总长度为 480 m, 系统采样率为 3 kHz. 试验期间, 采用声速剖面仪测量设备布放海域的声速剖面如图 1 所示. 另外, 通

过试验船搭载的船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 发现, 在试验时段 11:12—12:20(UTC+8), 有一大型货轮 (AIS 信息显示吃水深度 10 m) 沿最近会遇点 (CPA) 为 3.3 km 的航线通过试验海区, 其航迹如图 1 所示.

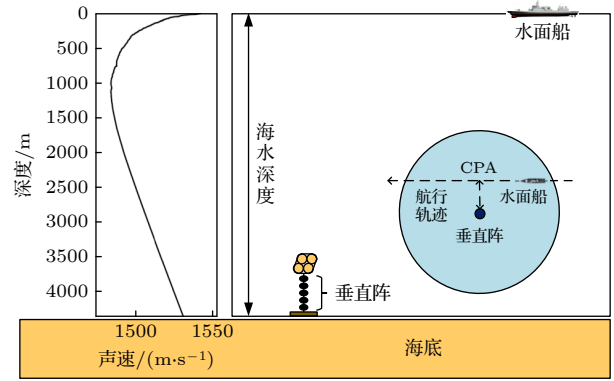


图 1 海洋试验场景

Fig. 1. Diagram of ocean experiment.

2.2 试验数据处理分析

首先对 64 元垂直阵采集的声学信号进行宽带波束形成处理^[19], 处理过程中将信号以 10 s 为窗长进行快速傅里叶变换处理以获取频谱信息, 对应频率分辨率为 0.1 Hz; 在频段 20—100 Hz 范围内, 对每个频点 f 进行常规波束形成处理, 具体过程如下.

水下布放垂直阵对应的阵列导向矢量为

$$\mathbf{w}(\varphi) = [e^{-j\phi_1(\varphi)}, e^{-j\phi_2(\varphi)}, \dots, e^{-j\phi_N(\varphi)}]^T, \quad (1)$$

其中 $\phi_N(\varphi) = \frac{2\pi f}{c}(n - N_c)d \sin \varphi$, c 为水中声速, n 为阵元编号, N_c 为参考阵元编号, d 为阵元间距, φ 为俯仰角.

将垂直阵 64 个阵元接收到的频域数据构成一个列向量 $\mathbf{s}(f)$, 则在单一频点 f 处, 对应俯仰角 φ 的波束输出功率 $P(f, \varphi)$ 为

$$P(f, \varphi) = \frac{1}{64} |\mathbf{w}^H(\varphi) \mathbf{s}(f)|^2. \quad (2)$$

最后, 将处理频段 (20—100 Hz) 范围内各频率点的波束输出进行非相干累积, 获得宽带波束输出 $B(\varphi)$:

$$B(\varphi) = \frac{1}{M_f} \sum_{i=1}^{M_f} |P_i(\varphi)|, \quad (3)$$

其中 M_f 为频率点总数.

图 2 所示为经宽带波束形成处理后的俯仰角时间历程 (BTR), 横轴已根据 AIS 记录换算为水平距离. 在所处理的时段内, 可清晰地观测到该货轮的运动过程, 对图中不同传播方向的波簇轨迹进行历程跟踪和提取, 其中提取直达-海面波簇对应的俯仰角时间历程如图 2 中蓝线所示. 结合图 3 中 AIS 记录信息可知, 该货轮在 11.8 h 左右通过 CPA 点, 对应距离约为 3.3 km. 基于该俯仰角历程, 结合试验海域的实测声速剖面及货轮与阵列的水平距离, 利用射线声学理论计算该条件下其表层海底 (4360 m) 弹射路径对应的俯仰角度值, 结果如图 2 中粉色虚线所示. 在粉色虚线处存在声能量较弱的传播路径, 说明垂直阵观测到自表层海底反射的声波, 由于底质对声能量的吸收, 其能量较弱. 除此之外, 还可观测到黑色虚线路径的能量显著高于表层海底的声弹射路径, 且该路径在海底方向约 45° 处出现快速的能量突变. 本文的数据处理中, 采用了宽带波束形成处理, 宽带信号的连续频谱使得单频声波的相位起伏在频域产生统计平滑效应,

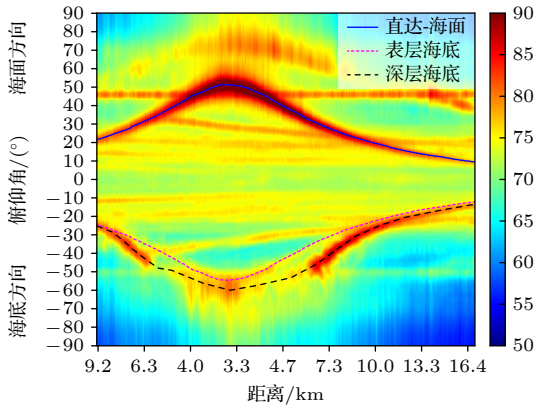


图 2 宽带 BTR (20—100 Hz)

Fig. 2. BTR for broadband frequencies 20–100 Hz.

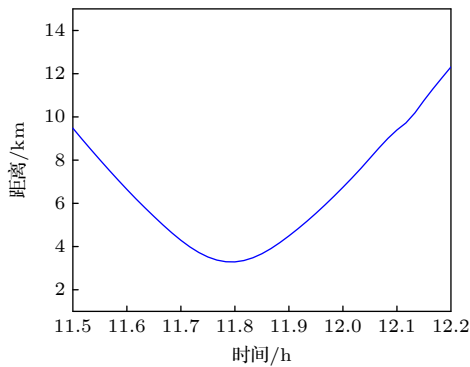


图 3 船载 AIS 记录货轮的航行轨迹

Fig. 3. Cargo vessel trajectory recorded by shipboard AIS.

避免了窄带波束形成存在的干涉条纹, 因此可排除声场干涉结构对波束输出的影响^[20]. 考虑到船舶辐射甚低频声波的传播特性, 推测该高能量路径可能来自深层海底.

基于该推测, 进一步提取宽带声场的时延信息, 以确定高能海底声弹射路径的来源. 在宽带波束形成处理的基础上, 提取出每个时刻 t 所对应路径角度上 20—100 Hz 的频点信息, 即在每个时刻 t_i , “直达-海面”路径 (DS) 和海底方向两个路径 (B1 和 B2) 对应的频谱可表示为

$$S_{DS}(f, t_i) = P(f, t_i; \varphi_{DS}(t_i)), \quad (4)$$

$$S_{B1}(f, t_i) = P(f, t_i; \varphi_{B1}(t_i)), \quad (5)$$

$$S_{B2}(f, t_i) = P(f, t_i; \varphi_{B2}(t_i)), \quad (6)$$

其中将海底两条路径的频谱相加构成海底方向的频谱信息:

$$S_B(f, t_i) = S_{B1}(f, t_i) + S_{B2}(f, t_i). \quad (7)$$

在提取出各路径的频谱信息后, 利用宽带傅里叶合成方法将其转换为时域波形. 由于处理频段为 20—100 Hz, 因此, 在进行宽带傅里叶合成前需要构建一个完整的、满足共轭对称性的频谱, 以确保逆变换后得到实数波形. 完整的频谱构建如下:

$$S_{full}(f, t) = \begin{cases} S(f, t), & 20 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}, \\ S^*(-f, t), & -100 \text{ Hz} \leq f \leq -20 \text{ Hz}, \\ 0, & \text{others,} \end{cases} \quad (8)$$

其中 S^* 表示共轭. 随后, 通过宽带傅里叶合成得到时域信号:

$$s(t') = \text{IFFT}\{S_{full}(f, t)\}. \quad (9)$$

为计算两条路径之间的时延, 将其时域波形进行归一化互相关处理. 以“直达-海面”路径信号 $s_{DS}(t')$ 为参考, 其与海底路径信号 $s_B(t')$ 的互相关函数定义为

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_B(t') s_{DS}(t' - \tau) dt', \quad (10)$$

其中 τ 为时延. 经互相关处理后, 得到如图 4 所示的时延结果. 其中粉色虚线为基于射线声学方法仿真计算的表层海底声弹射路径的理论时延, 在该时延曲线的仿真中综合考虑了试验海域的实测声速剖面及货轮与垂直阵间的水平距离.

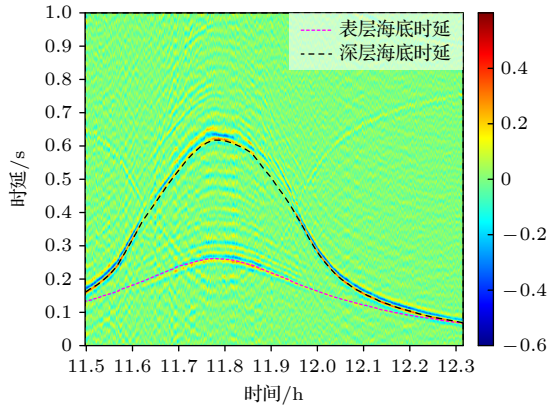


图 4 时延估计结果 (互相关)

Fig. 4. Time delay estimation results from cross-correlation analysis.

如图 4 所示, 时延估计在粉色虚线处出现信号相关峰, 说明仿真获取的表层声弹射路径的时延信息和试验观测是一致的; 另外, 还可观测到黑色虚线对应的深层海底声弹射路径的时延相关峰. 该观测结果说明, 试验海域的海底存在两个明显的反射界面, 即该海域存在表层海底界面与深层海底界

面. 结合上述数据处理结果及典型的声学海底模型, 可推断试验海域海底结构为硬质海底上覆盖有一定厚度的软沉积层.

3 等效海底模型

前述分析表明, 海底的底质结构影响了海底方向的声传播特性, 进而激发高能量的深层海底声弹射路径. 为深入研究该现象产生的机理, 这里构建等效海底模型开展相关研究.

查阅涉及南海海底介质参数的地质资料和科研文献, 获取海底的地震和钻探数据, 并以此作为构建等效声学模型的依据. 现有大量的海洋地质研究表明 [21-24], 南海海盆区域的地质构造在深度方向呈现明显的层状结构, 并且由于长期的沉积压实作用, 导致声速呈现出随深度增大而逐渐增大的趋势. 基于海洋试验地点的经纬度和水深信息, 本文选取南海海盆区域的典型海底地质结构作为建模参考 [21], 如图 5 所示, 海底沉积层在深度方向呈现

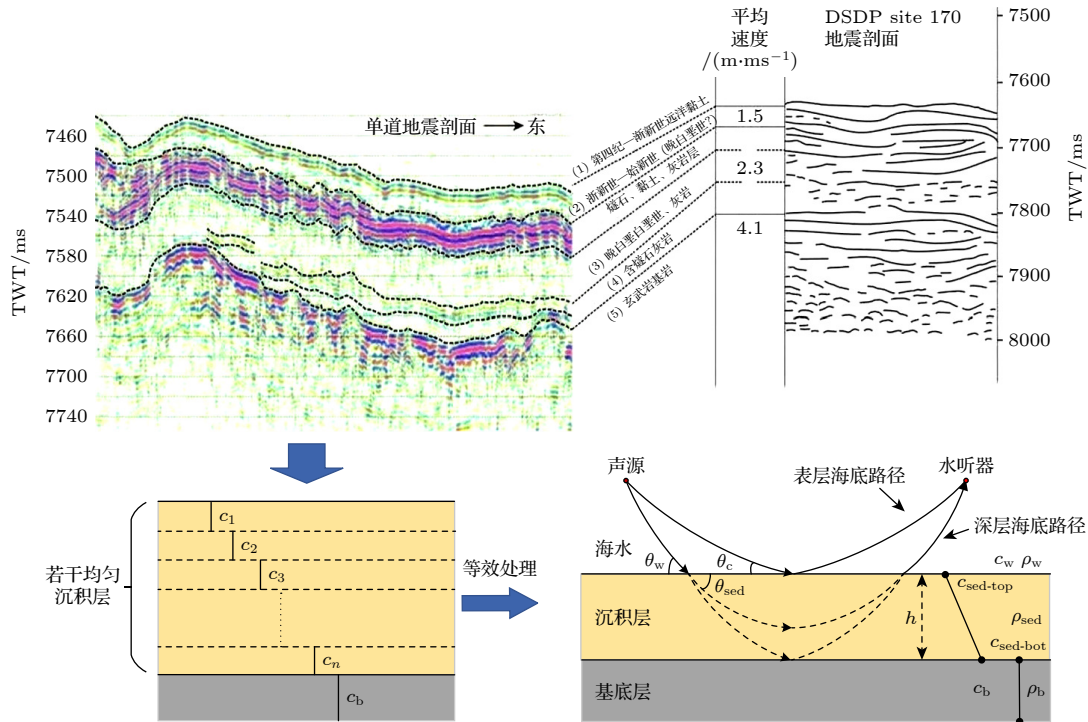


图 5 沉积层含声速梯度的声学模型示意图 (θ_w, θ_{sed} 分别为海水及沉积层中的掠射角; θ_c 为表层海底全反射临界角, h 为沉积层厚度, c_i ($i = w, sed-top, sed-bot, b$) 分别为海水, 沉积层上、下界面及基底层中的声速, ρ_i ($i = w, sed, b$) 分别为海水, 沉积层及基底层中的密度)

Fig. 5. Schematic diagram of the acoustic model with a varying velocity in the sediment layer (θ_w, θ_{sed} are the grazing angles in the seawater and the sediment layer; θ_c is the critical angle at the seabed surface; h is the thickness of the sediment layer; c_i ($i = w, sed-top, sed-bot, b$) are the sound speeds in the seawater, at the upper/lower interfaces of the sediment layer, and in the basement layer; ρ_i ($i = w, sed, b$) are the densities of the seawater, the sediment layer, and the basement layer).

典型的层状结构, 其中 $c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为各均匀沉积层中的声速, 考虑到所研究甚低频声波具有较长的波长, 且结合海底沉积的连续性和海试数据观测现象, 可构建沉积层中包含一定声速梯度的“海水-沉积层-硬质海底”等效海底模型.

另外, 为验证本文所构建等效声学模型的适配性, 这里不失一般性地引入传统水声学对海底的均匀分层处理模型作为对照. 在该对照模型中, 沉积层为声速均匀层如图 6 所示, 其中 c_{sed} 为沉积层中的声速, θ_b 为基底层中的掠射角.

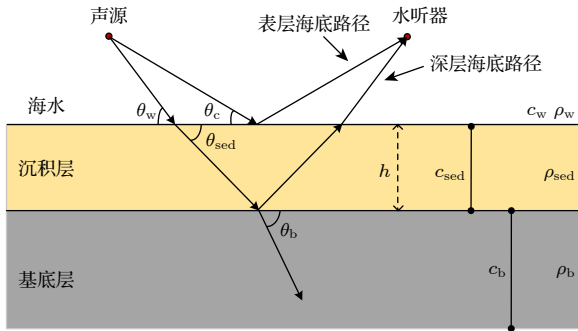


图 6 沉积层为均匀声速的声学模型示意图

Fig. 6. Schematic diagram of the acoustic model with a constant velocity in the sediment layer.

图 2 中表层海底弹射波的能量偏弱, 说明大部分声能量可穿透表层海底介质. 结合海底地质数据^[25]可知, 深海海域一般为黏土质海底, 其对应声速一般较低, 因此, 这里暂设定为 1600 m/s. 同样, 对于深层海底路径在 45.8° 出现能量突变的原因可排除声场干涉的影响, 进一步推断其原因可能为声波在深层海底界面发生全反射, 故由声传播的 Snell 定律^[26]

$$\frac{\cos \theta_w}{c_w} = \frac{\cos \theta_b}{c_b} \quad (11)$$

可推算出此时深层海底声速约为 2144 m/s.

基于上述的初步参数反演分析和海底底质的经验参数, 设定两种模型中所用的具体海底参数配置如表 1 所列.

表 1 模型所用环境参数

Table 1. Environmental parameters used in models.

	h/m	$c_{\text{sed}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho_{\text{sed}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_b/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho_b/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
声速连续模型	450	1600—2144	1.1	2144	1.7
声速均匀模型	450	1600	1.1	2144	1.7

4 激发机理分析

在构建等效模型的基础上开展数值理论分析, 以探究导致该现象激发的相关机理. 首先, 计算两种不同海底模型条件下深层海底路径的反射系数, 分析深层海底路径的能量变化过程. 然后, 采用波数积分方法, 数值仿真宽带声场, 获取垂直接收声压, 分析不同模型的 BTR 输出结果.

4.1 反射系数分析

对于沉积层为均匀介质的水平分层模型, 可以看作是 3 种介质 (海水、沉积层、基底层) 间的反射问题. 根据反射定律, 两种均匀介质界面上的反射系数 \mathcal{R} 和透射系数 \mathcal{T} 的表达式如下^[26]:

$$\mathcal{R} = \frac{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 - \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}, \quad (12)$$

$$\mathcal{T} = \frac{2\rho_2 c_2 / \sin \theta_2}{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}, \quad (13)$$

其中, $\rho_i, c_i, \theta_i (i = 1, 2)$ 分别代表上下两种介质中的密度、声速和掠射角. 可用阻抗形式将反射系数 \mathcal{R} 和透射系数 \mathcal{T} 写为

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{Z}_2 - \mathcal{Z}_1}{\mathcal{Z}_2 + \mathcal{Z}_1}, \quad \mathcal{T} = \frac{2\mathcal{Z}_2}{\mathcal{Z}_2 + \mathcal{Z}_1}, \quad (14)$$

其中, $\mathcal{Z}_i (i = 1, 2)$ 代表上下两种均匀介质中的阻抗. 因此可以得出图 6 中各个界面的反射系数和透射系数:

$$\mathcal{R}_{23} = \frac{\mathcal{Z}_b - \mathcal{Z}_{\text{sed}}}{\mathcal{Z}_b + \mathcal{Z}_{\text{sed}}}, \quad (15)$$

$$\mathcal{T}_{12} = \frac{2\mathcal{Z}_{\text{sed}}}{\mathcal{Z}_{\text{sed}} + \mathcal{Z}_w}, \quad \mathcal{T}_{21} = \frac{2\mathcal{Z}_w}{\mathcal{Z}_{\text{sed}} + \mathcal{Z}_w}, \quad (16)$$

其中 \mathcal{R}_{23} 表示沉积层-基底层界面的反射系数; \mathcal{T}_{12} 和 \mathcal{T}_{21} 分别表示海水-沉积层界面、沉积层-海水界面的透射系数; $\mathcal{Z}_i (i = w, \text{sed}, b)$ 分别为海水、沉积层及基底层中的阻抗.

由上述分析可以得出经一次海底反射的海底反射系数可表示为

$$\mathcal{R} = \mathcal{T}_{12} \mathcal{R}_{23} \mathcal{T}_{21} \exp(2i\phi_{\text{sed}}), \quad (17)$$

式中 ϕ_{sed} 为与角度有关的垂直相移, 可表示为

$$\phi_{\text{sed}} \equiv k_{\text{sed}} h \sin \theta_{\text{sed}}, \quad (18)$$

其中, k_{sed} 为沉积层中的声速.

连续声速梯度介质中, 声波传播路径不再是直

线, 而是遵循 Snell 定律形成弯曲轨迹, 当声线传播至其切线方向变为水平的深度 (即翻转点) 时, 将发生声翻转现象, WKB 近似方法^[26]为分析该条件下声波系数提供了有效工具. 根据 WKB 理论中的相位积分方法, 当声波经过翻转点时, 会产生 $\pi/2$ 的相位跳变. 考虑声波从水中入射, 在深度 z_t 处发生翻转并返回的完整过程, 总的相位变化为

$$\phi_{\text{total}} = 2 \int_0^{z_t} k_z(z) dz + \frac{\pi}{2}, \quad (19)$$

式中, $k_z(z)$ 代表随深度 z 变化的垂直波数, 对于分层近似的情况, 将连续介质离散为 N_t 层, 每层厚为 h_j , 则相位积分可近似为

$$\int_0^{z_t} k_z(z) dz \approx \sum_{j=1}^{N_t} k_j \sin \theta_j h_j, \quad (20)$$

其中, N_t 是翻转层的序号, k_j 是第 j 层的波数, θ_j 是该层中的掠射角. 因此, 经过声翻转的反射系数可表示为

$$\mathcal{R} = \exp(-i\phi_{\text{total}}) = \exp \left[-i \left(2 \sum_{j=1}^{N_t} k_j h_j \sin \theta_j + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (21)$$

将表 1 中的模型参数代入上述理论公式, 即可分别计算出两种模型下深层海底路径的反射系数, 结果如图 7 和图 8 所示.

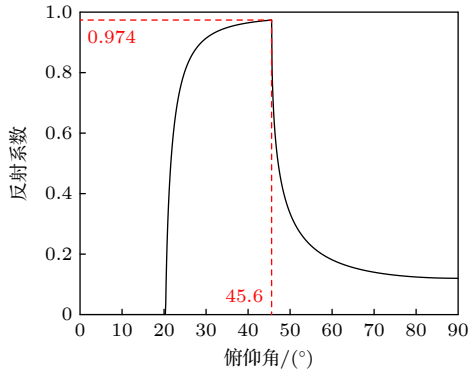


图 7 均匀沉积层模型下的深层海底路径反射系数
Fig. 7. Seabed reflection coefficient for the model with a constant velocity in the sediment layer.

从图 7 可以观察到, 随着海底方向俯仰角从 90° 减小至 0° , 深层海底反射系数呈现出先增大后减小的变化趋势, 在 45.6° 处达到极大值; 在约 20° 处, 系数变为 0. 不同于均匀沉积层模型, 从图 8 可以观察到, 反射系数在俯仰角为 45.6° 处陡增, 这与图 7 中均匀沉积层中缓变的海底反射系数有所

不同, 由于介质中的声速梯度, 声能量在很小的角度范围内发生重新分配, 导致反射系数在临界角度处出现急剧变化, 因此从反射系数这一切入点也可推断出声波在该角度发生了声翻转.

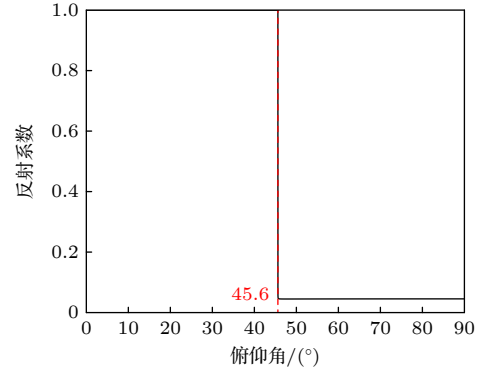


图 8 沉积层含声速梯度模型下的深层海底路径反射系数
Fig. 8. Seabed reflection coefficient for the model with a varying velocity in the sediment layer.

4.2 声场仿真分析

反射系数的分析提供了高能量海底声传播路径的理论认识. 为直观理解不同海底模型下的声传播过程, 该部分基于构建的等效模型, 计算不同海底条件下的声传播损失场, 分析其声传播过程, 提取相关声场特征量, 揭示高能量海底声弹射路径的激发机理. 考虑到本文所研究的声学模型中均存在多层海底, 为准确计算多层海底界面对水声场的影响, 故选用波数积分方法对声场进行数值仿真.

图 9 给出了两种海底模型条件下声场的传播损失结果, 仿真中设定声波频率为 50 Hz. 从图 9(a) 可以看出, 在沉积层含声速梯度的传播损失场中, 可清晰观察到在 5—10 km 的距离范围内, 入射至深层海底的声波在沉积层中发生“声翻转”的现象. 该过程使得高能量的入射声波自深层海底再次辐射至水声场中, 导致水声场中出现高能量的深层海底声弹射现象. 与之对比, 如图 9(b) 所示, 在均匀沉积层的传播损失场中, 随传播距离增大, 其入射角度逐渐增大, 出现深层海底界面的全反射情况, 但与“声翻转”相比, 全反射过程能量变化缓慢, 未观测到明显的能量集聚增强的现象.

根据试验中接收垂直阵的布放参数, 在仿真声场中提取各阵元处的计算声压, 进行宽带波束形成处理, 得到不同模型下的俯仰角时间历程结果, 如图 10 所示. 图 10(a) 展示了具有连续声速剖面沉积

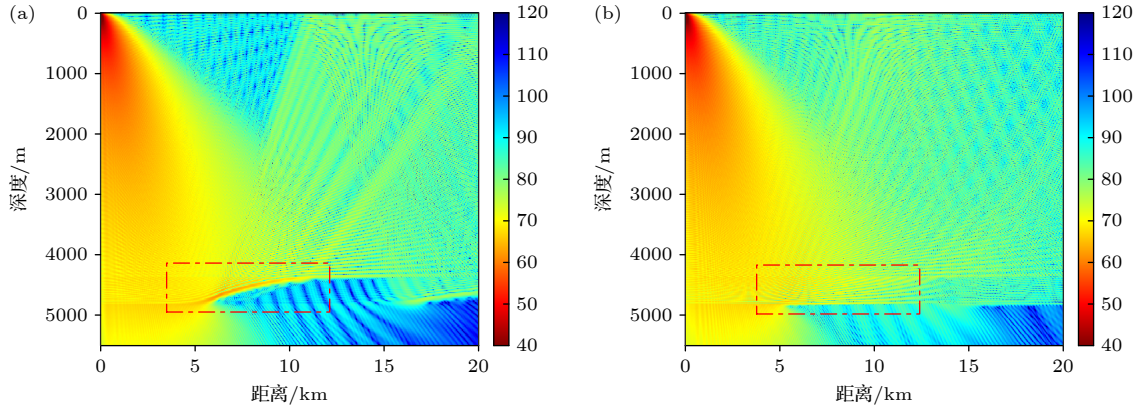


图 9 声场传播损失 (仿真) (a) 沉积层含声速梯度的仿真结果; (b) 均匀沉积层模型的仿真结果

Fig. 9. Acoustic transmission loss field by numerical simulation: (a) Simulation results for the model with a varying velocity in the sediment layer; (b) simulation results for the model with a constant velocity in the sediment layer.

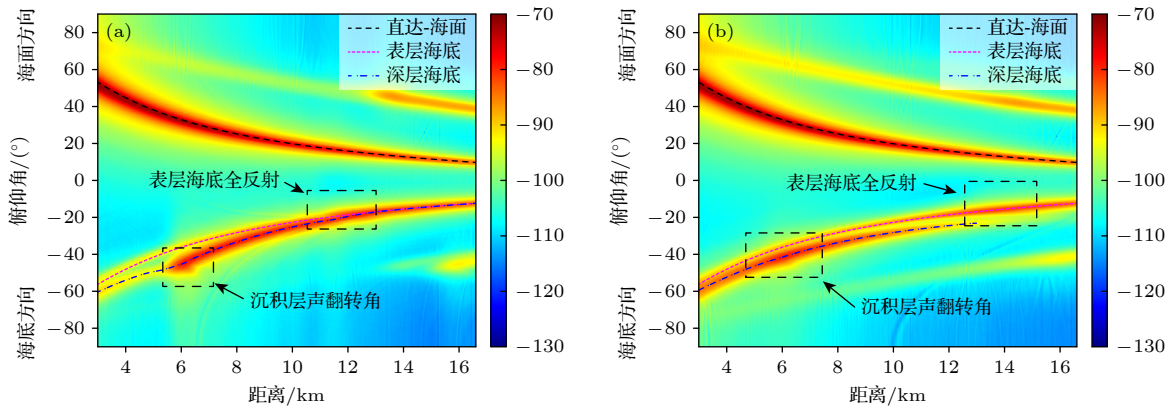


图 10 宽带波束形成的仿真结果 (a) 沉积层含声速梯度的沉积仿真结果; (b) 均匀沉积层模型仿真结果

Fig. 10. Broadband beamforming by numerical simulation: (a) Simulation results for the model with a varying velocity in the sediment layer; (b) simulation results for the model with a constant velocity in the sediment layer.

层的处理结果. 在海底方向可清晰观察到两条不同俯仰角的传播路径, 并且深层海底路径存在明显的能量突变现象, 海底方向的能量分布模式与图 2 所示的海试数据宽带波束形成处理结果高度一致. 此外, 对于表层海底路径在设定参数下存在全反射现象, 将海水声速和沉积层表层声速 $c_{\text{sed-top}} = 1600 \text{ m/s}$ 代入至临界角公式^[26]:

$$\theta_c = \arccos(c_w/c_{\text{sed-top}}), \quad (22)$$

可计算出表层海底的全反射临界角为 20.6° , 对应表层海底全反射角.

相比之下, 图 10(b) 呈现出明显的不同的声场特征. 虽然仍可辨识出海底方向存在两条不同俯仰角的路径, 但其能量分布模式与试验观测存在显著差异. 具体而言, 图中未观测到明显的能量突增现象, 且深层海底路径的能量在表层海底全反射角度附近完全消失, 这些现象与海试数据中观察到的现

象相矛盾.

为进一步说明海底模型对深层海底路径的影响, 这里将深层海底路径对应的俯仰角以及在突变角度附近的能量取出进行对比. 给出试验数据、含声速梯度沉积层、均匀沉积层这三种条件下深层海底路径在不同距离处的俯仰角以及突变角度 (45.8°) 附近的能量变化趋势, 为方便比对, 已对各路径能量进行归一化处理.

图 11 给出了水面船距离垂直阵不同距离时, 深层海底路径对应的俯仰角值. 可以看出, 在均匀沉积层条件下其俯仰角随距离增大呈现出逐渐减小的趋势, 而含声速梯度的沉积层在 6 km 左右存在起伏, 在试验数据中也存在类似特征. 另外如图 12 所示, 含声速梯度沉积层的能量变化趋势与海试数据基本一致, 随距离增大, 深层海底能量快速增强; 而均匀沉积层的能量则变化比较缓慢,

与试验处理结果存在较大差异. 上述分析表明, 本研究建立的声速梯度海底模型能够有效表征实际海试区域的海底声学特性, 模型的数值仿真结果与实测数据在多路径分布特征及异常能量突变现象等方面高度契合, 验证了含声速梯度沉积层模型的适配性. 两者之间存在的差别在于模型中所用参数是初步反演所得, 并未与试验海域完全匹配.

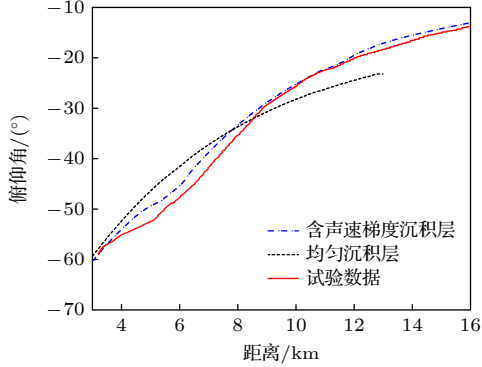


图 11 不同条件下深层海底路径俯仰角
Fig. 11. Beam angle of deep bottom path under different conditions.

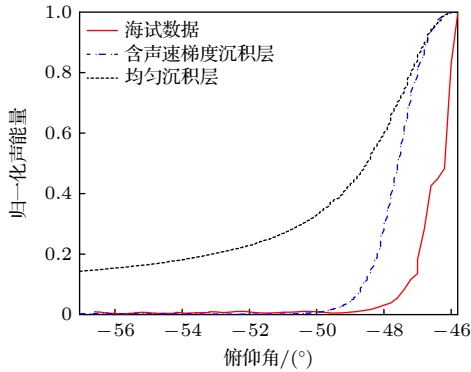


图 12 突变角度附近的能量变化(归一化)
Fig. 12. Normalized energy around the transition angle.

综合上述模型构建和数值仿真分析, 可揭示南海深海垂直阵观测到的高能量海底声弹射传播现象的激发机理: 在深海环境中由于底质沉积作用, 海底沉积层中可存在一定的声速结构, 在声传播过程中, 甚低频声波在深层海底发生“声翻转”现象, 并将其能量再次辐射回水声场, 进而在水声场中产生可观测到的高能量的深层海底声弹射现象.

5 海底参数对观测特征的影响规律

为了深入探究深层含声速梯度海底条件下, 海底参数对垂直阵观测特征的影响规律, 这里改变沉

积层中的参数, 进行宽带波束形成处理及声场传播损失仿真.

前述的研究表明, 深层海底传播路径主要受海底沉积层声速梯度影响. 因此, 这里改变沉积层的声速范围及其厚度, 设定表 2 所列的 3 组参数.

表 2 仿真中模型所用环境参数

Table 2. Environmental parameters used in simulation models.

	h/m	$c_{sed}/(m \cdot s^{-1})$	$\rho_{sed}/(g \cdot cm^{-3})$	$c_b/(m \cdot s^{-1})$	$\rho_b/(g \cdot cm^{-3})$
模型1	450	1600—1800	1.1	2144	1.7
模型2	450	1600—2500	1.1	2500	1.7
模型3	50	1600—2144	1.1	2144	1.7

图 13 分别给出了模型 1 和模型 2, 即沉积层底部界面声速为 1800 m/s 和 2500 m/s 条件下的仿真结果. 如图 13(a), (b) 所示, 模型 1 中沉积层下界面声速小于底层介质声速, 在模型 1 的宽带波束形成处理中可观察到表层海底全反射角、深层海底的全反射角以及沉积层中的翻转角, 并且在声翻转角附近也出现了明显的能量变化. 与之相应, 在传播损失场中也可清晰观测到两个现象. 模型 2 参数下的仿真结果如图 13(c), (d) 所示, 由于底层声速与沉积层下界面一致, 图中只观测到表层海底全反射角和沉积层中的翻转角, 沉积层中能量突变的角随沉积层中声速梯度的增加而明显增大, 该现象也与其传播损失场中观测到的声翻转现象对应.

如图 13 所示, 改变沉积层下界面的声速, BTR 中均可观察到高能量海底路径的现象, 但是由于翻转点的声速不同, 对应翻转角度不同. 说明沉积层中的声速结构会影响高能量海底弹射路径的激发角度.

同样, 改变沉积层厚度进一步研究参数影响, 图 14 给出了模型 3 (沉积层厚度为 50 m) 条件下的垂直阵处理结果和传播损失场. 可以看出, 减小沉积层的厚度, 深层海底路径与表层海底路径的俯仰角差减小, 与图 10(a) 相比, 该条件下已无法区分表层和深层海底两条路径, 同时, 由于沉积层厚度变薄, 声翻转现象观察不明显.

通过本节 3 个模型的仿真研究可发现, 高能量的深层海底声弹射路径的观测特征受沉积层中声速结构和厚度的影响, 其中沉积层的厚度会影响表层和深层路径的分离程度, 沉积层中声速结构影响深层海底路径的翻转角度.

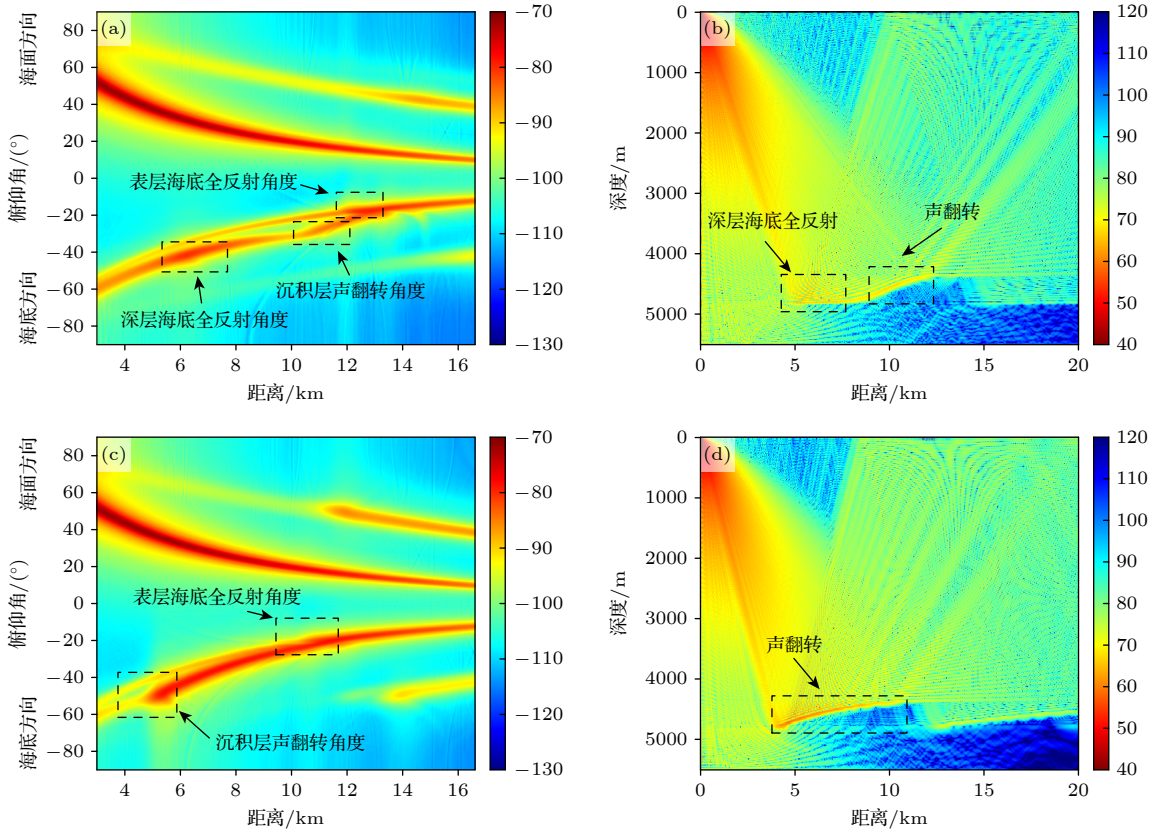


图 13 模型 1 和模型 2 的仿真结果 (a) 模型 1 的宽带波束输出 (20—100 Hz); (b) 模型 1 的声场传播损失; (c) 模型 2 的宽带波束输出 (20—100 Hz); (d) 模型 2 的声场传播损失

Fig. 13. Simulation results for model 1 and model 2: (a) Broadband beam output (20–100 Hz) for model 1; (b) acoustic transmission loss field for model 1; (c) broadband beam output (20–100 Hz) for model 2; (d) acoustic transmission loss field for model 2.

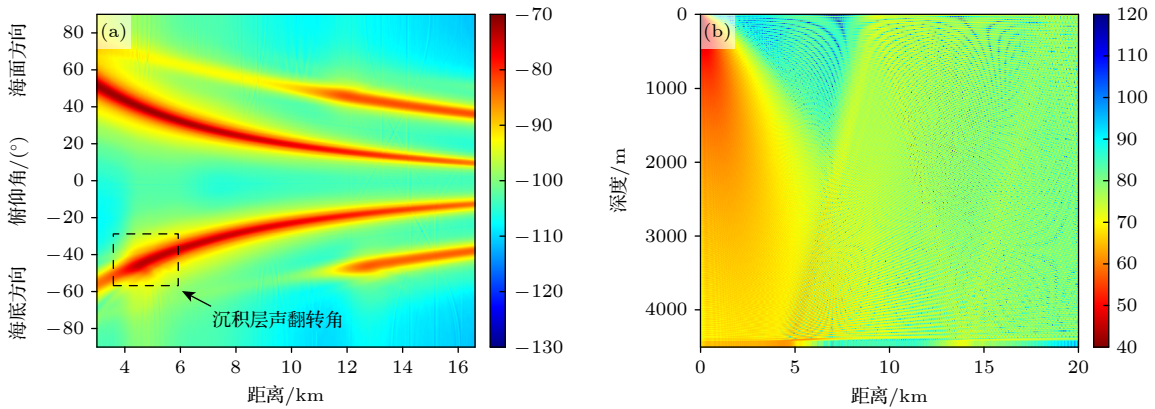


图 14 模型 3 的仿真结果 (a) 模型 3 的宽带波束输出 (20—100 Hz); (b) 模型 3 的声场传播损失

Fig. 14. Simulation results for model 3: (a) Broadband beam output (20–100 Hz) for model 3; (b) acoustic transmission loss field for model 3.

6 结 论

本文分析深海垂直阵接收水面船的甚低频辐射噪声信号,发现试验海域存在表层和深层海底弹射路径,且深层海底弹射路径相比于以往研究关注的表层海底路径具有更强的能量.基于此,本文开

展了进一步的等效海底模型构建、激发机理分析和数值声场仿真,揭示了深层海底声传播路径能量显著增强的物理机理.研究中所构建含声速梯度的等效海底模型的仿真数据与试验数据的宽带波束形成结果高度吻合,两者均可清晰观测到在约 45°俯仰角附近出现能量突变的现象.该结果表明,海底

沉积层中存在的声速结构是形成高能量海底声弹射路径的主要原因. 当甚低频声波 (20—100 Hz) 穿透海水-沉积层界面后, 其声传播在沉积层的声速梯度作用下发生“声翻转”现象, 致使甚低频声波重新辐射至水声场中, 激发高能量的深层海底弹射路径. 本文中的等效海底模型和机理研究阐明了深层海底结构对甚低频声传播的影响, 其所关注的高能量深层海底弹射路径也为深远海水下目标声探测提供新的能量获取途径和声场特征.

同时, 研究表明: 沉积层的声学参数会影响声场的观测特征. 具体而言, 沉积层的厚度会影响表层和深层路径的分离程度, 沉积层中声速结构影响深层海底路径的翻转角度. 该观测特性也为进行深层海底参数的反演提供了可依赖的声场特征, 后续将基于该现象和机理, 利用舰船辐射的甚低频声波进行深层海底参数的反演.

参考文献

- [1] Smith T A, Rigby J 2022 *Ocean Eng.* **266** 112863
- [2] Liu B T, Huang S B, Zheng B, Chen X F, Zhao J, Qi X R, Li Y, Liu S C 2023 *J. Acoust. Soc. Am.* **153** 415
- [3] Sun D J, Lu M Y, Mei J D, Wang S C, Pei Y Q 2021 *J. Acoust. Soc. Am.* **150** 952
- [4] Yang K F, Zhou T, Hui J, Xu C 2025 *Appl. Acoust.* **233** 110623
- [5] Zhang D L, Gao L S, Sun D J, Teng T T 2022 *Appl. Acoust.* **188** 108549
- [6] Zurk L M, Boyle J K, Shibley J 2013 *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* Pacific Grove, USA, November 3–6, 2013 p2130
- [7] Mccargar R, Zurk L M 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** EL320
- [8] Mccargar R K, Zurk L M 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **132** 2081
- [9] Kniffin G P, Boyle J K, Zurk L M, Siderius M 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **139** 418
- [10] Urick R 1983 *Principles of Underwater Sound* (3rd Ed.) (San Francisco: McGraw-Hill Book Company) pp146–150
- [11] Gaul R D, Knobles D P, Shooter J A, Wittenborn A F 2007 *IEEE J. Ocean. Eng.* **32** 497
- [12] Duan R, Yang K D, Li H, Yang Q L, Wu F Y, Ma Y L 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** 903
- [13] Yang K D, Xu L Y, Yang Q L, Duan R 2018 *J. Acoust. Soc. Am.* **143** ELS
- [14] Duan R, Yang K D, Ma Y L, Yang Q L, Li H 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** EL159
- [15] Zhu F W, Zheng G Y, Liu F C 2021 *J. Harbin Eng. Univ.* **42** 1510 (in Chinese) [朱方伟, 郑广赢, 刘福臣 2021 哈尔滨工程大学学报 **42** 1510]
- [16] Cao R, Yang K D, Ma Y L, Yang Q L, Xia H J, Shi Y 2019 *Acta Acust. United Acust.* **105** 248
- [17] Wu J N, Zhou S H, Zhang Y 2016 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **46** 094311 (in Chinese) [吴俊楠, 周士弘, 张岩 2016 中国科学: 物理学 力学 天文学 **46** 094311]
- [18] Xie L, Wang L J, Lin W S 2021 *Acta Acust.* **46** 171 (in Chinese) [谢亮, 王鲁军, 林旺生 2021 声学学报 **46** 171]
- [19] Chen H Y, Zhu Z R, Yang D S 2024 *IEEE J. Oceanic Eng.* **49** 1127
- [20] Krolik J, Swingler D 1990 *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* **38** 356
- [21] Li C F, Li J B, Ding W W 2015 *J. Geophys. Res. Solid Earth.* **120** 1377
- [22] Zhao M H, Qiu X L, Xia S H, Xu H L, Wang P, Wang T K, Lee C S, Xia K Y 2010 *Tectonophysics* **480** 183
- [23] Wei X D, Ruan A G, Li J B, Niu X W, Wu Z L, Ding W W 2017 *Mar. Geophys. Res.* **38** 125
- [24] Wang H F, Zhang Z, Ynag Y, Deng X G, Xu H N, Zhu K C, He G W 2021 *Geological Bull. China* **40** 305 (in Chinese) [王海峰, 张振, 杨永, 邓希光, 徐华宁, 朱克超, 何高文 2021 地质通报 **40** 305]
- [25] Hamilton E L 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **68** 1313
- [26] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2nd Ed.) (New York: Springer) pp38–188

Excitation mechanism of high-energy bottom bounce paths in deep sea*

LIANG Minshuai¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ WU Hanyu¹⁾²⁾³⁾ JIANG Houxuan¹⁾²⁾³⁾
 SHI Junjie^{1)2)3)†} SUN Dajun¹⁾²⁾³⁾

1) (National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

2) (Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University),
 Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

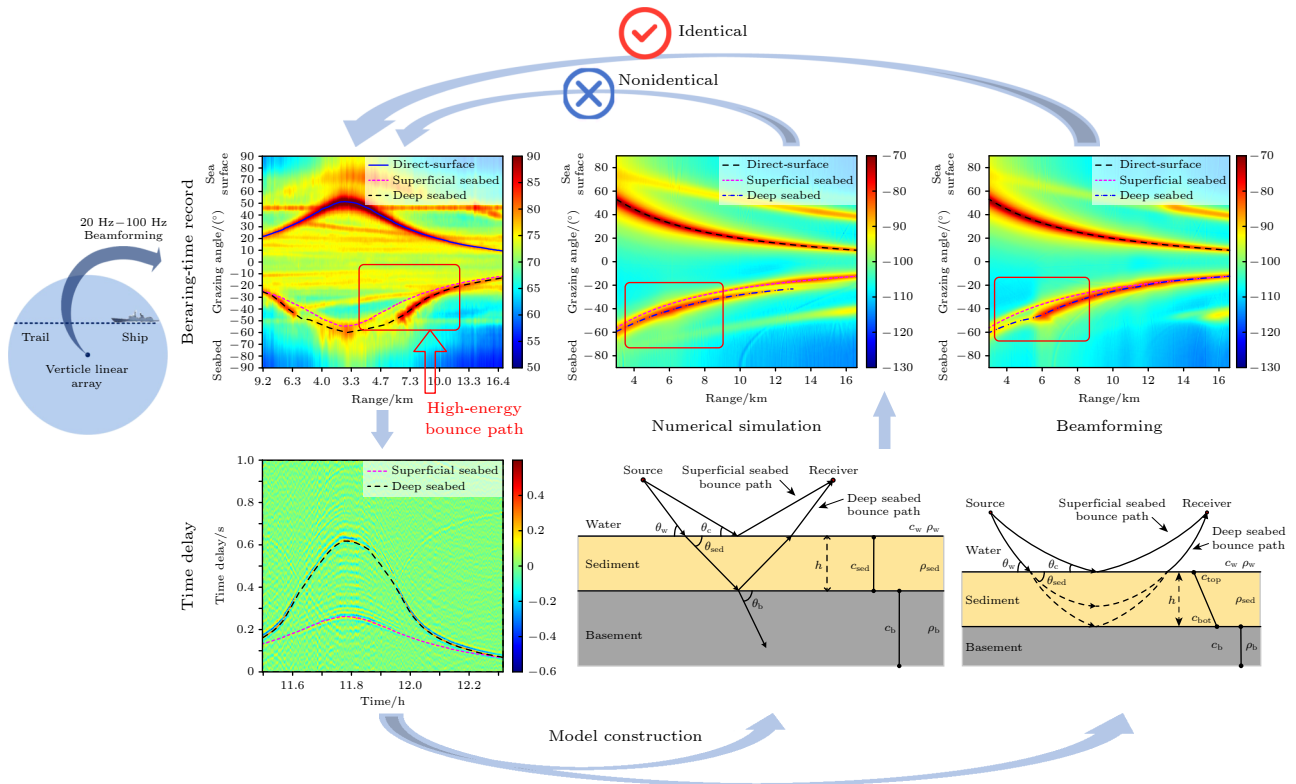
3) (College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

4) (Qingdao Innovation and Development Center of Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China)

(Received 13 June 2025; revised manuscript received 9 September 2025)

Abstract

Very-low-frequency (VLF) (≤ 100 Hz) acoustic waves exhibit special propagation characteristics in the deep sea, owing to strong penetration capability and interaction with deep geological structures. In a deep sea experiment conducted in the South China Sea, a vertical linear array including 64 elements is moored to the bottom (approximately 4360 m depth) to receive the acoustic signal. In the bearing-time record (BTR) processed by beamforming, a high-energy bottom bounce path is observed from the ship noise received by the bottom-moored vertical linear array, which shows an abrupt increase in energy near a grazing angle of 45° .



* Project supported by the Qingdao Natural Science Foundation, China (Grant No. 25-1-1-2-zyyd-jch) and the Young Scientists Cultivation Foundation of Harbin Engineering University, China (Grant No. 79000017).

† Corresponding author. E-mail: shijunjie@hrbeu.edu.cn

However, the physical mechanism causing this phenomenon is still unclear, and we investigate it further in this work. According to the data processing, we develop an environmental model of the seabed by combining continuous speed gradient, which arises from long-term geological compaction processes, in the sediment. This model is compared with a traditional stratified model under the assumption of a uniform sediment layer. The wavenumber integration method is adopted in numerical simulation to accurately calculate the pressure field and analyze the cross-media propagation. The numerical simulations show that the positive velocity gradient (increasing from 1600 m/s to 2144 m/s) causes an ‘acoustic turning’ effect, which reradiates substantial acoustic energy back into the water column and generates the observed high-energy bounce paths. This is supported by theoretical analysis in the WKB approximation, where the calculated reflection coefficient shows a sharp transition in the acoustic turning point, explaining the energy fluctuations observed in the experimental BTR. Further analysis shows that the thickness of sediment influences the angular separation between bottom bounce paths, while its sound speed structure determines the turning angle. These findings offer new insights into VLF acoustic propagation in the deep sea and also provide critical evidence for supporting a transition from simplified stratified models to a more realistic model with a continuous gradient structure. Furthermore, the discovery of high-energy bottom bounce paths provides a new way for enhancing the capabilities of underwater detection, and these observed features also provide reliable pressure field characteristics for inverting deep seabed parameters.

Keywords: very low frequency acoustics detection, continuous sound speed seabed, seabed acoustic bounce, acoustic turning

PACS: 43.30.+m, 92.10.Wa, 92.10.-c

DOI: [10.7498/aps.74.20250766](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250766)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250766](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250766)

深海高能量海底声弹射路径的激发机理研究

梁民帅 吴涵雨 江厚萱 师俊杰 孙大军

Excitation mechanism of high-energy bottom bounce paths in deep sea

LIANG Minshuai WU Hanyu JIANG Houxuan SHI Junjie SUN Dajun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 214301 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250766

CSTR: 32037.14.aps.74.20250766

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250766>

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

基于大掠射角海底反射特性的深海地声参数反演

Inversion of deep water geoacoustic parameters based on the seabed reflection characteristics of large grazing angles

物理学报. 2022, 71(11): 114302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211915>

浅海周期起伏海底环境下的声传播

Sound propagation in shallow water with periodic rough bottom

物理学报. 2021, 70(3): 034302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201233>

浅海粗糙海底声散射建模及声场特性

Acoustic scattering modeling and sound field characteristics of rough seafloor in shallow sea

物理学报. 2024, 73(3): 034301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231472>

利用海底弹射区角度-距离干涉结构特征实现声源深度估计

Source depth estimation using angle-range interference pattern in deep ocean bottom bounce area

物理学报. 2022, 71(18): 184301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220746>

火星大气频散声速剖面建模方法及其对声传播路径的影响

Methods of modelling dispersive sound speed profiles of Martian atmosphere and their effects on sound propagation paths

物理学报. 2022, 71(24): 244304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221531>

一种准零刚度声学超材料板的低频宽频带隔声行为

Broadband low-frequency sound insulation performance of quasi-zero stiffness local resonant acoustic metamaterial plate

物理学报. 2021, 70(24): 244302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211203>