

粗糙海底界面的声散射及声传播起伏研究

汪磊^{1,2,3}, 黄益旺^{1,2,3}, 赵振星^{1,2,3}, 夏峙^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对不平整海底界面声散射及其造成的声传播起伏问题, 本文使用简正波理论建立了包含粗糙海底散射的稳态海洋声场模型, 给出了振幅和相位起伏率的数学表达式, 仿真分析了 Pekeris 波导环境下的声场传播损失以及不同情况下的振幅起伏率和相位起伏率。仿真结果表明: 在使用 Lambert 定律描述海底声散射时, 由散射造成的随机声场的传播损失在水平方向上随距离增加而缓慢变大, 而在深度方向上较为稳定; 相较于相位起伏率, 振幅起伏率对信噪比的变化更为敏感; 随着海底粗糙度的不断增大, 振幅和相位的起伏率会趋近于 0。本文建立的模型以及对声传播起伏的分析可以为海洋声场的计算和相应的信号处理工作提供有力的指导。

关键词:粗糙海底; 海底声散射; 声传播起伏; 传播损失; 起伏率; 简正波理论; Lambert 定律; Pekeris 波导

DOI: 10.11990/jheu.202506006

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250623.1649.018>

中图分类号: O427.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2025)08-1522-08

Acoustic scattering and propagation fluctuation of rough seabed interface

WANG Lei^{1,2,3}, HUANG Yiwang^{1,2,3}, ZHAO Zhenxing^{1,2,3}, XIA Zhi^{1,2,3}

(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)

Abstract: To address the issue of acoustic scattering at rough seabed interfaces and the resulting fluctuations in sound propagation, this study employed normal mode theory to establish a steady-state ocean acoustic field model that incorporates rough seabed scattering. Furthermore, mathematical expressions for the amplitude and phase fluctuation rates were derived. Simulations were performed to analyze the transmission loss of the acoustic field in a Pekeris waveguide environment, as well as the amplitude and phase fluctuation rates under varying conditions. The simulation results reveal that when Lambert's law was applied to describe seabed acoustic scattering, the transmission loss of the random acoustic field caused by scattering increased slowly with distance in the horizontal direction, while remaining relatively stable in the vertical direction. It was observed that compared with the phase fluctuation rate, the amplitude fluctuation rate was more sensitive to variations in the signal-to-noise ratio. Moreover, as the roughness of the seabed increased, the amplitude and phase fluctuation rates approached zero. The model established in this study, along with the presented analysis of acoustic propagation fluctuations, can provide valuable guidance for the calculation of ocean acoustic fields and related signal processing work.

Keywords: rough seabed; seabed acoustic scattering; acoustic propagation fluctuation; transmission loss; fluctuation rate; normal wave theory; Lambert's law; Pekeris waveguide

海底是水下声场的重要边界, 其声散射特性对声场空间结构及分布规律具有至关重要的影响。海洋中存在许多随机因素会引起声波的无规散射, 如复杂多变的海洋水体环境以及作为不平

整界面的海面 and 海底^[1]。无规散射造成的声传播起伏会引起声呐接收信号的不规则变化, 如幅度和相位产生随机起伏、波形发生畸变、去相关、频移和频率模糊等, 这些现象对声呐的工作是不利的, 使先进的信号处理技术不能发挥应有的作用, 其结果是既限制了声呐的作用距离, 又增大了声呐的测量误差。

Bergmann^[2]最初使用射线方法描述波在随机

收稿日期: 2025-06-05. 网络出版日期: 2025-06-23.
基金项目: 水声技术全国重点实验室基金项目(2023-JCJQ-LB-072-02).
作者简介: 汪磊, 男, 博士研究生;
黄益旺, 男, 教授, 博士生导师.
通信作者: 黄益旺, E-mail: huangyiwang@hrbeu.edu.cn

不均匀介质中的传播。杨士莪^[3]提出一种利用逐次近似法分析声波在介质有微弱起伏的 Pekeris 波导中声信号起伏规律。季桂花等^[4]对南海北部浅海内波环境下定点声起伏实验数据分析后总结了试验海域近海底发射和近海底接收条件下内波引起接收信号强度起伏的统计特性。王臻等^[5]利用南海夏季沿岸试验数据讨论了内波引起单频信号和线性调频信号呈现不同起伏特征的原因。Eckart^[6]对粗糙海面的散射问题做过相应的建模研究。殷丽君等^[7]基于射线理论利用 Helmholtz 积分方程描述了深海条件下海面粗糙界面散射问题。

海底声散射特性与海底粗糙度、沉积物非均匀性以及声波掠射角密切相关。Mackenzie^[8]在分析测量数据后发现海底反向散射强度满足 Lambert 定律。刘孝斌等^[9]也采用实验手段研究了起伏海底界面声散射强度。Ellis 等^[10]将与界面散射方位角无关的 Lambert 散射定律与集中在镜反射方向附近的较强散射函数相结合,提出了适用于收发分置的三维散射函数。王龙昊等^[11]在此三维模型基础上结合射线理论计算了深海海底散射声场。侯倩男等^[12]基于物理机理建立了浅海小掠射角的海底界面声反向散射模型。Ellis^[13]利用简正波理论建立了关联时间因素的浅海海底混响模型。汪磊等^[14]基于 Lambert 定律建立了单位点源条件下的海底稳态散射声场模型并分析了散射声场特性。Svensson 等^[15]对 Lambert 定律的能量守恒性质再度进行了探讨。Jackson 等^[16]推导了分层流体海底的小斜率散射模型。Whitchelo 等^[17]使用 Kirchhoff 近似模拟了粗糙海底的声波散射,并分析二维与三维空间中不同尺度的粗糙度对声传播的影响。在低频段(特别是 1~10 kHz),粗糙海底的一次散射强度与小型水下目标的反射强度量级相当,这是导致虚警率升高的主要原因^[18]。因此深入认识海底声散射特性、影响机理以及预测模型是进行海洋声场空间结构研究、声场准确预报和水中目标精确探测的重要环节。

本文首先使用简正波理论建立经过海底散射的稳态海洋声场模型,同时表征确定声场和随机声场;并给出振幅和相位起伏率的数学表达式。对典型 Pekeris 波导环境下的声场传播损失以及振幅和相位起伏率进行仿真分析。为浅海条件下考虑海底声散射的稳态海洋声场计算以及存在随机过程的信号处理工作提供可靠的理论依据。

1 海底散射后的海洋声场

当声波入射到海底界面时,由于界面的不平整性,入射声波在产生镜反射的同时,还会散射到其他

方向上,能量会在空间各方向上重新分配。经过海底散射后,稳态海洋声场可以表示为确定的镜面反射部分 P_c 和随机的散射部分 P_s 的叠加,如图 1 所示,图中 S 为声源, R 为接收器位置(图中只显示发生一次反射和散射的过程)。此外,在采用无指向性声源发射时,往往还需计入未经过海底反射的直达声信号,这部分声场可以与波导中的镜反射声场合并为 P_d ,用简正波表示,简正波正是水平分层波导远场条件下稳态声场的完备解。

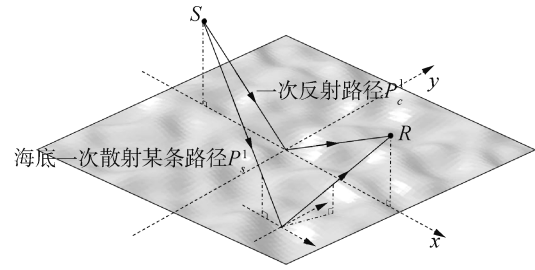


图 1 海洋声场构成

Fig. 1 The composition of the marine sound field

以柱坐标系 (r, z, φ) 为出发点,考虑时间因子 $e^{-j\omega t}$,求解与方位角 φ 无关的 Helmholtz 方程。设海底散射点位于 (r, z_b) ,接收点位于 (\tilde{r}, z_r) , r 和 \tilde{r} 分别为海底散射点到声源的水平距离和接收点到海底散射点的水平距离,声源与接收点间的水平距离为 r_0 。假设单位强度点声源的深度为 z_s ,则确定性声场 P_d 可表示为:

$$P_d(r_0, z_r) = \sqrt{2\pi i} \sum_{m=1}^M \frac{\psi_m(z_s) \psi_m(z_r)}{\sqrt{K_m r_0}} e^{iK_m r_0} \quad (1)$$

式中: M 为波导中传播的简正波阶数; ψ_m 为本征函数; $K_m = k_m + i\delta_m$ 代表包含衰减时的简正波水平波数(本征值)。Kuperman 等^[19]采取微扰方法,应用界面均方根粗糙度对本征值的虚部进行修正,使其更符合粗糙界面波导中的传播问题。

对于海底的稳态声散射问题,将整个海底界面以粗糙度的相关半径 r_c 的宽度进行分解,则海底粗糙界面一次散射形成的随机声场可表示为^[14]:

$$P_s = \sqrt{2\pi i} \sum_{\alpha=1}^{\infty} \sum_{\gamma=1}^Q \sum_{\mu=1}^M \frac{b_{\mu}(r_{\alpha\gamma}, z_b) \psi_{\mu}(z_r)}{\sqrt{K_{\mu} \tilde{r}_{\alpha\gamma}}} e^{iK_{\mu} \tilde{r}_{\alpha\gamma}} \quad (2)$$

式中: α 表示整个海底界面所划分的圆环个数; γ 表示每个圆环上所划分的单元个数,当散射单元的尺度相比较于传播距离小得多时,便可以忽略同一单元内的声传播效应,认为声波在此单元不同位置的传播方式和能量都是相同的,进而近似使用单元中心代替整个散射单元; μ 表示随机声场的第 μ 阶简正波; ψ_{μ} 和 K_{μ} 分别为本征函数与本征值; $b_{\mu}(r_{\alpha\gamma}, z_b)$ 是第 α 圆环上第 γ 单元处散射声场中第 μ 阶简正波的激发系数,表示为:

$$b_\mu(r_{\alpha\gamma}, z_b) = r_c \psi_\mu(z_b) \sqrt{\sin \theta_\mu} \sum_{m=1}^M \chi_m(r_{\alpha\gamma}) \times e^{i\phi_m(r_{\alpha\gamma})} \sqrt{\sin \theta_m} P_m^i(r_\alpha, z_b) \quad (3)$$

式中: $\chi_m(r_{\alpha\gamma})$ 和 $\phi_m(r_{\alpha\gamma})$ 描述了每阶入射简正波转换为二次声源时由粗糙界面所附加的随机振幅和随机相位, 假设它们之间是统计独立的, 且相位 ϕ_m 在 $[0, 2\pi]$ 均匀分布, χ_m 服从参数为 σ 的瑞利分布; θ_m 和 θ_μ 分别为入射声场的第 m 阶简正波和散射声场的第 μ 阶简正波对应的掠射角; $P_m^i(r_\alpha, z_b)$ 为海底处的第 m 阶入射简正波声压, 其与式(1)具有相同形式。

浅海条件下, 海底散射强度通常远高于海面散射强度以及体积散射强度^[20]。此外, 波导中的远距离传播会存在海底多次散射现象, 然而当海底粗糙度较小时, 随机声场比镜反射声场弱, 海底多次散射的随机声场则更弱, 所以在建模过程只考虑传播过程中起主要影响的一次散射。

对确定声场以及随机声场进行表征后, 则海洋声场声压表达式为:

$$P = P_d + P_s \quad (4)$$

海底的随机散射将使海洋声场的确定分量发生衰减, 进而改变海洋声场分布规律, 同时引起声信号幅度与相位的起伏。

2 声传播起伏

将式(4)中的各声压表示为振幅与相位相乘的形式:

$$P = Ae^{j\varphi} = A_d e^{j\varphi_d} + A_s e^{j\varphi_s} \quad (5)$$

式中: A, A_d, A_s 和 $\varphi, \varphi_d, \varphi_s$ 分别为相应信号的振幅和相位。由文献[14]所采用的蒙特卡罗方法验证结果可知, 当随机振幅和随机相位分别满足瑞利分布和均匀分布时, 散射声场声压的振幅和相位同样如此。那么假设散射声压振幅服从参数为 b 的瑞利分布, 其均方值表达式为:

$$\overline{|P_s|^2} = 8\pi^2 r_c^2 \sigma^2 \sum_{\alpha=1}^{\infty} \sum_{\gamma=1}^Q \sum_{\mu=1}^M \sum_{\nu=1}^M \sum_{m=1}^M \sqrt{\sin \theta_\mu} \sqrt{\sin \theta_\nu} \sin \theta_m \times \psi_\mu(z_b) \psi_\nu^*(z_b) \psi_\mu(z_r) \psi_\nu^*(z_r) |\psi_m(z_s)|^2 |\psi_m(z_b)|^2 \times \frac{|K_m \sqrt{K_\mu} (\sqrt{K_\nu})^* r_\alpha \dot{r}_{\alpha\gamma}}{e^{i(k_\mu \dot{r}_{\alpha\gamma} - k_\nu \dot{r}_{\alpha\gamma}) - (2\delta_m r_\alpha + \delta_\mu \dot{r}_{\alpha\gamma} + \delta_\nu \dot{r}_{\alpha\gamma})}} = 2b^2 \quad (6)$$

式中: 上角标 * 表示共轭; ν 表示的是将式(2)取共轭后的第 ν 阶简正波。根据式(6)不仅可以计算随机声场的传播损失, 还可以用来分析海洋声场声压振幅和相位的起伏率。

起伏率是指随机函数的均方起伏值。振幅起伏率等于相对振幅的均方值, 即 $\overline{B^2} = \overline{(\Delta A/A_d)^2}$, 其中

$A = A_d + \Delta A$ 。将式(5)、式(6)代入, 由于 P_s 统计平均为 0, 则有:

$$\overline{B^2} = \frac{\overline{(|P_d + P_s| - |P_d|)^2}}{\overline{|P_d|^2}} = \frac{\overline{|P_d + P_s|^2} + |P_d|^2 - 2|P_d| \langle |P_d + P_s| \rangle}{|P_d|^2} = \frac{2A_d^2 + 2b^2 - 2A_d \sqrt{A_d^2 + 2b^2}}{A_d^2} \quad (7)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均, 令参数 $K = A_d^2/2b^2$, 也可广义地称其为信噪比, 则式(7)转化为:

$$\overline{B^2} = 2 + 1/K - 2\sqrt{1 + 1/K} \quad (8)$$

这是一个单调递减函数。可以预见, 当 $K \gg 1$ 时即高信噪比条件下, 振幅起伏率为 0。

同振幅起伏一样, 相位起伏率等于相位起伏的均方值, 即 $\overline{(\Delta\varphi)^2} = \overline{(\varphi - \varphi_d)^2}$ 。为了简化分析, 旋转坐标系, 使确定信号与实轴重合 (即令 $\varphi_d = 0$), 此时:

$$P = A_d + A_s e^{j\varphi_s} \quad (9)$$

其直角坐标表示为:

$$P = (A_d + A_s \cos \varphi_s) + j(A_s \sin \varphi_s) \quad (10)$$

实部为 $X = A_d + A_s \cos \varphi_s$, 虚部为 $Y = A_s \sin \varphi_s$ 。则合成信号的相位为:

$$\varphi' = \arctan(Y/X) \quad (11)$$

由于旋转了坐标系, 相位差 $\Delta\varphi$ (即减去确定信号的相位 φ_d 后) 就是 φ' 本身。低信噪比 $K \ll 1$ 时, 相位分布趋近于随机量的相位分布即均匀分布, 则此时 $\overline{(\Delta\varphi)^2} \approx \pi^2/3$ 。而在高信噪比 $K \gg 1$ 条件下, φ' 趋近于 0, 此时可以近似为:

$$\varphi' \approx A_s \sin \varphi_s / A_d \quad (12)$$

由于 $A_s \sin \varphi_s$ 是零均值高斯变量 (方差为 b^2), 则有:

$$\varphi' \sim \mathcal{N}(0, b^2/A_d^2) \quad (13)$$

则 $\overline{(\Delta\varphi)^2} \approx 1/2K$ 。

对式(11)继续分析, 以得到一般情况下的相位起伏率。令 $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$, 数理统计学指出, 当主信号与服从瑞利分布的多径信号分量相加时, 和信号的包络即 Z 服从莱斯分布。由于 $A_s \cos \varphi_s$ 和 $A_s \sin \varphi_s$ 均为高斯变量 (均值为 0, 方差为 b^2), 因此:

$$\begin{cases} X = A_d + A_s \cos \varphi_s \sim \mathcal{N}(A_d, b^2) \\ Y = A_s \sin \varphi_s \sim \mathcal{N}(0, b^2) \end{cases} \quad (14)$$

它们的联合概率密度函数为:

$$f_{X,Y}(x,y) = \frac{1}{2\pi b^2} \exp\left(-\frac{(x - A_d)^2 + y^2}{2b^2}\right) \quad (15)$$

对式(15)进行极坐标转换、积分计算以及一系

列推导过程可得最终相位差的概率密度函数为^[21]:

$$f_{\varphi'}(\varphi') = \frac{1}{2\pi} e^{-K} \left[1 + \sqrt{\pi K} \cos \varphi' e^{K \cos^2 \varphi'} \times \right. \\ \left. (1 + \operatorname{erf}(\sqrt{K} \cos \varphi')) \right] \quad (16)$$

式中 $\operatorname{erf}(\cdot)$ 是误差函数,再对上式进行均方值积分即可得任意 K 时的相位起伏率,其表达式为:

$$\overline{(\Delta\varphi)^2} = \frac{e^{-K}}{2\pi} \left[\frac{2\pi^3}{3} + 2\sqrt{\pi K} \int_0^\pi \varphi'^2 \cos \varphi' \times \right. \\ \left. e^{K \cos^2 \varphi'} (1 + \operatorname{erf}(\sqrt{K} \cos \varphi')) d\varphi' \right] \quad (17)$$

实用时可根据 K 的大小选择近似公式或数值积分。

综上,振幅和相位的起伏率均由信噪比所决定,强确定信号下二者的起伏率都趋近于 0。振幅的起伏率在区间 $(0, \infty)$, 而相位的起伏率在区间 $(0, \pi^2/3)$ 内。

3 仿真分析

对于海底界面散射引起的声传播起伏问题,对某一浅海域进行仿真,将其看成海面绝对软,海底为均匀流体半空间的 Pekeris 波导,设海底界面的均方根粗糙度为 0.5 m,相关半径为 20 m。海洋环境参考某次南海试验结果^[22],平均海水深度为 103 m,密度 $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$,声速由声速剖面给出,底部为砂质海底,密度 $\rho_b = 1.8 \text{ g/cm}^3$,声速 $c_b = 1\ 617 \text{ m/s}$ 。声源位于海面下 15 m 处,发射频率为 190 Hz 的连续信号。对于低频段,海水介质衰减系数 α_w 和砂质海底纵波衰减系数 α_b 可由经验公式^[14] 分别得约为 4.167×10^{-6} 和 0.007 dB/m ,将上述参数整理在图 2 中。早期 Mackenzie^[8] 通过海底散射强度实验测得 Lambert 系数 $10 \lg \varsigma = -28 \text{ dB}$,则取随机振幅 χ 的瑞利分布参数 $\sigma = \sqrt{\varsigma}$ 。

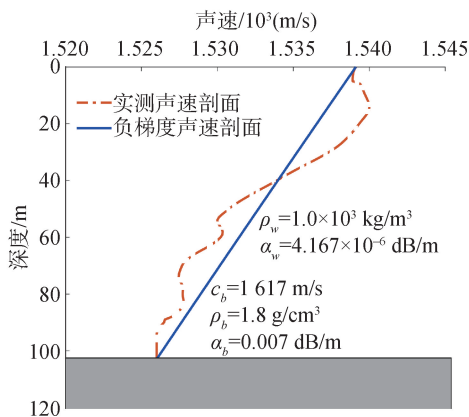
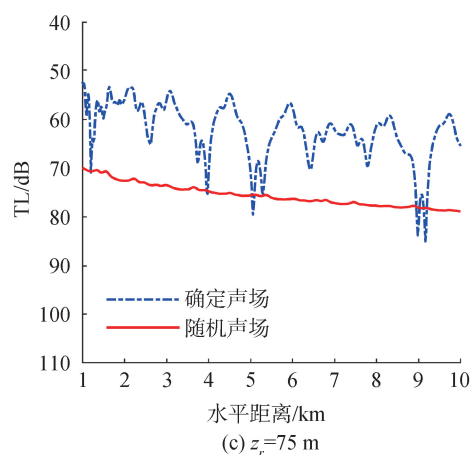
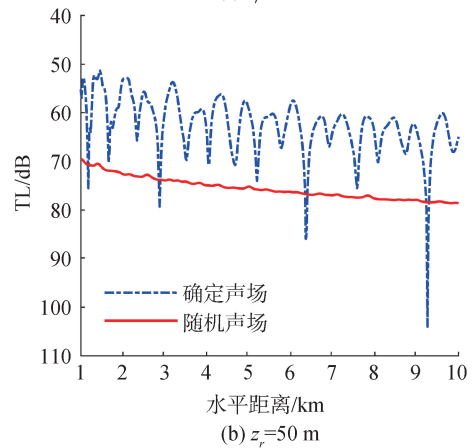
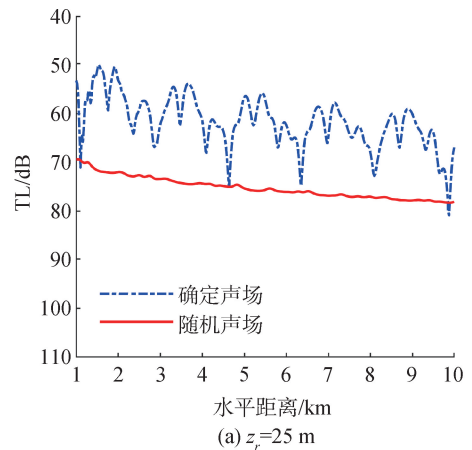


图 2 海洋环境示意

Fig. 2 Schematic diagram of the marine environment

海底散射与入射角度息息相关。为了考虑声速分布的水文条件对入射简正波的影响,更好地分析水平和深度方向随机声场传播损失的问题,对图 2 中的实测声速剖面 and 负梯度声速剖面 2 种不同情况

进行仿真。由式(1)和式(6)仿真了确定声场与随机声场的传播损失,如图 3、图 4 所示,其中图 3(a)~(c)为实测声速剖面下的结果,图 3(d)~(f)为负梯度声速剖面下的结果。图中: z_r 为接收深度,TL 代表传播损失, d 为水平距离。可以发现对于不同的声速剖面,由于不同阶简正波之间的干涉导致确定声场在水平方向和深度方向上传播损失都有着较大的起伏变化。而随机声场在 2 种声速剖面条件下的结果较为一致:在水平方向上传播损失缓慢增大,这是由于距离增大所带来的扩展损失造成的;在深度方向比较稳定是因为对于同一水平距离下的海底稳态声散射,需考虑的散射区域不发生变化,那么此时深度方向上的传播损失主要受简正波本征函数的影响。



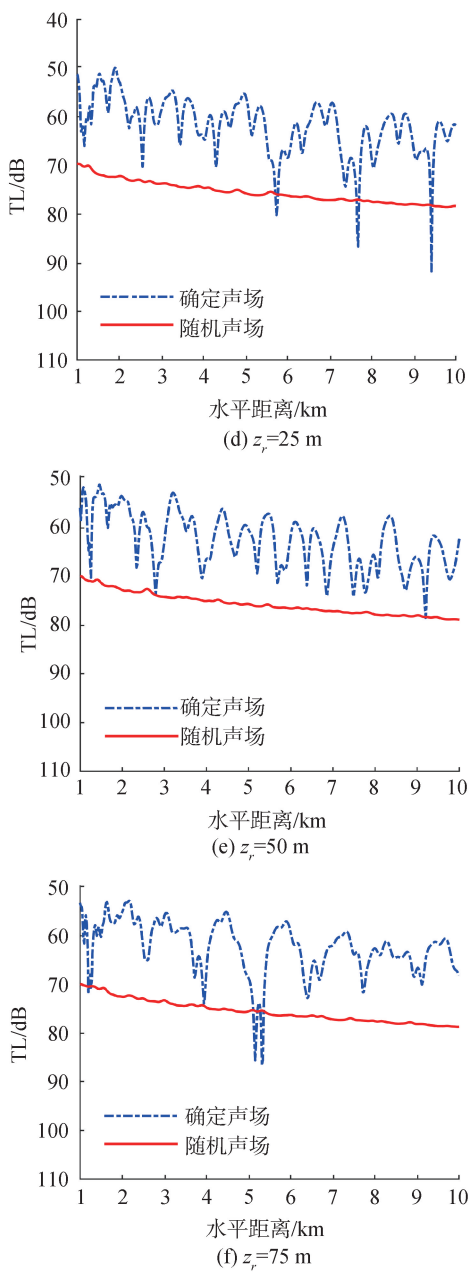


图 3 声场水平方向传播损失

Fig. 3 Horizontal propagation loss of the sound field

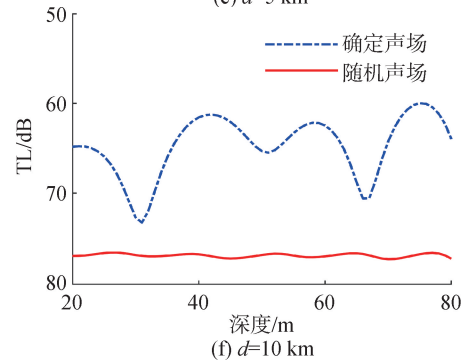
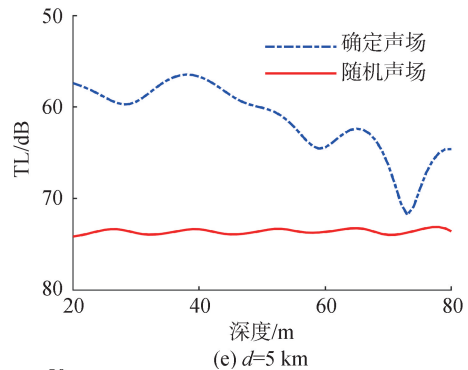
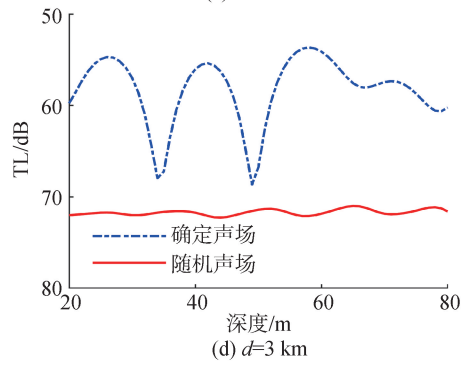
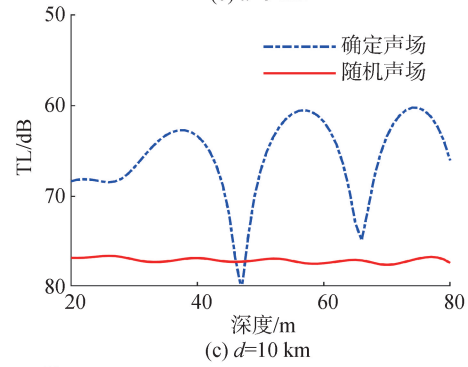
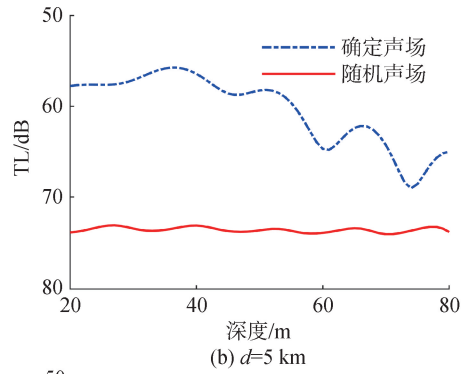
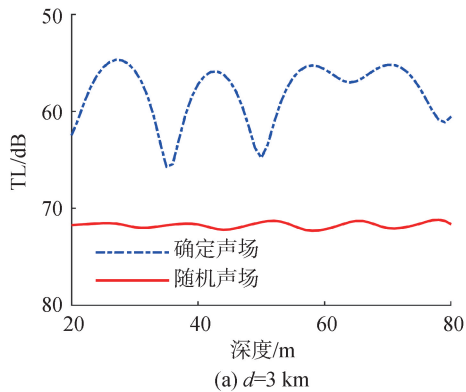


图 4 声场深度方向传播损失

Fig. 4 Propagation loss in the depth direction of the sound field

图 5、图 6 所示的是采用实测声速剖面时的振幅和相位的起伏率。对于振幅和相位的起伏率,结合传播损失的对比结果来看,二者的起伏趋势一致,且起伏较大的情况都发生在确定声场强度较小时;另外振幅起伏率的变化剧烈程度要比相位起伏率强,即对信噪比的变化更为敏感,这一结论也可以通过二者表达式的性质以及相应的取值范围进行分析得来。图 5(a)中在接收深度为 50 m,水平距离为 9.26 km 处,确定声场相对随机声场而言极弱,此时振幅起伏率的值极大。

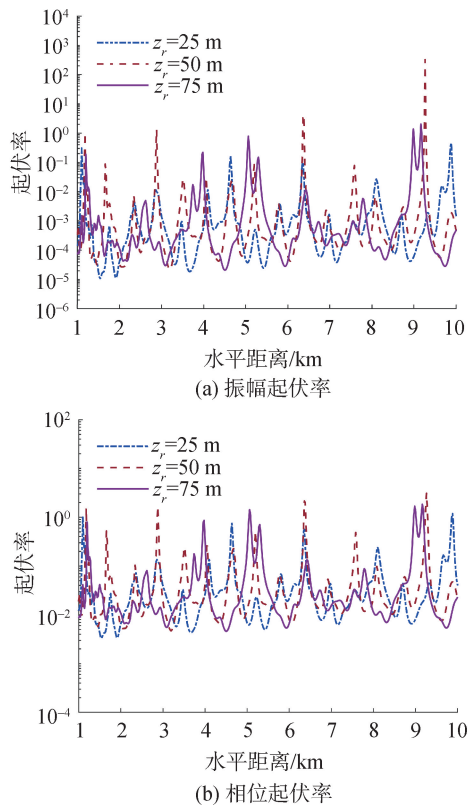


图 5 不同水平距离振幅和相位起伏率
Fig. 5 Amplitude and phase fluctuation rate at different horizontal distances

图 7 是考虑接收深度为 25 m,水平距离为 5 km 时,粗糙海底界面的相关半径不同时的起伏率变化。

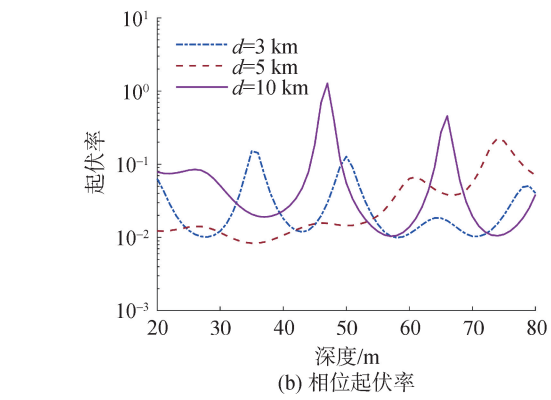
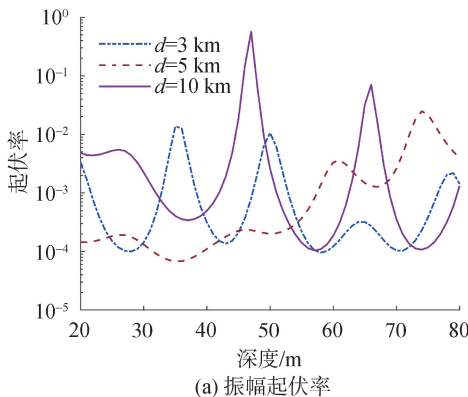


图 6 不同深度振幅和相位起伏率
Fig. 6 Amplitude and phase fluctuation rate at different depths

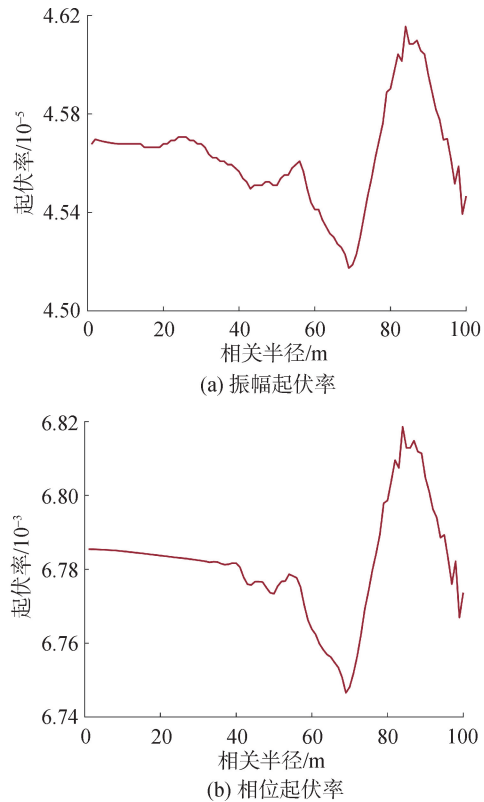


图 7 不同相关半径振幅和相位起伏率
Fig. 7 Amplitude and phase fluctuation rate of different correlation radii

不难看出,在相关半径较小时起伏率的值较为稳定,说明计算出的随机声场强度较为一致。而在相关半径较大时起伏率的值发生变化,由此可知,在计算海底一次散射造成的随机声场时,对于相关半径需要取合适的值,既要符合海底粗糙度的实际情况,同时保证合理的计算精度与计算速度,避免在计算过程中由人为因素引入不必要的起伏。

图 8(a)、图 8(b)是接收深度为 50 m,水平距离分别为 2.86、5、6.36 km 处的声场传播损失以及信噪比随海底均方根粗糙度的变化规律。选取

这 3 个距离分析是因为从图 3(b) 可获知这 3 个距离分别对应信噪比相当、信噪比大于 1 以及信噪比小于 1 的 3 种情况。当均方根粗糙度不断增大时, 确定声场和随机声场的强度总体趋势都在不断减弱, 这与文献[14]的结论是一致的; 而且确定声场最终都会远大于随机声场, 这与实际物理机理相符, 在高粗糙度的情况下, 确定声场的简正波叠加效果变弱, 干涉引起的起伏剧烈程度会变小, 这时海洋声场的组成部分中镜面反射声会占据主导, 这也使得振幅和相位的起伏率接近于 0, 如图 8(c)、(d) 所示。海底界面的粗糙度不变时, 相关半径越大界面起伏越平缓, 对于这种界面的声散射可考虑 Kirchhoff 近似模型, 以提高声场模型的适用性^[23]。

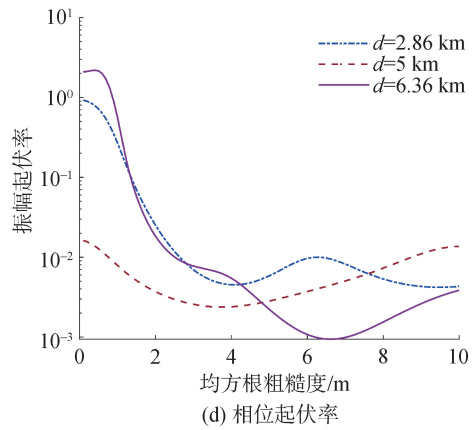
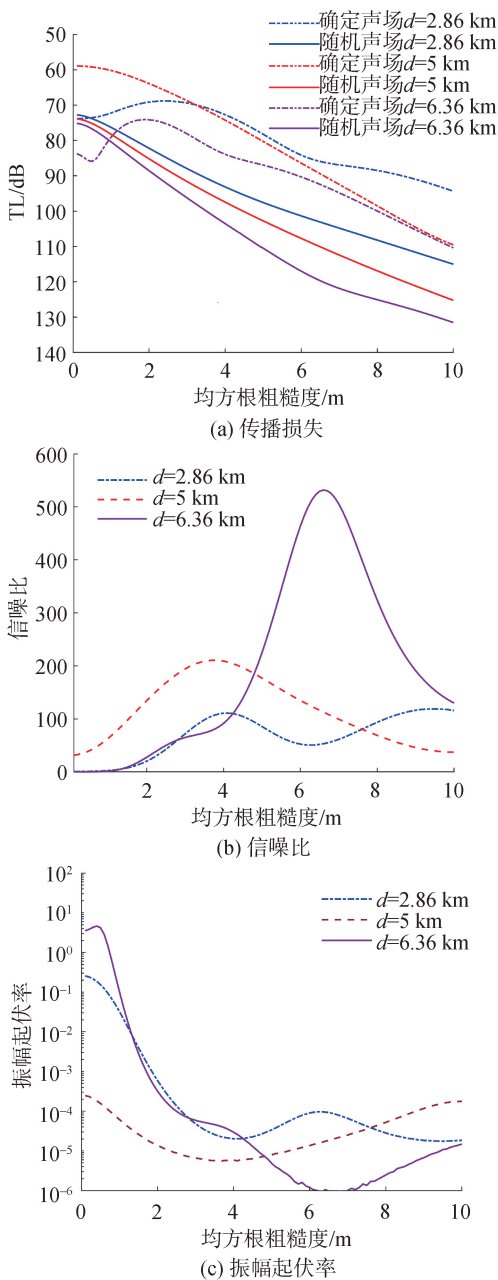


图 8 不同海底粗糙度的声场变化以及振幅和相位起伏率
Fig. 8 Acoustic field variation and amplitude and phase fluctuation rate at different seabed roughness

4 结论

1) 为减小计算误差, 在计算海底稳态声散射时对海底界面相关半径要选取合适的值; 海底散射造成的随机声场的传播损失在水平方向上随距离缓慢变大, 而在深度方向上较为稳定。

2) 随机声场与确定声场相比是小的, 但其时空特性具有显著应用价值, 研究其空间相关特性将有助于改善声呐设备的性能, 提高其抗干扰能力。

3) 振幅和相位的起伏率在高信噪比时均趋于 0, 且振幅起伏率对信噪比变化更为敏感。在非高信噪比的情况下可以根据振幅起伏率强弱判断干扰信号的相对强度。振幅和相位的起伏率会随着海底界面均方根粗糙度的增加而趋近于 0。

本文使用的 Lambert 定律虽是描述散射的经典方法, 但由于缺乏对散射过程中物理机理的描述, 其适合描述小掠射角的散射, 适用范围有限。广泛使用的微扰近似模型在远离镜面反射方向上有着更高的精度, Kirchhoff 近似模型对于镜面反射方向附近的散射更为有效, 而小斜率近似模型则在很大角度范围内都很精确。在未来工作中, 可以探索使用不同的粗糙界面散射模型以更好地匹配实际的海洋声场。

参考文献:

[1] 刘伯胜, 黄益旺, 陈文剑, 等. 水声学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 325-346.
LIU Bosheng, HUANG Yiwang, CHEN Wenjian, et al. Principles of underwater acoustics[M]. Beijing: Science press, 2019: 325-346.

[2] BERGMANN P G. Propagation of radiation in a medium with random inhomogeneities[J]. Physical review, 1946, 70(7/8): 486-492.

[3] 杨士莪. 声在随机介质波导中的传播[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(5): 547-549, 628.

- YANG Shi'e. Sound propagation in waveguide with stochastic medium[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(5): 547-549, 628.
- [4] 季桂花, 何利, 张振洲, 等. 南海北部浅海声场起伏及统计特性[J]. 声学学报, 2021, 46(6): 1132-1143.
JI Guihua, HE Li, ZHANG Zhenzhou, et al. The intensity fluctuations and statistical characteristics in the shallow water at the north of South China Sea [J]. Acta acustica, 2021, 46(6): 1132-1143.
- [5] 王臻, 胡涛, 王文博, 等. 南海夏季沿岸内波与定点声起伏特征分析[J]. 声学学报, 2024, 49(1): 67-77.
WANG Zhen, HU Tao, WANG Wenbo, et al. Characteristics of coastal internal waves and acoustic-energy fluctuations in the South China Sea in summer[J]. Acta acustica, 2024, 49(1): 67-77.
- [6] CARL E. The scattering of sound from the sea surface[J]. The journal of the acoustical society of America, 1953, 25(3): 566-570.
- [7] 殷丽君, 吴金荣, 侯倩男, 等. 基于小斜率近似的深海海面混响[J]. 物理学报, 2021, 70(17): 149-158.
YIN Lijun, WU Jinrong, HOU Qiannan, et al. Surface reverberation based on small-slope approximation in deep water[J]. Acta physica sinica, 2021, 70(17): 149-158.
- [8] MACKENZIE K V. Bottom reverberation for 530-and 1 030-cps sound in deep water [J]. The journal of the acoustical society of America, 1961, 33(11): 1498-1504.
- [9] 刘孝斌, 彭临慧. 起伏海底界面声散射强度实验研究 [C]//2008 年全国声学学术会议论文集. 上海, 2008: 104-105.
- [10] ELLIS D D, VANCE CROWE D. Bistatic reverberation calculations using a three-dimensional scattering function [J]. Acoustical society of America journal, 1991, 89(5): 2207-2214.
- [11] 王龙昊, 秦继兴, 傅德龙, 等. 深海大接收深度海底混响研究[J]. 物理学报, 2019, 68(13): 191-199.
WANG Longhao, QIN Jixing, FU Delong, et al. Bottom reverberation for large receiving depth in deep water [J]. Acta physica sinica, 2019, 68(13): 191-199.
- [12] 侯倩男, 吴金荣. 浅海小掠射角的海底界面声反向散射模型的简化[J]. 物理学报, 2019, 68(4): 238-246.
HOU Qiannan, WU Jinrong. Simplification of roughness bottom backscattering model at small grazing angle in shallow-water [J]. Acta physica sinica, 2019, 68(4): 238-246.
- [13] ELLIS D D. A shallow-water normal-mode reverberation model [J]. The journal of the acoustical society of America, 1995, 97(5): 2804-2814.
- [14] 汪磊, 黄益旺, 郭霖, 等. 浅海粗糙海底声散射建模及声场特性[J]. 物理学报, 2024, 73(3): 91-98.
WANG Lei, HUANG Yiwang, GUO Lin, et al. Acoustic scattering modeling and sound field characteristics of rough seafloor in shallow sea [J]. Acta physica sinica, 2024, 73(3): 91-98.
- [15] PETER SVENSSON U, SAVIOJA L. The Lambert diffuse reflection model revisited [J]. The journal of the acoustical society of America, 2024, 156(6): 3788-3796.
- [16] JACKSON D, OLSON D R. The small-slope approximation for layered, fluid seafloors [J]. The journal of the acoustical society of America, 2020, 147(1): 56.
- [17] WHITCHELO Y, HASLINGER S G, COLQUITT D J, et al. Scattering of acoustic waves from rough seabeds: a comparison of two- and three-dimensional models [C]// Proceedings of meetings on acoustics, 184th meeting of the acoustical society of America. Chicago, 2023: 908-919.
- [18] JACKSON D, RICHARDSON M. High-frequency seafloor acoustics [M]. New York: Springer science & business media, 2007:3-10.
- [19] KUPERMAN W A, INGENITO F. Attenuation of the coherent component of sound propagating in shallow water with rough boundaries [J]. The Journal of the acoustical society of America, 1977, 61(5): 1178-1187.
- [20] KATSNELSON B, PETNIKOV V, LYNCH J. Fundamentals of shallow water acoustics [M]. New York: Springer Science & Business Media. 2012:256-275.
- [21] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993: 136-156.
- [22] 任超, 黄益旺, 夏峙. 宽频带海洋环境噪声矢量场空间相关特性建模 [J]. 物理学报, 2022, 71(2): 024301.
REN Chao, HUANG Yiwang, XIA Zhi. Modeling of spatial correlation characteristics of broadband ocean ambient noise vector field [J]. Acta physica sinica, 2022, 71(2): 024301.
- [23] 高博. 浅海远程海底混响的建模与特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013:3-9.
GAO Bo. Modeling and characteristics of long-range bottom reverberation in shallow water [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013:3-9.

本文引用格式:

- 汪磊, 黄益旺, 赵振星, 等. 粗糙海底界面的声散射及声传播起伏研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1522-1529.
WANG Lei, HUANG Yiwang, ZHAO Zhenxing, et al. Acoustic scattering and propagation fluctuation of rough seabed interface [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1522-1529.