

极浅海环境中动平台成像声呐 界面混响建模与分析*

翟清越¹⁾ 刘雄厚^{1)†} 杨益新²⁾

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2026 年 3 月 4 日收到; 2026 年 4 月 30 日收到修改稿)

极浅海环境中小目标成像声呐受到密集多途和强界面散射的不利影响, 难以准确发现水下小目标. 为精准刻画极浅海动平台条件下小目标成像声呐的界面混响特性, 建立了包含海底、海面混响的界面混响模型. 该模型将极浅海声传播、界面散射、声呐平台运动等物理过程紧密结合, 使用射线理论计算高频声传播过程, 使用单元散射和小斜率近似界面散射计算海底、海面声散射过程, 以海深、平台航速、成像距离、声呐垂直开角为输入, 给出了极浅海密集多途条件下的混响统计特性. 数值仿真和试验数据分析结果表明, 极浅海界面混响包络的统计特性主要受水深、成像距离、垂直开角的影响; 极浅海密集多途的存在使得界面混响包络趋向于服从瑞利分布, 也会通过路径叠加增强混响信号在时间维度上的相关性, 而平台航速对混响时域统计特性影响较小; 随着成像距离的增加, 界面散射中的多途成分更加丰富, 使得界面混响包络更趋向于服从瑞利分布; 随着垂直开角的增加, 界面混响包络逐渐从 K 分布转变为瑞利分布.

关键词: 极浅海, 动平台声呐, 界面混响, 统计特性

DOI: 10.7498/aps.75.20260314

CSTR: 32037.14.aps.75.20260314

1 引言

极浅海是紧连人类生活、生产的海域, 包括近岸滩涂、港内浅滩、礁盘等. 对极浅海中小目标成像与识别是当前水声工程领域的热点和难点. 极浅海水深远小于浅海, 声波在极浅海的海底、海面间多次反射形成密集多途效应, 形成与浅海环境不同的界面混响^[1,2]. 为提升极浅海环境中小目标成像与识别性能, 对极浅海环境中小目标成像声呐的界面混响进行建模与分析是重点.

一般而言, 海洋混响模型主要考虑声传播过程和声散射过程的计算. 声传播过程的计算主要基于简正波理论和射线理论. 当声呐工作频率较低或海

深与波长比值较小时, 一般选用简正波理论. Bucker 和 Morris^[3] 率先将简正波理论引入声道及浅海信道的声呐混响计算, 建立了适用于中长距离场景的混响强度计算关系式. 张仁和与金国亮^[4] 对该理论加以拓展, 推导出浅海远程混响强度的通用表达式, 并分析了负跃层浅海中平均混响强度的衰减规律. 当声呐工作频率较高或者海深波长比较大时, 可使用射线理论进行混响建模. 王龙昊等^[5] 构建了基于射线理论的深海海底混响模型, 分析了大接收深度下的海底混响特性. 李风华等^[6] 基于射线理论提出射线简正波相干混响理论, 成功解释浅海混响强度振荡现象; 刘建军等^[7,8] 进一步将射线理论与三维海底散射模型相结合, 推导得到浅海异地混响衰减及垂直相关的一般表达式, 实现海底反射损失

* 国家自然科学基金 (批准号: U2341203, 12274346) 和国家重点研发计划 (批准号: 2016YFC1400200) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xhliu@nwpu.edu.cn

与散射系数的有效反演; 吴金荣等^[9]利用射线理论研究倾斜海底环境下的近程混响衰减特性, 分析了海水与海底因素对混响的影响, 为射线理论在浅海复杂场景的应用提供支撑.

声散射过程的计算主要基于点散射模型和单元散射模型. 点散射模型假定散射体在整个海洋中随机分布, 每个散射体对应一道散射回波信号, 混响信号由所有散射体的回波信号求和得出^[10]. 胡明和陈立纲^[11]以 Jackson 三维散射模型为依托, 融合点散射模型构建基于海底散射的收发合置海底混响模型, 并对其统计特性展开了研究. 点散射模型计算结果比单元散射模型更精确, 但当散射体数量极多时, 其计算量大幅增加, 不利于工程实现. 因此, 工程上常采用单元散射模型. 单元散射模型将混响作用区域划分为若干单元, 假设每个散射单元中包含许多均匀分布的散射体, 再结合射线理论, 将每个散射单元的散射回波信号叠加, 得到混响时域信号. 姚万军等^[12]借助 Lambert 散射定律与单元散射模型, 运用高斯波束与射线追踪求解传播损失, 建立浅海混响强度计算模型. 郭熙业等^[13-15]将点散射模型和单元散射模型相结合, 设置散射体密度阈值, 对低于阈值的散射单元采用点散射模型计算, 对高于阈值的散射单元采用单元散射模型计算, 在此基础上提出了基于窄带信号复包络的混响信号仿真方法. 房媛媛等^[16]在单元散射模型基础上, 结合海洋环境参数, 初步构建运动声呐海底混响仿真模型. 李汉治^[17]进一步结合单元散射模型与小斜率近似模型, 建立高速运动条件下的界面混响模型, 为单元散射模型在动平台场景中的应用积累了经验.

然而, 上述研究主要集中于浅海和深海环境中的混响建模, 缺少对极浅海混响的建模与分析. 尽管赵亚聪等^[18]分析了极浅海环境中水体深度对水底混响强度的影响, 但是缺少对极浅海动平台条件下的混响统计特性分析, 难以满足极浅海小目标成像需求. 本文面向极浅海环境中动平台声呐对水下小目标的成像需求, 建立了极浅海环境中动平台成像声呐的界面混响模型. 该模型利用射线理论计算极浅海高频声波在海面与海底间的密集多途传播过程; 利用单元散射和小斜率近似界面散射计算海底、海面声散射过程; 引入动平台运动参数, 量化平台运动引发的界面混响多普勒频移. 基于该模型, 重点分析了海深、平台航速、成像距离、声呐

垂直开角对多途到达结构和界面混响统计特性的影响, 为极浅海动平台条件下小目标成像声呐性能改进提供理论支撑.

2 极浅海声信道和界面散射模型

由于极浅海环境中水深很浅, 声波在传播一定距离后, 其与海底、海面散射次数远多于浅海环境, 导致多途效应更为突出. 同时, 在声波与界面散射过程中, 极浅海环境中更容易出现小掠射角入射与出射的情况.

如图 1 所示, 极浅海声信道和界面散射模型主要考虑以下几点:

1) 本文主要考虑利用动平台携带成像声呐对小目标进行探测. 为同时保证足够的分辨率和作用距离, 对应的声呐工作频率一般为 100 到 500 kHz 之间^[19-22]. 此时, 海深波长比很大, 可直接使用射线模型.

2) 极浅海水深仅为数米. 该水深条件下一般较难形成复杂且变化较大的声速剖面. 因此, 主要考虑等声速条件.

3) 假设海底平坦, 海面平整无气泡, 则声呐至海底、海面的多途传播情况主要依赖于水平距离, 界面散射情况主要由掠射角和界面粗糙度决定.

4) 小目标成像声呐为收发合置声呐, 其工作深度较浅, 位于近海面处.

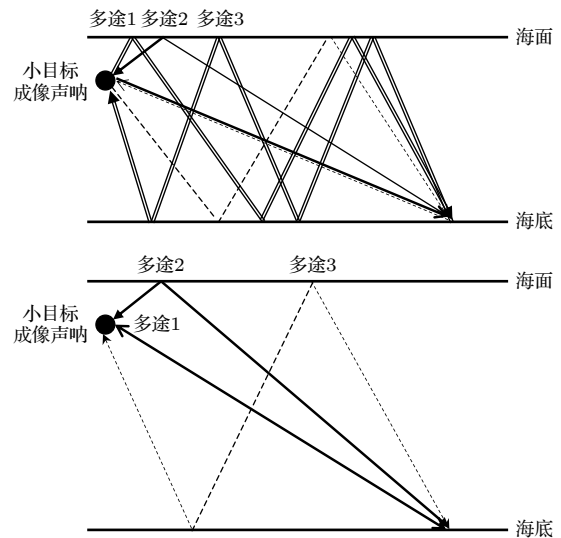


图 1 多途传播示意图 (a) 极浅海环境; (b) 浅海环境

Fig. 1. Schematic diagram of multipath propagation: (a) Ultra-shallow water environment; (b) shallow water environment.

5) 水下小目标静止, 位于平坦海底界面上.

6) 在声波发射、传播、照射小目标、返回、接收等一系列过程中, 假设声呐和目标相对静止 [23,24].

7) 小目标成像声呐工作在窄带假设下, 其多普勒频移可简化为由信号中心频率、相对运动速度等参数来计算.

2.1 极浅海高频声传播信道模型

考虑极浅海多途传播效应 [25] 与出掠射角与入掠射角相异的情形 [26,27]. 在极浅海有限水深范围内, 定义小目标成像声呐深度 z_s , 海洋深度为 z , 入射、散射路径为极浅海海底、海面多次反射形成的声线路径, 其传播距离分别为 r_{inc} 和 r_{scat} , 入射、散射掠射角分别为 θ_{inc} 和 θ_{scat} . 据此, 极浅海环境下入射传播过程的传递函数与散射后出射传播过程的传递函数 [28] 可分别表示为

$$G_{inc,m} = A_m(r_{inc}, z_s, z) e^{-j\omega\tau_m(r_{inc}, z_s, z)}, \quad (1)$$

$$G_{scat,n} = A_n(r_{scat}, z_s, z) e^{-j\omega\tau_n(r_{scat}, z_s, z)}, \quad (2)$$

其中 $\omega = 2\pi f_0$, f_0 为信号中心频率; m 为入射过程中第 m 条声线路径; n 为散射元散射后出射传播过程中的第 n 条声线路径; $A_m(r_{inc}, z_s, z)$, $A_n(r_{scat}, z_s, z)$ 为第 m, n 条声线的幅度, τ_m , τ_n 为第 m, n 条声线的传播时间.

对于某一极浅海界面散射单元处, 沿第 m 条声线路径入射并沿第 n 条声线路径出射的散射信号可写为 [27]

$$G_{m,n} = G_{inc,m} G_{scat,n} \sqrt{SS_{m,n}(\theta_{inc,m}, \theta_{scat,n}, \phi_{bi}) \Delta S}, \quad (3)$$

其中 $SS_{m,n}(\theta_{inc,m}, \theta_{scat,n}, \phi) = 10 \log_{10} [\sigma(\theta_{inc,m}, \theta_{scat,n}, \phi_{bi})]$, 为粗糙界面的散射响应函数, σ 为随机粗糙界面单位面积散射截面的非相干分量, 入射角 $\theta_{inc} \in (0^\circ, 90^\circ)$, 散射角 $\theta_{scat} \in (0^\circ, 180^\circ)$, ϕ_{bi} 为入射波与散射波在界面平面内的方位角差值; ΔS 为该散射单元的散射面积.

针对极浅海环境, 忽略海水吸收损失, 假设海面反射强度系数为 1, 则第 m 条入射声线路径和第 n 条散射声线路径所构成的第 (m, n) 条声线路径的幅度系数可以表示为

$$A_{m,n}(r_l, z_s, z) = A_0 \frac{1}{d_{m,n}(r_l, z_s, z)} \sqrt{\kappa_b \left[\frac{q_m + q_n - 1}{2} \right]} (\theta), \quad (4)$$

式中, A_0 表示发射声源幅度;

$$\kappa_b = -20 \log_{10} \left| \frac{\rho_{bot} \sin \alpha}{\sqrt{[1/v_{bot}(1+i\delta)]^2 - \cos^2 \alpha}} \right|$$

表示海底反射强度系数 [29], α 为掠射角, ρ_{bot} 为海底固体密度与海水密度之比, v_{bot} 为沉积物声速与海水声速比, δ 为沉积物虚波数与实波数之比; $\left[\frac{q_m + q_n - 1}{2} \right]$ 表示海底反弹次数, q_m 和 q_n 分别为第 m 条入射声线路径和第 n 条散射声线路径上的海底反射次数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整; $d_{m,n}$ 表示球面扩展损失, r_l 为散射单元至声呐的水平距离.

2.2 极浅海界面散射双基地模型

在极浅海成像声呐的探测中, 界面散射强度是决定混响强度的核心因素之一. 常用于计算粗糙界面声散射强度的方法有基尔霍夫近似法和微扰法, 但这两种方法都有严格的适用范围, 局限性很大 [30]. 通常会根据界面粗糙度的不同来选择不同的方法. 而小斜率近似方法 [31] 适用于高频段, 无需考虑粗糙面结构, 且对极浅海场景中常见的低掠射角与高掠射角均具有良好适用性, 兼具计算效率与精度.

针对极浅海界面散射场景, 构建三维简化模型, 如图 2 所示, 结合极浅海成像的角度需求定义关键角度参数: 入射角 $\theta_{inc} \in (0^\circ, 90^\circ)$, 散射角 $\theta_{scat} \in (0^\circ, 180^\circ)$, ϕ_{bi} 为入射波与散射波在界面平面内的方位角差值.

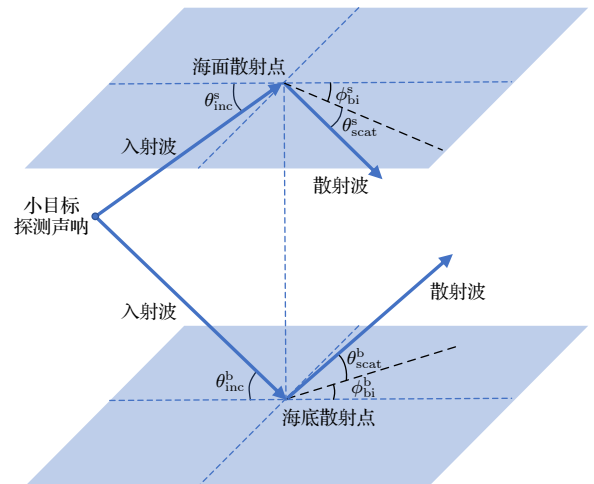


图 2 界面散射模型

Fig. 2. Interface scattering model.

定义入射波与散射波矢量差的水平分量 Q_h , 垂直分量 Q_z 为

$$|Q_h| = k_0 \sqrt{\cos^2 \theta_{\text{inc}} + \cos^2 \theta_{\text{scat}} - 2 \cos \theta_{\text{inc}} \cos \theta_{\text{scat}} \cos \phi_{\text{bi}}}, \quad (5)$$

$$Q_z = -k_0 (\sin \theta_{\text{inc}} + \sin \theta_{\text{scat}}). \quad (6)$$

从散射截面的角度来考虑, 粗糙界面散射强度可以定义为

$$SS = 10 \log_{10}(\sigma), \quad (7)$$

其中单位面积散射截面的非相干分量 σ 的小斜率近似结果表示为^[32]

$$\sigma \approx \left| \frac{\beta}{2} \right|^2 \frac{\omega_2}{(h_0 |Q_h|)^2 \gamma_2}. \quad (8)$$

(8) 式中, 当计算极浅海海面粗糙界面散射过程时, 有 $\beta = -4k_0^2 \sin \theta_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{scat}}$, 海面二维粗糙度谱指数 $\gamma_2 \in (2, 4)$ ^[30], h_0 为参考距离 1 m, ω_2 是海面二维粗糙度谱强度. 在海面各向同性假设下, 有 $\omega_2 = A_s U$, 其中 U 为风速, 典型开阔海域中, 参数 $A_s \in (0.00005, 0.0002)$ ^[33].

当计算极浅海海底粗糙界面散射过程时, ω_2 为海底二维粗糙度谱强度; γ_2 为海底二维粗糙度谱指数, 其值一般取 3.3; β 的取值与掠射角、双基地角、海底固体密度与海水密度之比 ρ_{bot} 、海底压缩波声速 c_p 、海底剪切波声速 c_s 有关^[34].

对于位于海底、海面散射单元, 沿着第 m 条声线路径至海面的入掠射角 $\theta_{\text{inc},m,s}$ 、至海底的入掠射角 $\theta_{\text{inc},m,b}$ 可分别表示为

$$\theta_{\text{inc},m,s} = \begin{cases} \arctan \left[\frac{(p_m + q_m)z + z_s}{r_l} \right], & q_m = p_m, \\ \arctan \left[\frac{(p_m + q_m + 1)z - z_s}{r_l} \right], & q_m = p_m + 1, \end{cases} \quad (9)$$

$$\theta_{\text{inc},m,b} = \begin{cases} \arctan \left[\frac{(p_m + q_m)z + z_s}{r_l} \right], & p_m = q_m, \\ \arctan \left[\frac{(p_m + q_m + 1)z - z_s}{r_l} \right], & p_m = q_m + 1, \end{cases} \quad (10)$$

其中 p_m 为第 m 条声线海面反射次数, q_m 为海底反射次数; z 为海深; z_s 为声呐距离海面深度; r_l 为散射单元至声呐的水平距离. 同理, 获得沿第 n 条声线的出掠射角. 散射面元的总体散射强度可表示为

$$SS = 10 \log_{10}[\sigma(\theta_{\text{inc},m}, \theta_{\text{scat},n}, \phi_{\text{bi}})]. \quad (11)$$

针对本文采用的收发合置声呐, 双基地角 ϕ_{bi} 取

$\pm 180^\circ$, 对应后向散射方向.

3 极浅海动平台声呐界面混响模型

3.1 平台运动的多普勒效应

针对极浅海平台运动场景, 构建三维简化模型, 如图 3 所示, z 为海深, z_s 为声呐距离海面深度. 假定小目标成像声呐基线位于 x 轴, 中心与坐标原点重合, 以速度 v 沿 y 轴方向匀速运动. α_i 为散射单元相对声呐法向的入射锥角, Ψ 为水平方位角, θ_i 为垂直俯仰角, $i = 1, 2$ 分别对应散射体处于海底、海面时的情形.

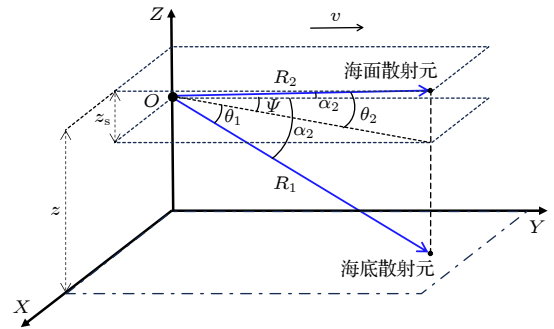


图 3 动平台声呐与散射体的几何位置关系

Fig. 3. Geometric positional relationship between moving-platform sonar and scatterer.

对应散射单元的多普勒频移 f_d 表示为

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \cos \alpha_i, \quad (12)$$

$$\cos \alpha_i = \cos \Psi \cos \theta_i, \quad (13)$$

对于海底散射单元的俯仰角 θ_b , $\cos \theta_b = \sqrt{R_1^2 - (z - z_s)^2} / R_1$, 得到:

$$f_{d,b} = \frac{2vf_0}{c} \frac{\sqrt{R_1^2 - (z - z_s)^2}}{R_1} \cos \psi. \quad (14)$$

对于海面散射单元的俯仰角 θ_s , $\cos \theta_s = \frac{\sqrt{R_2^2 - z_s^2}}{R_2}$, 得到:

$$f_{d,s} = \frac{2vf_0}{c} \frac{\sqrt{R_2^2 - z_s^2}}{R_2} \cos \psi. \quad (15)$$

界面上的散射体与声源运动方向所成的水平方位角 Ψ 分布于 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 区间. 通过分析观察 (14) 式、(15) 式中多普勒频移与方位角及距离的关系, 可知界面散射回波的多普勒频移范围为 $\left[0, \frac{2vf_0}{c} \cos \theta_i\right]$. 设定平台运动速度从 0 到 20 节,

得到多普勒频移大小随方位角和平台运动速度的变化情况如图4所示. 从图4的极浅海混响多普勒频移分布可知, 平台移动方向正对的散射元贡献的多普勒频移最大, 该频移成分对回波干扰更突出, 且向两侧递减.

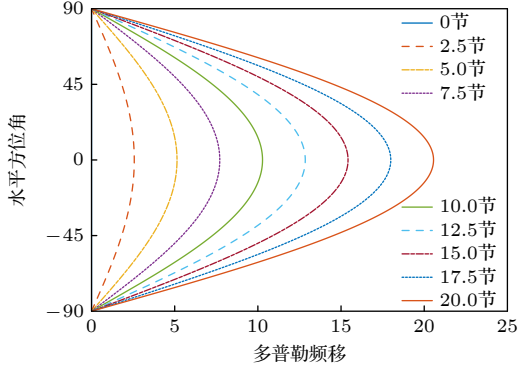


图4 混响多普勒频移分布图

Fig. 4. Reverberation Doppler shift distribution diagram.

3.2 极浅海界面混响模型

对于混响信号, 可以表述为从声源激发的声信号传播到达界面散射体后经过散射后传播回接收器的过程^[35]. 在构建混响信号模型时, 为提升建模效率, 仅考虑远场条件, 即假设散射体与声源、接收器之间的距离远大于声信号的波长, 将声波在波导中的传播近似为球面波传播.

当散射单元足够小时, 认为单元里各散射点的多途传播情况相同. 因此, 用单元上某个散射点的多途传播情况近似代替散射单元的计算^[4], 通过每个散射单元上的计算结果乘以散射面积得到对应混响信号. 当海深为 z 时, 声呐接收到的由水平位置为 r_l 处的散射单元产生的散射信号可以表示为

$$R(t) = \sum_{m=1}^{M(r_l, z, \theta_o)} \sum_{n=1}^{N(r_l, z, \theta_o)} I_0 G_m^{\text{inc}}(r_l, z) G_n^{\text{scat}}(r_l, z) \times \sqrt{10 \lg \sigma \Delta S} s(t - \tau_{im}(r_l, z) - \tau_{sn}(r_l, z)) \times \exp(-j2\pi(f_0 + f_{dl})t), \quad (16)$$

其中 I_0 表示发射声源强度; θ_o 表示发射源垂直向开角; $M(r_l, z, \theta_o)$ 和 $N(r_l, z, \theta_o)$ 表示入射和出射声线数, 其值依赖于散射元位置、海深和声源垂直向开角; $G_m^{\text{inc}}(r_l, z)$ 和 $G_n^{\text{scat}}(r_l, z)$ 由(1)式和(2)式得出; σ 由(8)式得; τ_{im} 和 τ_{sn} 第 m 个入射声线和第 n 个出射声线的时延; f_0 表示发射信号的中心频率; f_{dl} 表示该散射单元对应的多普勒频移, 由(14)式、

(15)式得. $s(t)$ 表示发射信号, 针对本文面向的小目标成像声呐, 采用脉宽为 T 、信号中心频率为 f_0 的CW脉冲信号, 表示为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi f_0 t}. \quad (17)$$

以及脉宽为 T 、信号中心频率为 f_0 、带宽为 B_0 的LFM脉冲信号, 表示为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(-0.5Bt + \frac{0.5Bt^2}{T}\right)\right] e^{j2\pi f_0 t}. \quad (18)$$

在极浅海复杂多途传播效应的影响下, 任意时刻的混响信号均由多个散射元的散射信号叠加形成. 可将混响视为大量散射面元对发射信号产生的散射波在接收点处的叠加的结果, 为方便数值计算, 采用离散形式构架模型.

在声呐成像距离范围上, 按 Δr 为步长, 划分 L_r 个圆环状距离单元, 散射圆环中心至声呐的水平距离记为 r_l ; 在声呐水平向方位角 $[\varphi_1, \varphi_2]$ 作用范围内, 每一个散射圆环按 $\Delta\varphi$ 为步长, 划分 K_r 个方位角单元. 经过上述散射单元的划分, 混响作用区域被划分为 $L_r \times K_r$ 个散射单元, 如图5所示. 则声呐接收到的混响可用离散的形式表示为

$$R(t) = \sum_{l=1}^{L_r} \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{m=1}^{M(r_l, z, \theta_o)} \sum_{n=1}^{N(r_l, z, \theta_o)} I_0 G_{m,n}^{l,k}(r_l, z) \times s(t - \tau_{im}(r_l, z) - \tau_{sn}(r_l, z)) \times \exp(-j2\pi(f_0 + f_{dlk})t), \quad (19)$$

$$G_{m,n}^{l,k}(r_l, z) = G_m^{\text{inc}}(r_l, z) G_n^{\text{scat}}(r_l, z) \times \sqrt{10 \lg_{10} [\sigma(\theta_{\text{inc},m}, \theta_{\text{scat},n}, \phi_{\text{bi}})] \Delta S_{lk}}, \quad (20)$$

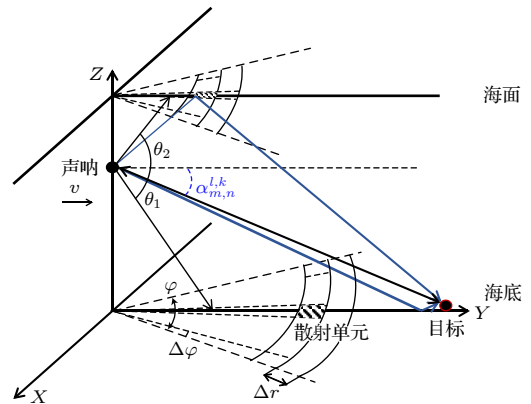


图5 极浅海回波建模示意图

Fig. 5. Schematic diagram of echo modeling in ultra-shallow water.

其中 f_{dlk} 表示第 (l, k) 个散射单元对应的多普勒频移. ΔS_{lk} 表示第 (l, k) 个网格散射截面的面积, 对于第 l 个散射圆环, 每一个散射单元对应的散射面积为

$$\Delta S_{lk} = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{360} \pi (r_{l+1}^2 - r_l^2). \quad (21)$$

定义散射元位于海面的多途混响为海面多途混响 $R_s(t)$; 散射元位于海底的多途混响为海底多途混响 $R_b(t)$, 极浅海界面混响可表示为

$$R(t) = R_s(t) + R_b(t). \quad (22)$$

当计算成像声呐接收阵上的混响时域波形时, (19) 式需改为

$$R_n(t) = \sum_{l=1}^{L_r} \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{m=1}^M(r_l, z, \theta_o) \sum_{n=1}^N(r_l, z, \theta_s) I_0 G_{m,n}^{l,k}(r_l, z) \times s(t - \tau_{lm}(r_l, z) - \tau_{sn}(r_l, z)) \exp[-j2\pi(f_0 + f_{dlk})t] \times \exp\left[-j2\pi(f_0 + f_{dlk})\left(N-1 - \frac{N-1}{2}\right)d \sin(\alpha_{m,n}^{l,k})/c\right], \quad (23)$$

其中 $\alpha_{m,n}^{l,k}$ 为第 (l, k) 个散射单元沿第 (m, n) 条路径的散射回波相对法向的入射锥角.

以分析海底散射元散射过程为例, 对于海底散射元经海面海底反射的多途传播路径的单程传播距离可表示为

$$D_{p,q} = \begin{cases} \sqrt{r_l^2 + [(p+q+1)z - z_s]^2}, & p = q, \\ \sqrt{r_l^2 + [(p+q)z + z_s]^2}, & p = q+1 \end{cases}$$

(p 为海面反射次数, q 为海底反射次数; $p = 1, 2, \dots$; $q = 0, 1, 2, \dots$). 当水平距离为 r_l 的散射元的直达回波单程传播时间为 $t_l = \frac{1}{c} \sqrt{r_l^2 + (z - z_s)^2}$ 时, 位于

$$r_{p,q}(t_l) = \begin{cases} \sqrt{(ct_l)^2 - [(p+q+1)z - z_s]^2}, & p = q, \\ \sqrt{(ct_l)^2 - [(p+q)z + z_s]^2}, & p = q+1 \end{cases}$$

处的散射元的回波可通过 p 次海面反射与 q 次海底反射的传播路径, 与该直达波同时到达. 为明确 t 时刻混响的多途路径存在条件, 需满足根号内值非负, 且满足入射波第一次反射位置 $r_{p,q} \frac{z - z_s}{(p+q+1)z - z_s}$ 在海底照射范围内. 为简化计算, 固定 $z_s = 1 \text{ m}$, 取 p, q 取值最小的极限情况进行分析, 此时 $r_{1,0}(t_l) =$

$$\sqrt{r_l^2 - 4z}.$$

因此, z 的取值需满足:

$$z \leq r_l^2/4, \quad (24)$$

$$\tan \theta_o \geq \frac{2z - 1}{\sqrt{r_l^2 - 4z}}. \quad (25)$$

当小目标成像声呐保持开角较小、海深很大时, 不能满足 (24) 式和 (25) 式中的不等式. 因此, t 时刻混响仅由此时刻有效海底散射元的直达波构成, 无需考虑海面混响及多途路径叠加的影响. 此时 (19) 式可以简化为

$$R(t) = \sum_{l=1}^{L_r} \sum_{k=1}^{K_r} [I_0 G^{l,k}(r_l, z) s(t - \tau_l(r_l, z) - \tau_s(r_l, z)) \times \exp(-j2\pi(f_0 + f_{dlk})t)]. \quad (26)$$

此时, 有效散射元数量仅有 $L_r \times K_r$ 个, 不足以满足中心极限定理的应用条件, 此时混响包络统计特性将呈现 K 分布.

而当海深极浅时, 即使 p, q 取值很大, 仍能满足不等式条件. 此时, 声线在海面与海底之间频繁反射, 需考虑海面混响以及多途路径叠加对 t 时刻混响结果的影响. 对混响产生影响的海底散射元分布于多个水平半径为 $r_{p,q}$ 的海底散射圆环上; 同理, 相关海面散射元分布于多个水平半径为

$$r_{p,q}^s(t_l) = \begin{cases} \sqrt{(ct_l)^2 - [(p+q)z + z_s]^2}, & q = p, \\ \sqrt{(ct_l)^2 - [(p+q+1)z - z_s]^2}, & q = p+1 \end{cases}$$

($p = 0, 1, 2, \dots$; $q = 1, 2, \dots$) 的海面散射圆环上 ($r_{p,q}^s \frac{z_s}{(p+q)z + z_s}$ 在海面照射范围内). 同一时刻参与混响叠加的有效散射体数量显著增加. 根据 K 分布理论, 这会导致 K 分布形状参数 α 增大, K 分布的包络统计特性会趋近瑞利分布. 因此在相同条件下, 极浅海混响的包络统计特性比浅海更接近瑞利分布.

同样地, 当海深较浅时, 如果成像位置水平距离 r_l 很近, 可供形成同时到达多途路径的更近距离散射元数量有限, 多途回波不丰富. 当水平距离 r_l 较远时, 多途回波显著增多, 且相同开角的情况下, 距离越远, 有效照射范围越大, 同一时刻参与混响形成的有效散射元数量增加. 因此, 远距离混响信号比近距离混响信号包络统计特性更接近瑞利分布. 进一步结合海深与水平距离的相对关系分析,

对某一时刻混响有贡献的散射元数量由海深与水平距离的比值 z/r_l 影响: 当 z/r_l 较大时, 有效散射元仍集中于直达波覆盖的有限区域, 混响包络更趋向 K 分布的统计特性; 当 z/r_l 较小时, 到达时间更依赖于水平距离, 成像范围内可形成同时到达多途路径的散射元数量也相应增多, 使得信号满足中心极限定理的条件更充分, 混响包络统计特性更接近瑞利分布.

当多个路径的信号叠加时, 相邻时间样本会共享部分相同的散射元贡献, 从而产生时间上的相关性. 假设不同散射面元的散射系数相互独立, 将强度参数简化为 C_{mnlk} , 引入发射信号自相关函数:

$$\Gamma_{ss}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) s^*(\tau - t) d\tau. \quad (27)$$

代入 (19) 式, 混响信号的相关函数可表示为

$$\begin{aligned} \Gamma_{RR}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) R^*(\tau - t) d\tau \\ &= |I_0|^2 \sum_{l=1}^{L_r} \sum_{k=1}^{K_r} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mnlk} \\ &\quad \times \Gamma_{ss}(\tau - 2(\tau_{im} + \tau_{sn})) \\ &\quad \times \exp[-j2\pi(f_0 + f_{dlk})\tau], \quad (28) \end{aligned}$$

式中, 时延差项 $2(\tau_{im} + \tau_{sn})$ 表明, 不同路径的混响贡献会在不同时刻影响自相关函数, 即多个不同延迟的发射信号自相关函数发生了叠加. 与单一直达路径情形 $\Gamma_{RR}(\tau) = |I_0|^2 \Gamma_{ss}(\tau) C_l \exp[-j2\pi(f_0 + f_{dl})\tau]$, 其自相关函数形状完全由 $\Gamma_{ss}(\tau)$ 决定不同, 极浅海密集多途使得这些时延差连续覆盖较宽范围, 宏观上表现为自相关函数主瓣展宽、衰减变缓.

4 数值分析

基于第 2 节模型, 开展数值仿真, 基础参数设置如下: 海底与海面为平坦界面, 海水声速恒定为 1500 m/s. 海底底质参数为: 密度比 $\rho_m = 1.268$, 声速比 $v_m = 1.0568$, 损失参数 $\delta_m = 0.0188$, 体积参数 $\sigma_m = 0.002$, 谱指数 $\gamma_m = 3.25$, 谱强度 $\omega_m = 0.0015$. 海面参数为: 风速 2 m/s, 不平整谱指数 $\gamma_2 = 3.5$. 声源强度为 0 dB; 声呐固定在海面下 1 m 处.

4.1 海深对界面混响的影响

为探究海深对界面混响传播特性与统计规律

的影响, 开展了多海深条件下的界面混响数值仿真研究. 本节所关注的混响传播特性主要包含多途到达角时变分布与有效散射单元空间位置, 它们直接表征了多途回波的到达结构与散射路径的密集程度, 通过改变接收点处参与叠加的散射单元数量与空间分布, 影响了混响包络的统计分布形态. 数值仿真中采用发射信号为 CW 脉冲信号, 中心频率 450 kHz, 脉宽 0.05 ms; 声呐开角为 $\pm 80^\circ$; 设定平台运动速度为 4 节, 针对 2 m, 10 m, 50 m 和 100 m 四种海深条件开展计算.

多途混响的到达角随时间变化如图 6 所示, 其中蓝线标注时刻为水平距离 50 m 处海底散射元的直达波到达时间. 其中正值角度代表信号自接收阵下方入射, 负值代表自接收阵上方入射. 对于极浅海海深条件, 混响的到达角分布范围较宽, 但随时间推移, 到达角快速收敛至 0° 附近, 且曲线密集交叠. 这一现象源于海深浅时海底海面间距较小, 声线从声源到达散射体进而到达接收器的传播路径多样, 且时间差小、数量密集, 混响的到达角随时间快速收窄. 对于海深较深的浅海条件, 到达角分布分层更加清晰. 在混响初期, 到达角较小的成分主要来源于近距离海面散射单元的直达回波; 随着传播时间延长, 海底散射单元的回波逐渐到达, 其初始到达角较大, 并随时间推移逐步减小, 最终汇聚于一个较小的角度.

对于四个海深条件下水平距离 50 m 处海底散射元的直达波, 其到达时刻分别为 0.06668 s, 0.06774 s, 0.09334 s 和 0.1479 s (如图 6 所示), 确定所有经声源-散射体-接收器传播历经对应时长的声线, 计算其对应散射单元. 绘制该时刻下对混响有贡献的散射单元空间分布图, 如图 7 所示. 在该计算条件下, 对该时刻混响结果有影响的散射单元分布在以声呐为圆心的若干同心圆上, 不同同心圆对应不同的传播方式.

极浅海深条件下该时刻的有效散射单元数量显著多于海深较大的情况. 这是因为海深增大时, 声波单次传播距离延长, 相同时刻内仅少数散射元的直达回波可到达接收端; 而海深越小, 声波在海底与海面间的往返时间缩短, 相同时刻下可覆盖的散射体范围显著扩展, 有效散射元数量随之大幅增加.

为分析海深对混响信号统计特性的影响, 对混响信号进行数据截取: 以水平距离 50 m 处海底散

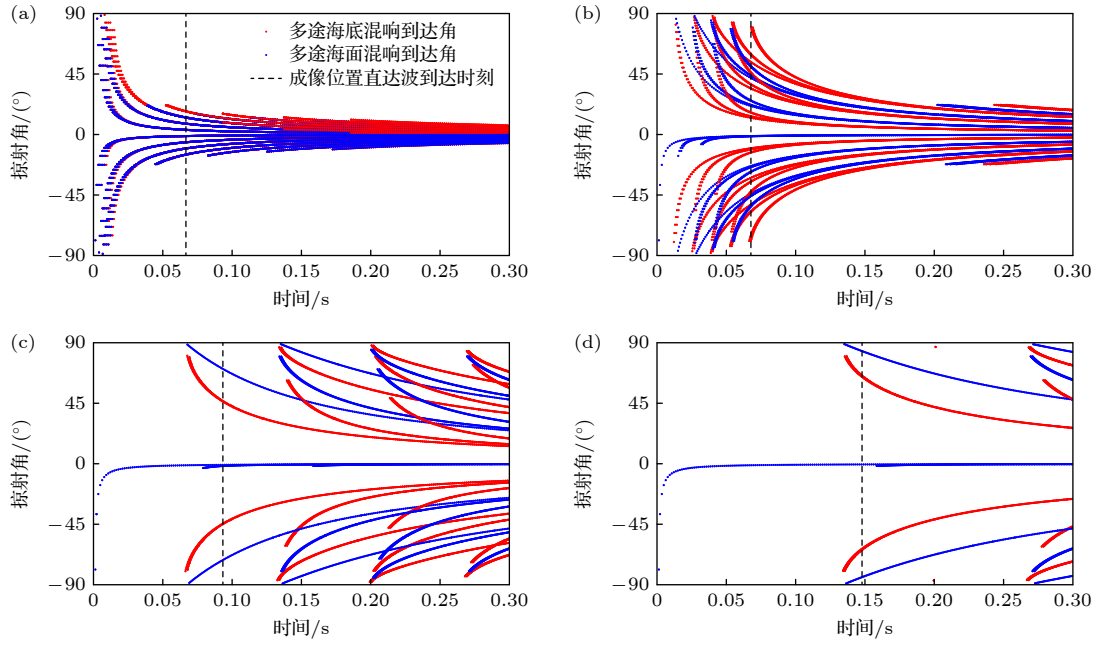


图 6 不同海深下多途混响到达角随时间变化 (a) 2 m; (b) 10 m; (c) 50 m; (d) 100 m

Fig. 6. Time variation of the angle of arrival for multipath reverberation at different water depths: (a) 2 m; (b) 10 m; (c) 50 m; (d) 100 m.

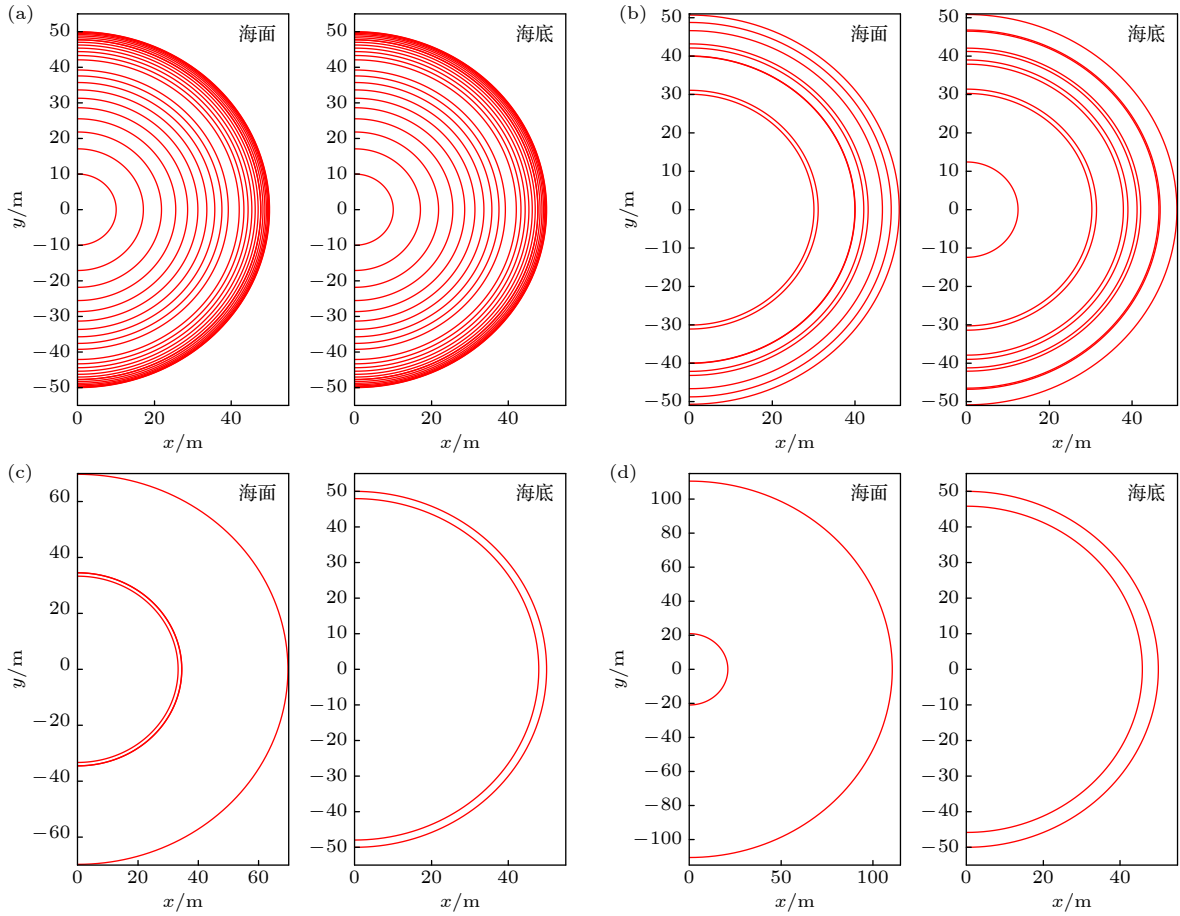


图 7 不同海深下对混响有贡献的散射单元位置 (a) 2 m; (b) 10 m; (c) 50 m; (d) 100 m

Fig. 7. Positions of scattering elements contributing to reverberation at different water depths: (a) 2 m; (b) 10 m; (c) 50 m; (d) 100 m.

射元的直达波到达时刻为基准, 截取时长涵盖 7 个信号脉宽的时间序列, 以此为样本分析混响包络统计特性研究, 结果如图 8 所示. 分析混响包络累积分布函数计算并其与理论分布的差值, 结果如图 9 所示.

结果表明, 在 2 m 海深的条件下, 声波传播的多途结构高度密集, 同一时刻参与混响叠加的有效

散射元数量充足, 满足中心极限定理适用条件, 混响包络的概率密度函数与瑞利分布理论曲线拟合度更优. 当海深增加至 10 m 时, K 分布的检验统计量略低于瑞利分布, 但二者差值仅为 6.8×10^{-3} 左右, 这是因为当 K 分布的形状参数较大时, K 分布会渐近趋同于瑞利分布. 当海深逐步增加至 50 m 和 100 m 时, 多途传播路径稀疏, 同一时刻能够贡

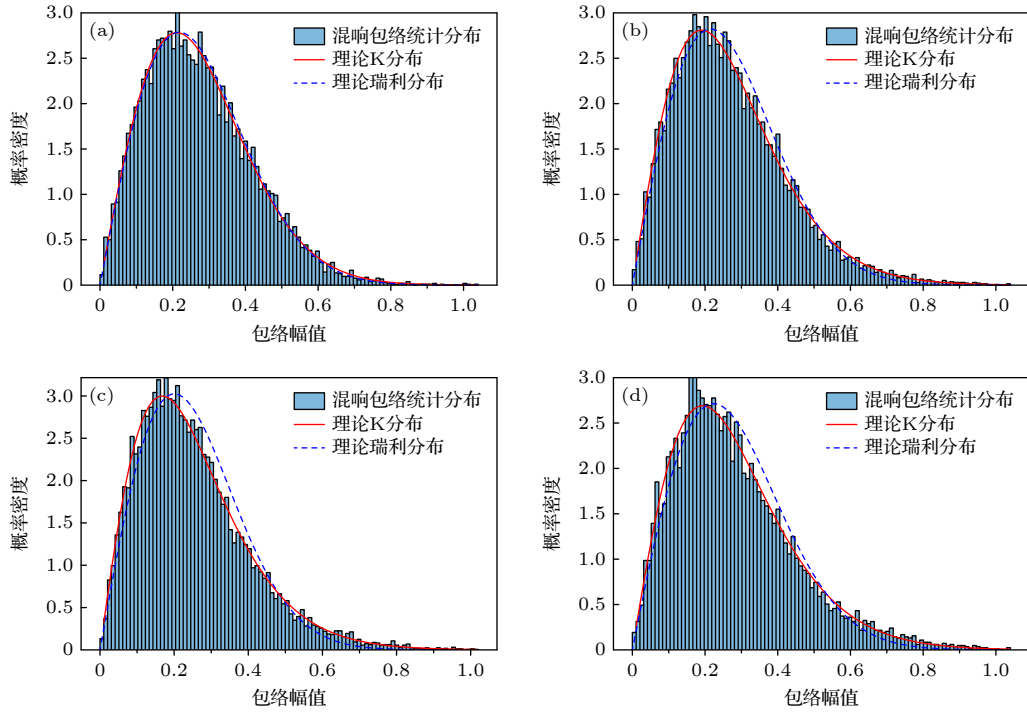
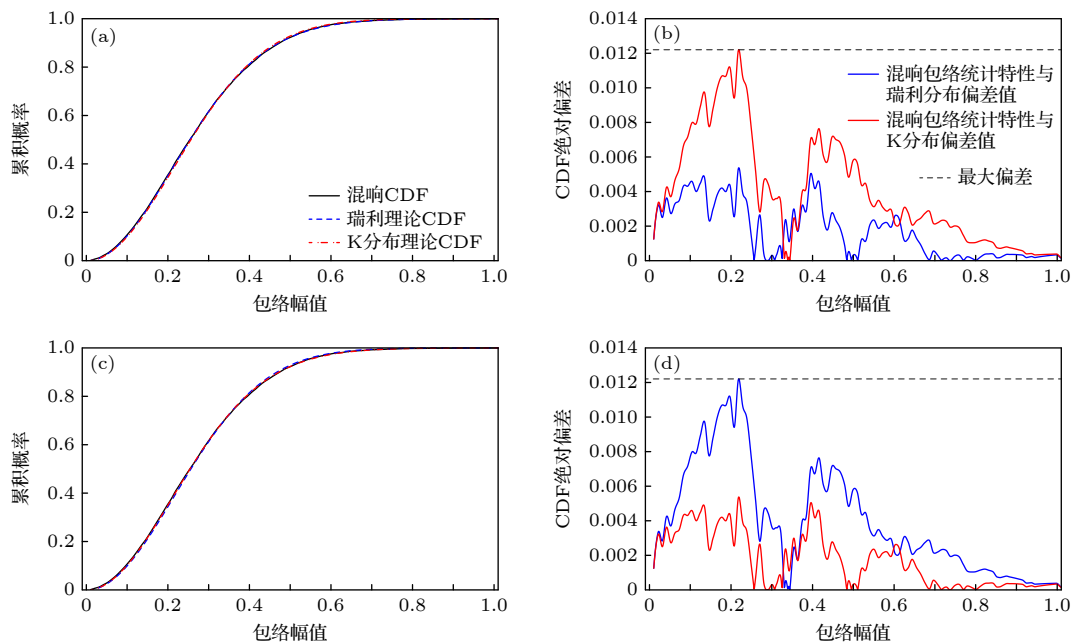


图 8 不同海深下混响包络统计特性 (a) 2 m; (b) 10 m; (c) 50 m; (d) 100 m

Fig. 8. Statistical characteristics of reverberation envelope at different water depths: (a) 2 m; (b) 10 m; (c) 50 m; (d) 100 m.



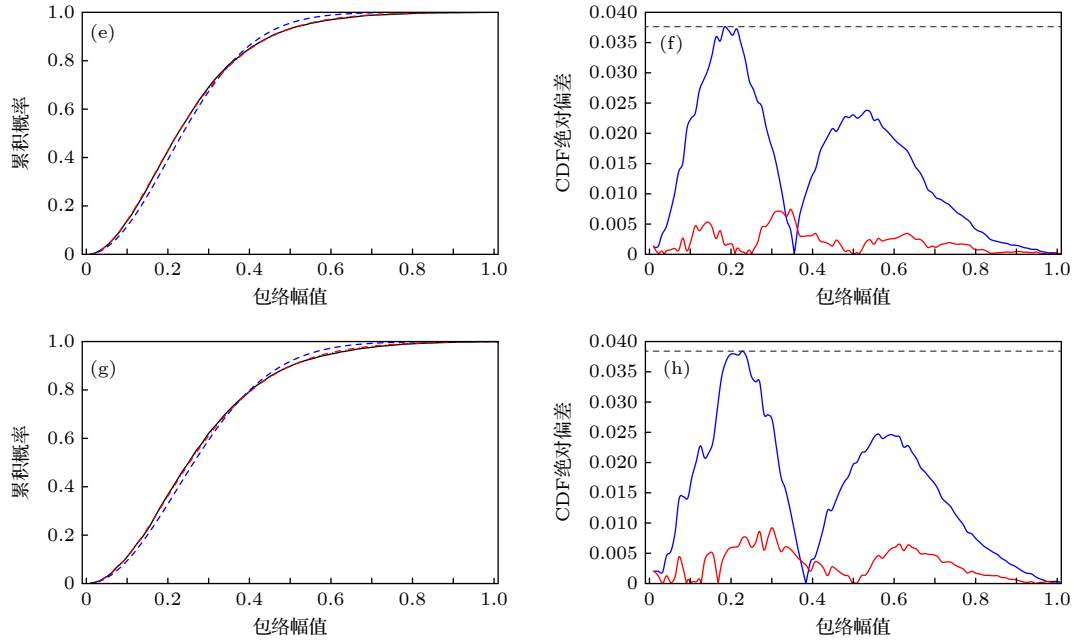


图 9 不同海深下混响包络累积分布函数及差值对比图 (a), (b) 2 m; (c), (d) 10 m; (e), (f) 50 m; (g), (h) 100 m

Fig. 9. Comparison of reverberation envelope cumulative distribution functions and their differences at different water depths: (a), (b) 2 m; (c), (d) 10 m; (e), (f) 50 m; (g), (h) 100 m.

献有效散射的单元数量显著减少. 在此条件下, 信号不能满足中心极限定理, 混响包络的概率密度分布尾部较瑞利分布更厚, 累积分布函数差值约为 0.03, 表现出 K 分布的统计特性.

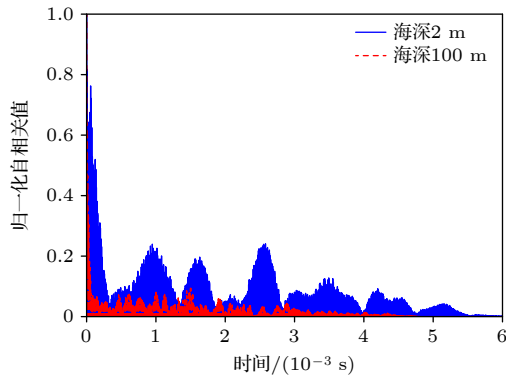


图 10 混响时间相关性对比图

Fig. 10. Reverberation time correlation comparison plot.

选取海深 2 m 与 100 m 的极限条件, 对混响信号进行时间相关性分析, 结果如图 10 所示. 对比可见, 极浅海环境下混响信号的时间相关性高于浅海信号. 多途效应不仅使混响包络的概率密度函数与瑞利分布拟合更优, 还会通过路径叠加增强混响信号在时间维度上的相关性.

4.2 平台航速对界面混响的影响

为探究平台运动速度对海洋界面混响特性的影响, 开展不同平台航速下的界面混响数值仿真计算. 数值仿真中采用发射信号为 CW 脉冲信号, 中心频率 450 kHz, 脉宽 0.05 ms; 声呐开角为 $\pm 80^\circ$; 设定海深为 10 m, 分别设定平台运动速度为 0 节、5 节、10 节、20 节. 不同航速下混响频谱如图 11 所示.

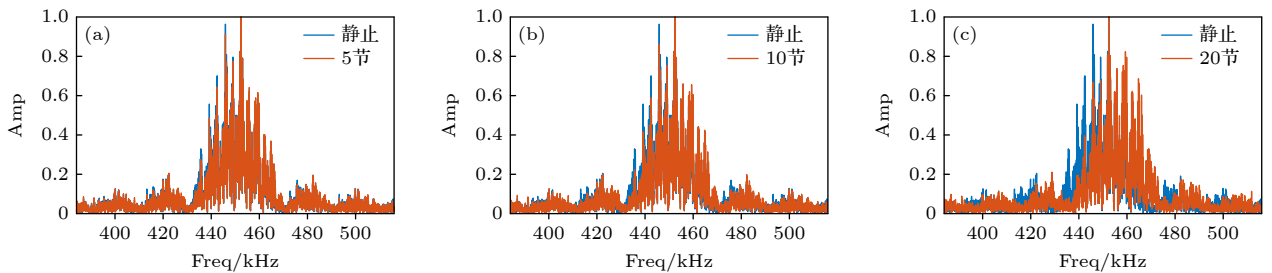


图 11 不同平台航速下混响频谱图 (a) 静止; (b) 10 节; (c) 20 节

Fig. 11. Reverberation spectrograms at different platform speeds: (a) Stationary; (b) 10 knots; (c) 20 knots.

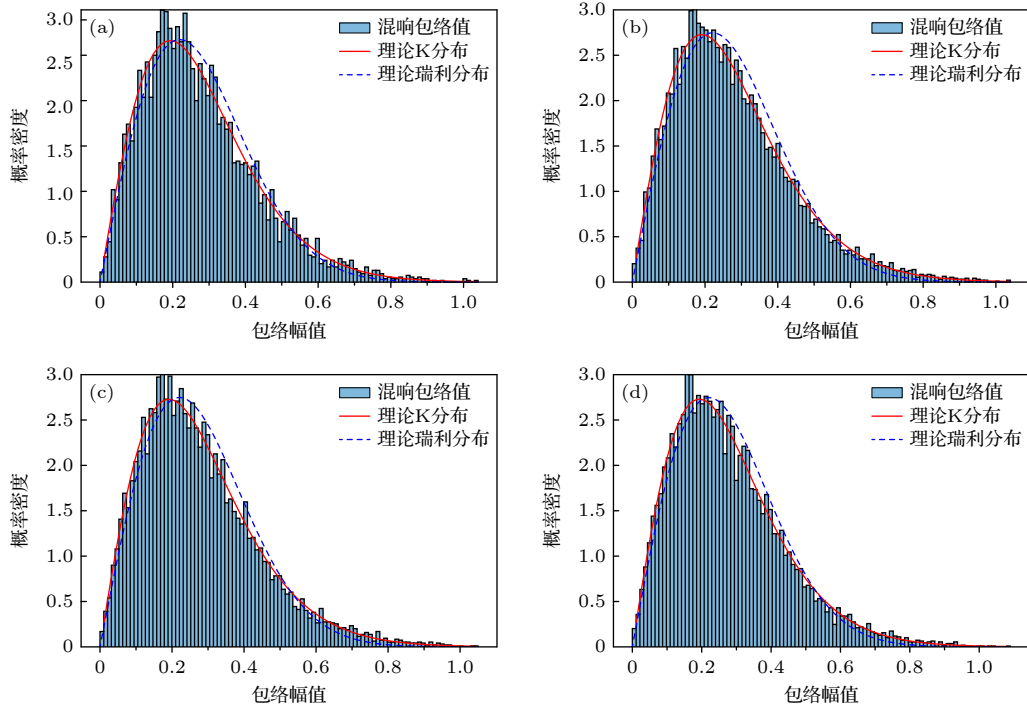


图 12 不同平台航速下混响包络统计特性 (a) 静止; (b) 5 节; (c) 10 节; (d) 20 节

Fig. 12. Statistical characteristics of reverberation envelope at different platform speeds: (a) Stationary; (b) 5 knots; (c) 10 knots; (d) 20 knots.

以水平距离 50 m 处海底散射元的直达波到达时刻为基准, 截取时长涵盖 7 个信号脉宽的时间序列, 以此为样本分析混响包络统计特性研究. 不同航速下混响包络的统计特性如图 12 所示. 平台运动对混响特性的影响主要集中于频谱维度, 运动平台引发的多普勒效应使混响频谱发生显著的频率尺度偏移, 且偏移量随航速增大而增加; 而对混响包络的统计特性而言, 未受到平台运动的明显扰动. 因为平台运动仅改变散射信号的频率成分, 未改变有效散射单元的数量及分布, 此时有效散射体分布位置于图 12 中蓝色虚线所示范围一致. 因此, 混响包络的统计特性几乎不受平台航速的影响.

分别对平台运动速度为 0 节、20 节条件下的混响信号进行时间相关性分析, 结果如图 13 所示. 平台运动对单帧混响时间相关性没有明显影响. 而在实际多帧连续探测中, 平台运动对混响空时相关性的影响主要体现在帧间相关性, 分别在静止平台与航速 4 节平台进行多帧仿真, 帧间间隔 1 s, 对比混响背景帧间空时相关性, 如图 14 所示. 相较于静止平台混响极高的帧间相关性, 运动平台的混响帧间相关性明显下降, 这是由于随着平台移动, 运动平台与界面散射元的相对几何关系发生改变,

导致声波照射区域发生位移, 后续帧所观测到的散射元与首帧的重叠度降低, 使得二者的空时相关性下降.

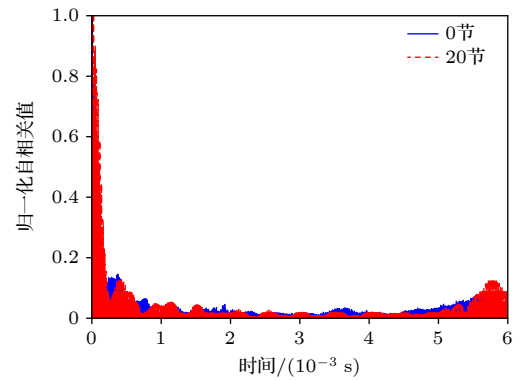


图 13 单帧混响时间相关性对比图

Fig. 13. Single-frame reverberation time correlation comparison plot.

4.3 成像距离对界面混响的影响

为揭示成像距离对界面混响传播规律及统计特性的影响, 开展不同成像距离下的界面混响数值仿真计算. 数值仿真中采用发射信号为 CW 脉冲信号, 中心频率 450 kHz, 脉宽 0.05 ms; 声呐开角为 $\pm 80^\circ$; 设定海深为 10 m, 平台运动速度 4 节.

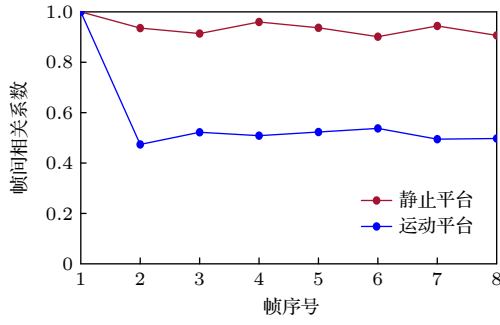


图 14 多帧混响帧间相关性对比图

Fig. 14. Multi-frame reverberation inter-frame correlation comparison plot.

多途混响的到达角随时间变化如图 15 所示, 其中蓝线标注时刻从前至后分别为水平距离 10, 50, 100, 200 m 处海底散射元的直达波到达时间. 在对应 10 m 近距离的首个蓝线时刻, 混响到达角曲线分布较为稀疏, 主要集中在 -5° — -10° 的小角度区间和 $\pm 75^{\circ}$ 处. 这是因为近距离场景下, 仅有对应小到达角的近距离海面 and 对应大到达角的海底散射元的直达路径可以到达. 随着时间推移至 50 m 对应的蓝线时刻, 到达角在大值小值均有分布, 曲线密集度有所提升, 少量多反射路径声线加入, 使到达角分布呈现扩散. 时间在 100 m 对应时刻时, 到达角聚拢于 0° , $\pm 12.5^{\circ}$ 和 $\pm 23^{\circ}$ 处, 分别对应海面散射元的直达回波、海底海面散射元经过 1 次、2 次海底反射的路径. 当时间延续至 200 m 对应时刻时, 到达角曲线密集度大幅提高, 呈现密集交叠形态, 且到达角分布在 $\pm 20^{\circ}$ 范围内, 包含经过 0—3 次海底反射的路径. 对于界面混响, 多途混响的空间分布由对应回程路径的海底反射次数决定.

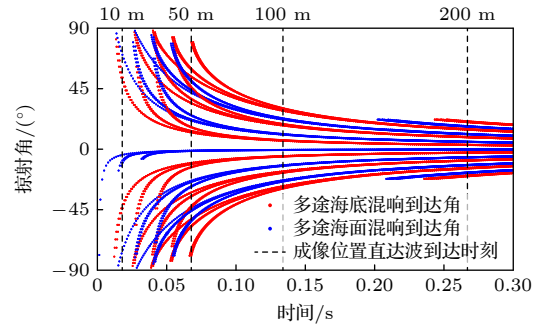
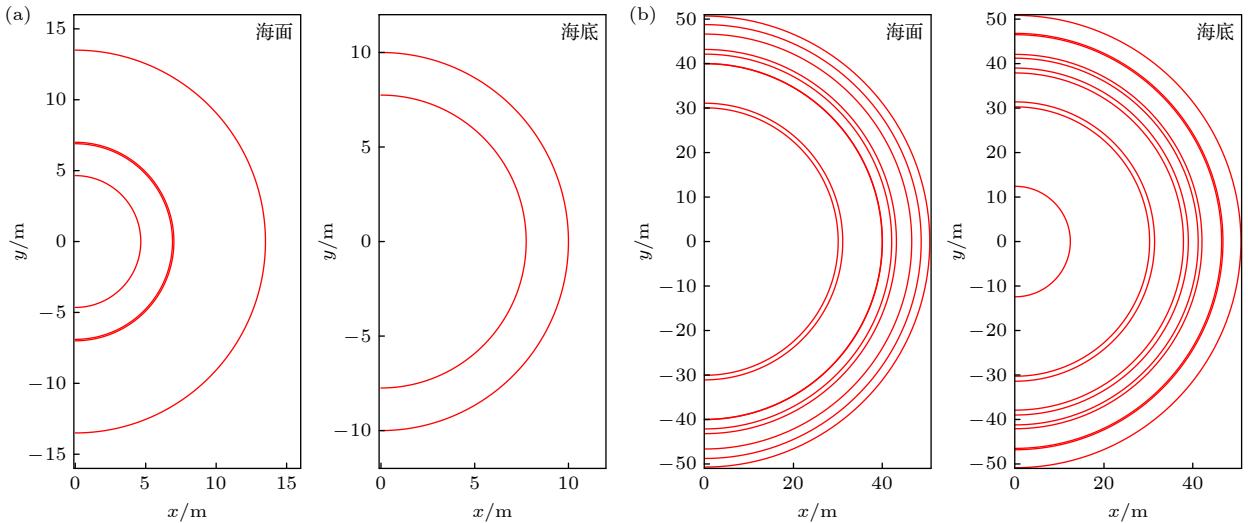


图 15 不同成像距离下多途混响到达角随时间变化

Fig. 15. Time variation of the angle of arrival for multipath reverberation at different imaging distances.

不同成像距离下, 同一时刻对混响有贡献的散射单元空间分布规律如图 16 所示. 以各成像距离对应的直达波到达时刻 0.01794 s, 0.06774 s, 0.13387 s 和 0.26694 s 为时间节点, 提取所有历经对应时长的声线. 与 3.1 节类似, 该时刻下的有效散射单元同样分布在以声纳为圆心的若干同心圆上. 随着成像距离的增大, 同一时刻内的有效散射单元数量呈现显著递增趋势. 当成像距离较近时, 仅近距离散射元的直达回波能够满足传播时长匹配基准时刻; 而当成像距离增加至 100 和 200 m 时, 相同传播时长约束条件下, 满足传播时间的有效散射体数量大幅增加.

分别以水平距离 10, 50, 100 和 200 m 处海底散射元的直达波到达时刻为基准, 截取时长涵盖 7 个信号脉宽的时间序列, 以此为样本分析混响包络统计特性研究, 结果如图 17 所示. 累积分布函数及差值对比如图 18 所示. 在近距离场景, 由于成像范围有限导致多途传播路径不丰富, 有效散射元数量处于较低水平, 混响信号叠加无法满足中心极限定理



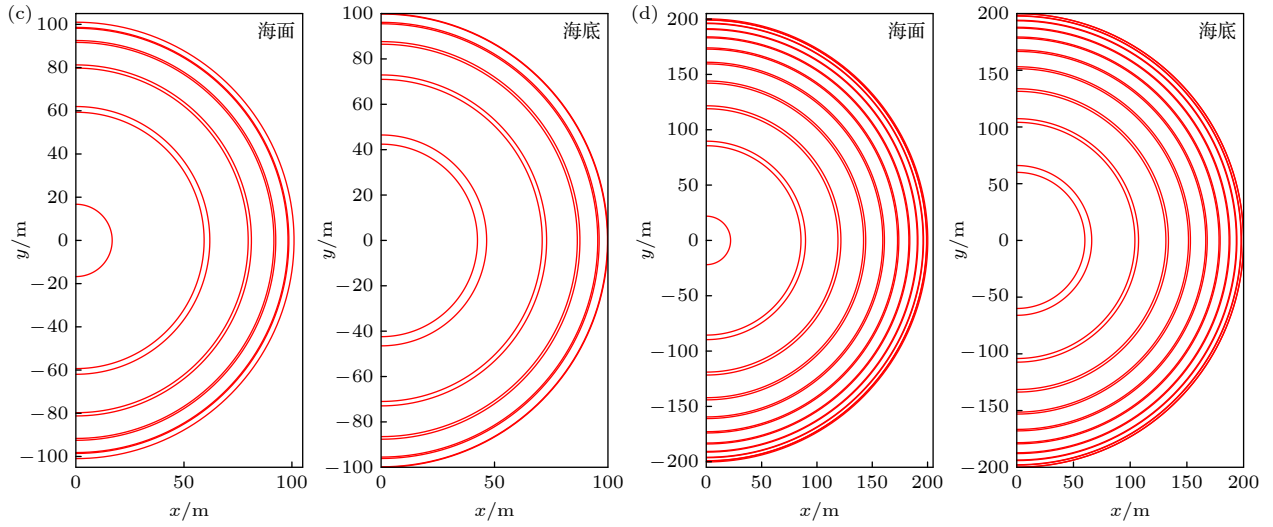


图 16 不同成像距离下对同一时刻混响有贡献的散射单元位置 (a) 10 m; (b) 50 m; (c) 100 m; (d) 200 m

Fig. 16. Positions of scattering elements contributing to reverberation at the same time instant under different imaging distances: (a) 10 m; (b) 50 m; (c) 100 m; (d) 200 m.

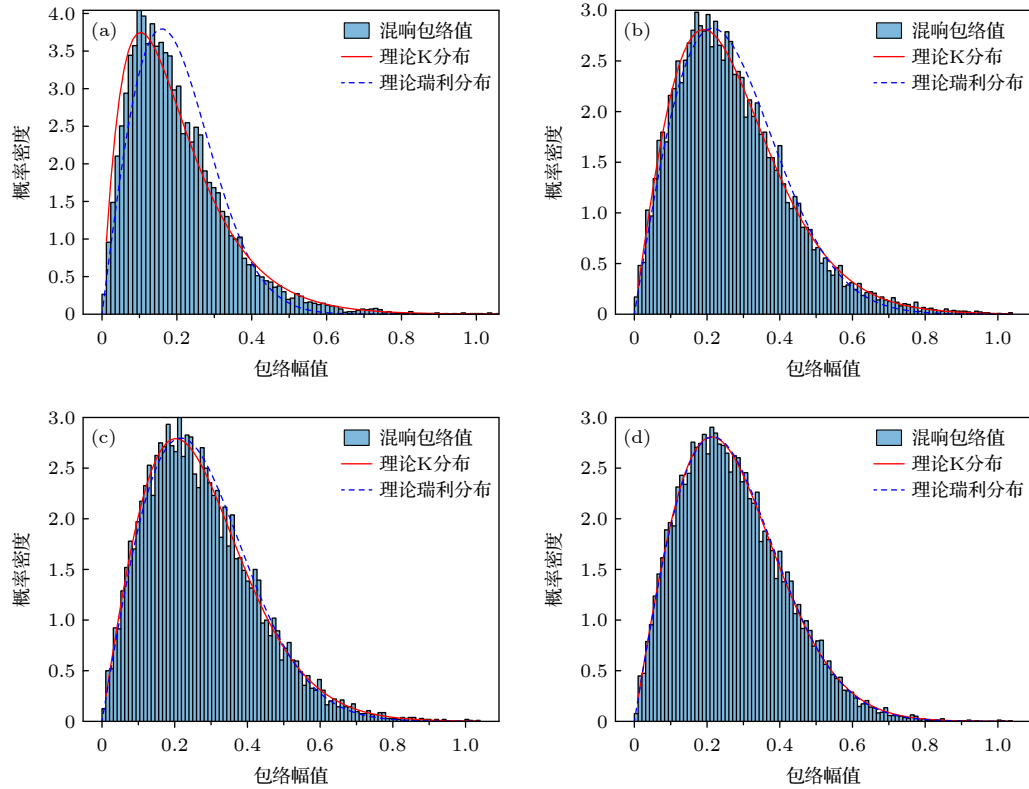


图 17 不同成像距离下混响包络统计特性 (a) 10 m; (b) 50 m; (c) 100 m; (d) 200 m

Fig. 17. Statistical characteristics of reverberation envelope at different imaging distances: (a) 10 m; (b) 50 m; (c) 100 m; (d) 200 m.

适用条件, 其包络概率密度分布与瑞利曲线贴合度较低, 累积分布函数差值为 0.035, 符合 K 分布的统计规律; 随着成像距离增加, 多途径丰富、有效散射元数量显著增多, 信号叠加效应逐步满足中心极限定理, 混响包络概率密度与瑞利曲线的贴合度明显提升, 累积分布函数差值下降到 10^{-3} 量级。

分别对水平距离 10 m, 200 m 处截取的混响信号进行时间相关性分析, 结果如图 19 所示。远距离场景下混响信号的自相关函数显著高于近距离场景, 随着成像距离增大, 丰富的多途传播路径通过叠加效应增强了混响信号在时间维度上的关联性, 使信号前后时序的相关性显著提升。

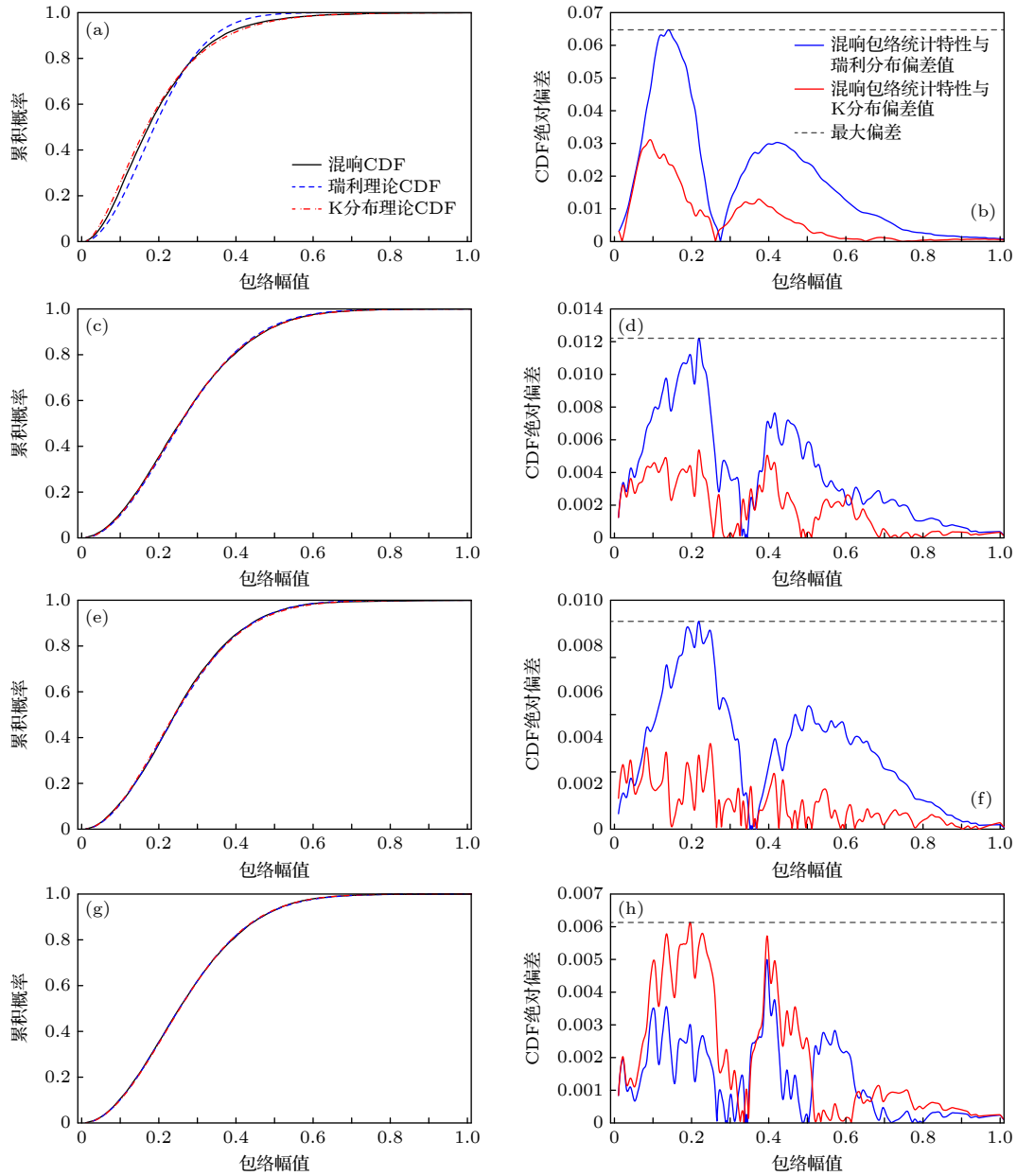


图 18 不同成像距离下混响包络累积分布函数及差值对比图 (a), (b) 10 m; (c), (d) 50 m; (e), (f) 100 m; (g), (h) 200 m

Fig. 18. Comparison of reverberation envelope cumulative distribution functions and their differences at different imaging ranges: (a), (b) 10 m; (c), (d) 50 m; (e), (f) 100 m; (g), (h) 200 m.

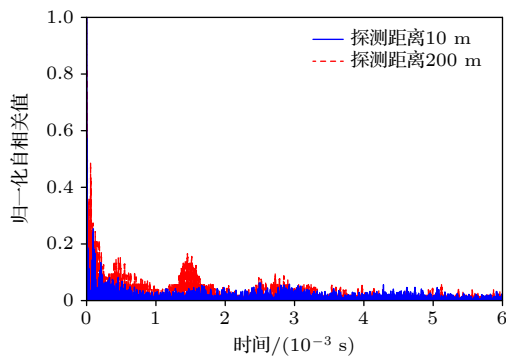


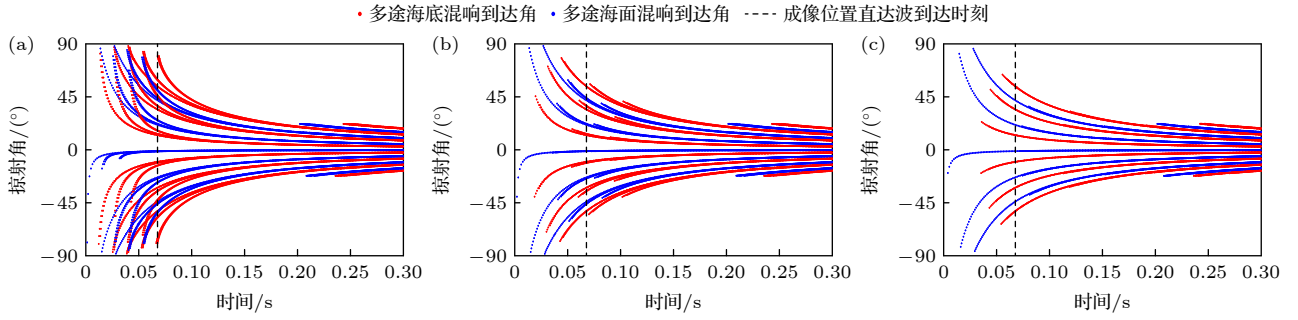
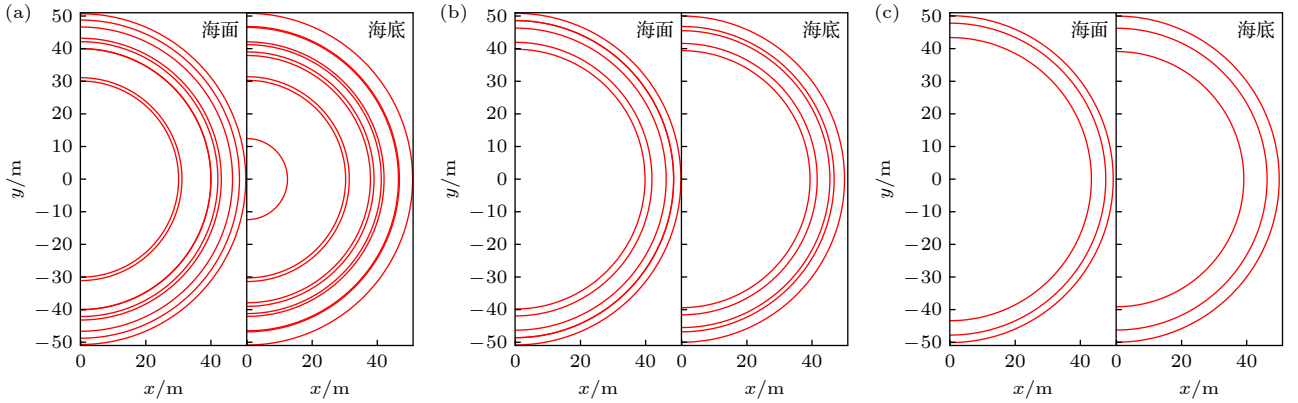
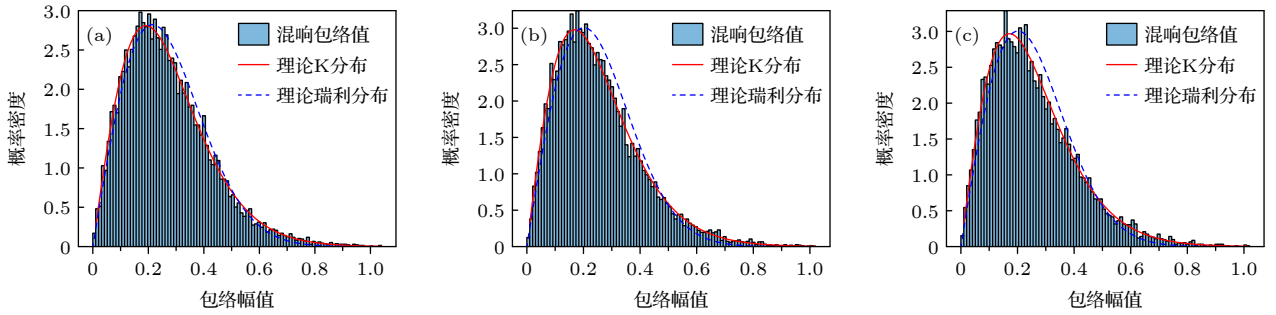
图 19 混响时间相关性对比图

Fig. 19. Reverberation time correlation comparison plot.

4.4 开角对界面混响的影响

为揭示垂直开角对界面混响传播规律及统计特性的影响, 开展不同垂直开角下的界面混响数值仿真计算. 数值仿真中采用发射信号为 CW 脉冲信号, 中心频率 450 kHz, 脉宽 0.05 ms; 声呐开角为 $\pm 80^\circ$; 设定海深为 10 m, 成像距离 50 m, 平台运动速度 4 节.

多途混响的到达角随时间变化如图 20 所示, 其中蓝线标注时刻为水平距离 50 m 处海底散射元的直达波到达时间. 其中正值角度代表信号自接收

图 20 不同开角下多途混响到达角随时间变化 (a) $\pm 80^\circ$; (b) $\pm 40^\circ$; (c) $\pm 20^\circ$ Fig. 20. Time variation of the angle of arrival for multipath reverberation at different opening angles: (a) $\pm 80^\circ$; (b) $\pm 40^\circ$; (c) $\pm 20^\circ$.图 21 不同开角下对同一时刻混响有贡献的散射单元位置 (a) $\pm 80^\circ$; (b) $\pm 40^\circ$; (c) $\pm 20^\circ$ Fig. 21. Positions of scattering elements contributing to reverberation at the same time instant under different opening angles (a) $\pm 80^\circ$; (b) $\pm 40^\circ$; (c) $\pm 20^\circ$.图 22 不同开角下混响包络统计特性 (a) $\pm 80^\circ$; (b) $\pm 40^\circ$; (c) $\pm 20^\circ$ Fig. 22. Statistical characteristics of reverberation envelope at different opening angles: (a) $\pm 80^\circ$; (b) $\pm 40^\circ$; (c) $\pm 20^\circ$.

器下方入射, 负值代表自上方入射. 当垂直开角减小时, 声呐对海底海面照射区域范围同步缩小, 限制近距离海底、海面散射单元所产生直达回波的接收角. 对于水平距离 50 m 处海底散射元的直达波, 计算同一时刻对应的散射单元位置如图 21 所示. 垂直开角增大时, 多途径更多, 有效散射单元数量更大. 以水平距离 50 m 处海底散射元的直达波到达时刻为基准, 截取时长涵盖 7 个信号脉宽的时间序列, 以此为样本分析混响包络统计特性研究. 结果如

图 22 所示. 累积分布函数及差值对比如图 23 所示.

当垂直开角减小, 对于海底混响, 仅考虑成像位置散射单元直达回波, 此时混响信号的叠加过程不再满足中心极限定理的适用条件, 其包络概率密度函数呈现更厚的拖尾特征, 与 K 分布的差值明显小于瑞利分布, 符合 K 分布的统计规律. 分别对垂直开角 $\pm 80^\circ$, $\pm 20^\circ$ 条件下的混响信号进行时间相关性分析, 结果如图 24 所示. 大开角条件下混响的时间相关性有所提高.

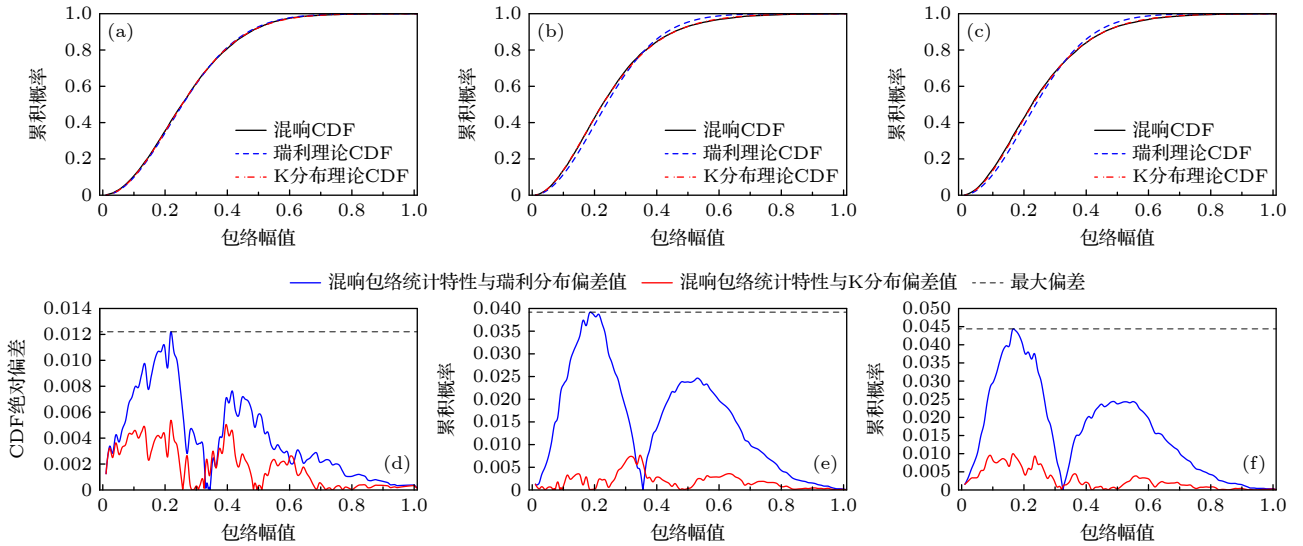

 图 23 不同开角下混响包络累积分布函数及差值对比图 (a), (d) $\pm 80^\circ$; (b), (e) $\pm 40^\circ$; (c), (f) $\pm 20^\circ$

Fig. 23. Comparison of reverberation envelope cumulative distribution functions and their differences at different aperture angles: (a), (d) $\pm 80^\circ$; (b), (e) $\pm 40^\circ$; (c), (f) $\pm 20^\circ$.

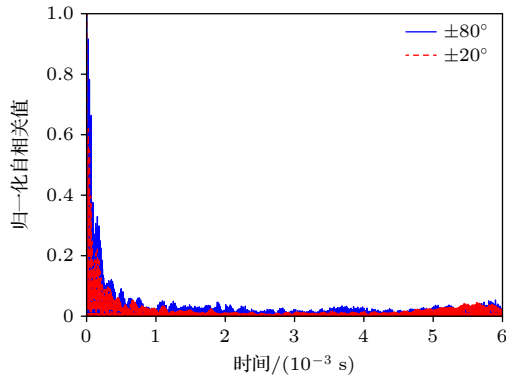


图 24 混响时间相关性对比图

Fig. 24. Reverberation time correlation comparison plot.

4.5 信号类型对界面混响包络统计特性的影响

为探究发射信号波形对极浅海界面混响统计

特性的影响, 本节在相同环境参数下, 采用线性调频脉冲信号开展仿真. 仿真参数设置如下: 海深分别取 2 m 与 10 m; 声呐开角为 $\pm 80^\circ$; 发射信号中心频率为 450 kHz, 脉宽 1 ms, 带宽 50 kHz.

以水平距离 50 m 处海底散射元的直达波到达时刻为基准, 截取时长涵盖 7 个信号脉宽的时间序列作为统计样本, 计算混响包络的概率密度函数与累积分布函数, 如图 25 和图 26 所示.

在相同海深条件下, 对比图 8(a) 和图 8(b) 与图 25 中 CW 与 LFM 信号的混响包络统计特性可知. LFM 信号在没有经过匹配滤波处理的原始信号的情况下, 是一个长脉冲, 距离分辨率低, 有效散射元数量多, 充分满足中心极限定理的适用条件, 使混响的概率密度函数与瑞利分布拟合效果好. 证实极浅海环境下, 无论 CW 还是 LFM 信号, 其混响

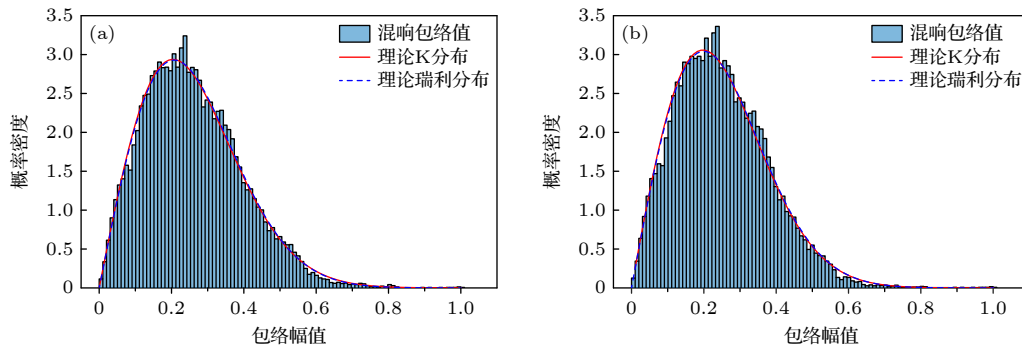


图 25 不同海深下 LFM 信号混响包络统计特性 (a) 2 m; (b) 10 m

Fig. 25. Statistical characteristics of LFM signal reverberation envelopes at different water depths: (a) 2 m; (b) 10 m.

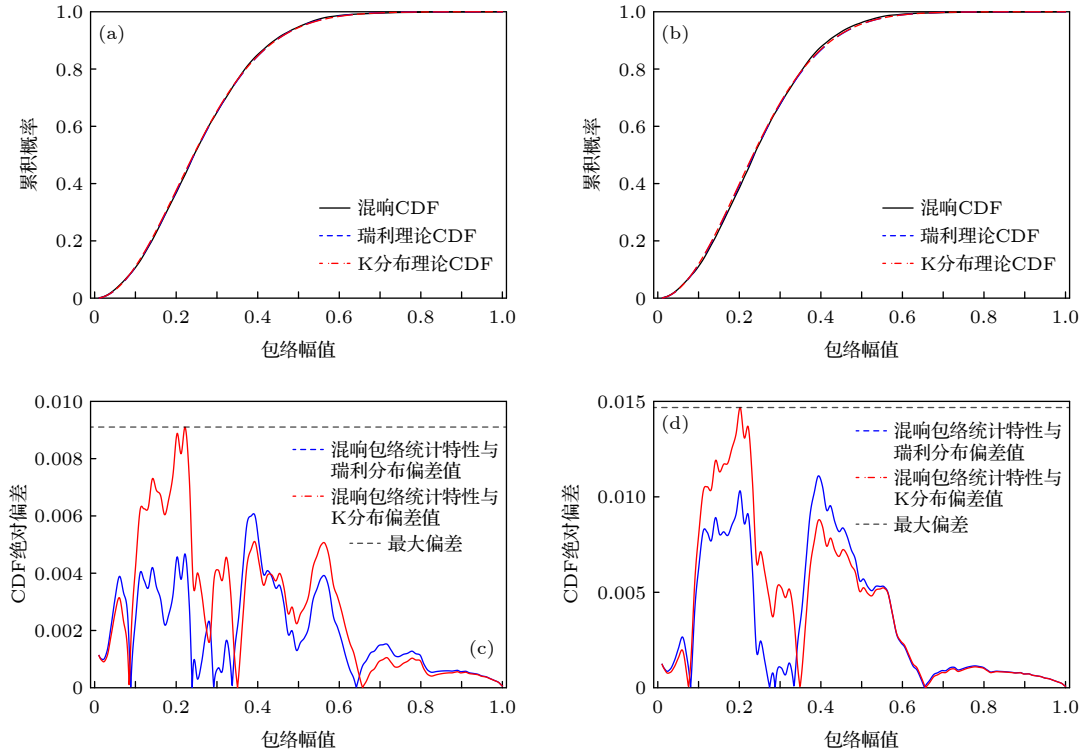


图 26 不同海深下 LFM 信号混响包络累积分布函数及差值对比图 (a), (c) 2 m; (b), (d) 10 m

Fig. 26. Comparison of cumulative distribution functions and differences of LFM signal reverberation envelopes at different water depths: (a), (c) 2 m; (b), (d) 10 m.

包络概率密度均能与瑞利分布理论曲线的高度吻合. 因此, 在极浅海强多途场景下, 混响统计特性趋向瑞利分布的核心规律对常用信号形式具有普适性.

5 实测数据处理与分析

为验证理论分析有效性, 开展实测试验. 采用声呐垂直开角为 $\pm 60^\circ$. 极浅水试验区域水深范围 2—3 m, 发射信号采用线性调频信号, 中心频率 450 kHz, 脉宽 1 ms, 带宽 50 kHz. 浅水试验区域水深约 30 m, 发射信号为 LFM 脉冲信号, 中心频

率 60 kHz, 脉宽 5 ms, 带宽 9 kHz.

对所采集到的实测混响数据进行处理分析. 相关实测数据及分析结果如图 27—图 32 所示. 针对极浅水场景, 选取第 10 号、第 50 号阵元接收到的回波信号, 成像距离为 45 m 附近, 其时域波形如图 27 所示. 针对浅水场景, 选取第 10 号、第 30 号阵元接收到的回波信号, 成像距离为 1280 m 附近, 其时域波形如图 30 所示. 对信号进行统计分析得到包络统计特性如图 28 和图 31 所示, 累积分布函数及差值如图 29 和图 32 所示. 图 28 中两组极浅水混响数据的包络概率密度分布与瑞利分布理论

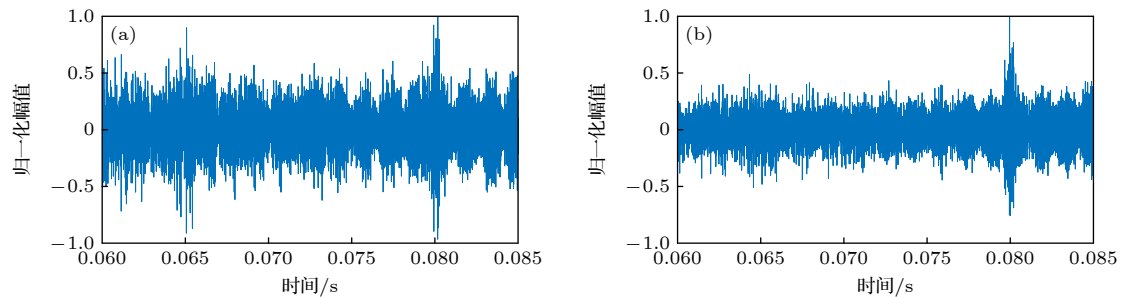


图 27 极浅水混响信号波形图 (a) 10 号阵元; (b) 50 号阵元

Fig. 27. Waveform of reverberation signals in extremely shallow water: (a) Element 10; (b) element 50.

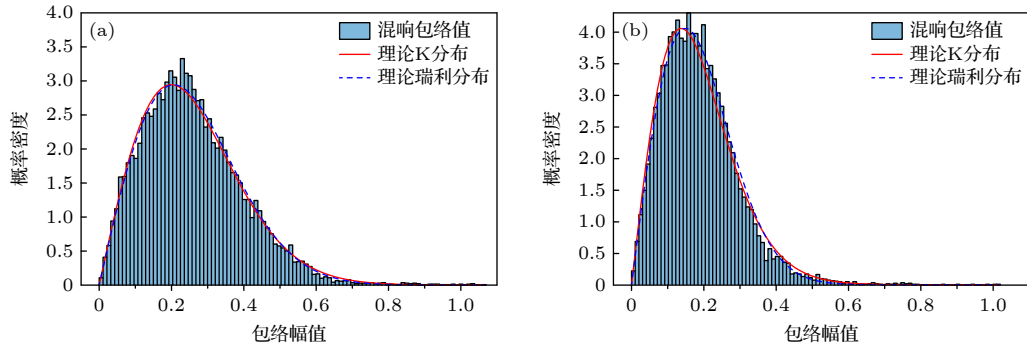


图 28 极浅水混响包络统计特性 (a) 10 号阵元; (b) 50 号阵元

Fig. 28. Statistical characteristics of reverberation envelope in extremely shallow water: (a) Element 10; (b) element 50.

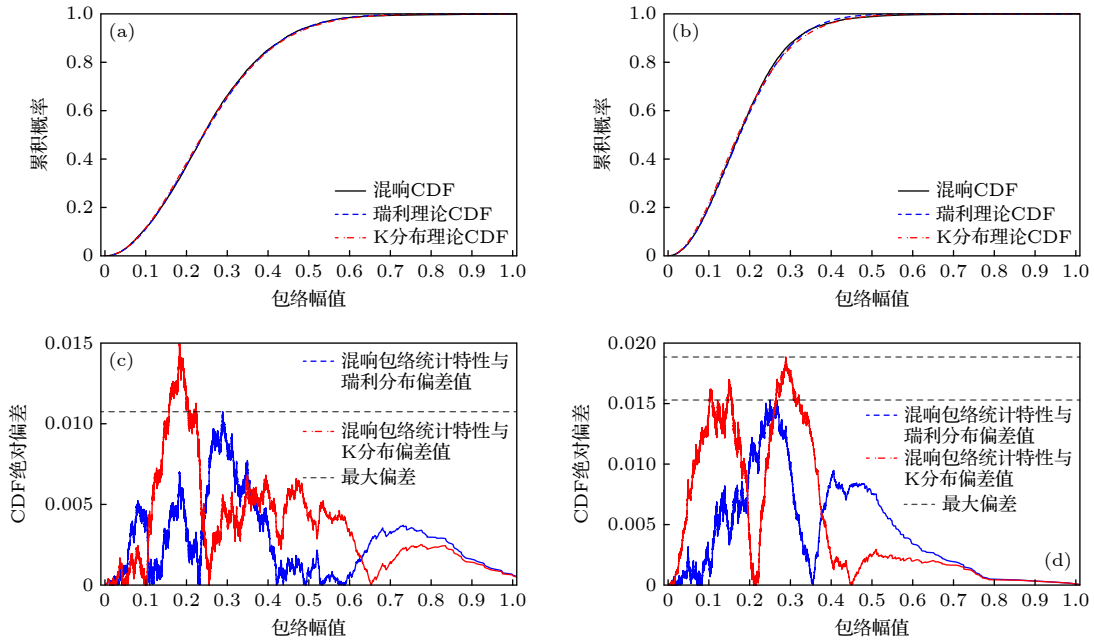


图 29 极浅水混响包络累积分布函数及差值对比图 (a), (c) 10 号阵元; (b), (d) 50 号阵元

Fig. 29. Comparison of cumulative distribution functions and differences of reverberation envelopes in extremely shallow water: (a), (c) Element 10; (b), (d) element 50.

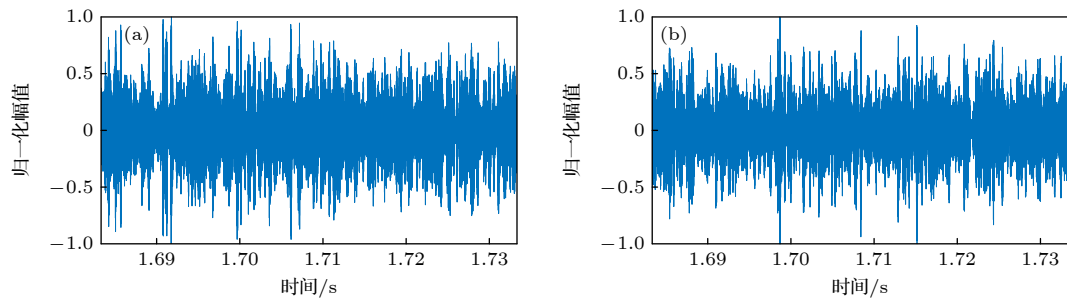


图 30 浅水混响阵元域信号波形图 (a) 10 号阵元; (b) 30 号阵元

Fig. 30. Shallow-water reverberation signal waveform in the element domain: (a) Element 10; (b) element 30.

曲线拟合度较高, 无明显拖尾特征, 与前文数值仿真中“极浅海条件下有效散射元充足, 满足中心极限定理”的结论一致. 图 31 中浅水混响包络的概率

密度分布呈现明显的 K 分布特征, 尾部较瑞利分布更厚, 这是因为浅水多途径稀疏、有效散射元数量不足, 无法满足中心极限定理.

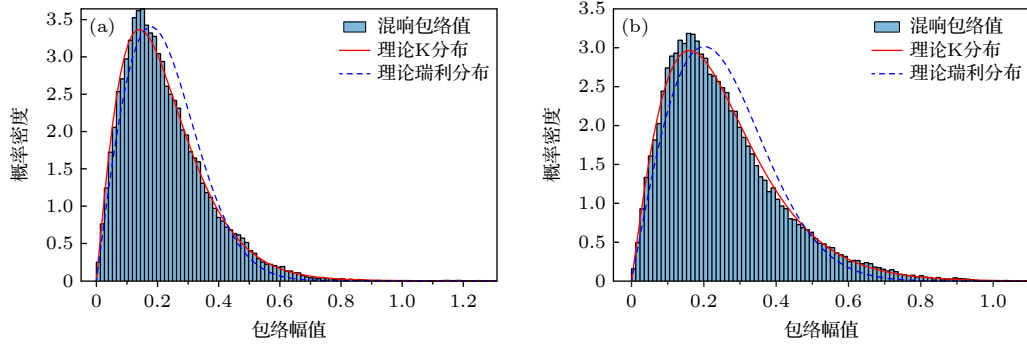


图 31 浅水混响包络统计特性 (a) 10 号阵元; (b) 30 号阵元

Fig. 31. Statistical characteristics of reverberation envelope in shallow water: (a) Element 10; (b) element 30.

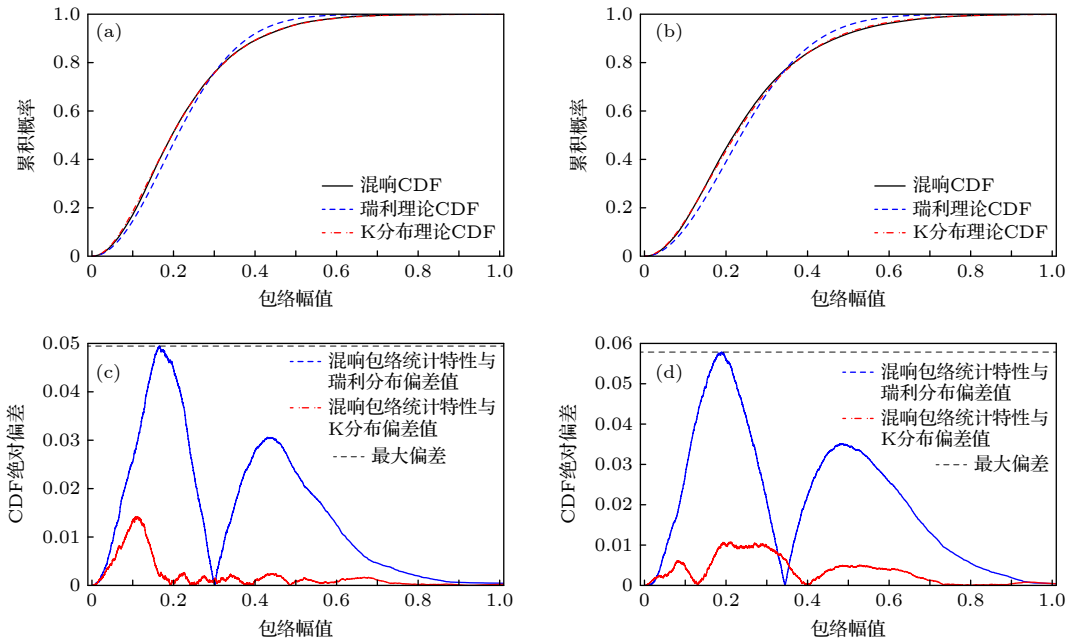


图 32 浅水混响包络累积分布函数及差值对比图 (a), (c) 10 号阵元; (b), (d) 30 号阵元

Fig. 32. Comparison of cumulative distribution functions and differences of reverberation envelopes in shallow water: (a), (c) Element 10; (b), (d) element 50.

6 结 论

本文聚焦极浅海动平台声呐界面混响特性, 从理论推导和数值仿真两个方面, 分析海深、平台运动速度、成像距离、垂直开角对多途到达角结构、同一时刻有效散射元分布位置的影响机制, 进而揭示其对混响时域统计特性的影响规律.

1) 当时成像距离恒定的前提下, 海深是调控混响统计特性的核心因素. 海深越多途传播结构更密集, 同一时刻上有效散射元数量充足, 使混响包络统计特性趋近瑞利分布, 且信号自相关性更高. 海深越大, 多途路径稀疏, 有效散射元数量减少, 混响包络呈现 K 分布特征.

2) 在海深与成像距离保持恒定的场景中, 平台航速对混响特性的调控作用集中于频谱维度. 平台运动导致回波同时包含不同的多普勒频移量, 正对平台运动方向的散射元贡献最大频移, 且向两侧递减; 航速变化对混响包络的统计特性影响较小.

3) 当海深固定时, 成像距离成为决定混响时域统计特性的关键变量. 近距离探测时, 多途传播路径有限, 回波结构不够丰富, 有效散射元数量有限, 混响包络与瑞利曲线贴合度低, 呈现 K 分布的拖尾特征; 随着成像距离增加, 多途路径显著增多, 有效散射元数量大幅提升, 混响包络与瑞利分布的贴合度明显提高, 信号自相关性也随之增强.

4) 模型结果可为极浅海环境中成像声呐信号

处理的最优空域、时域处理提供统计特性等先验信息.

参考文献

- [1] Yin J W, Liu B, Zhu G P, et al. 2018 *Sensors* **18** 3461
- [2] Shang E C, Zhang R H 1975 *Acta Phys. Sin.* **24** 260 (in Chinese) [尚尔昌, 张仁和 1975 物理学报 **24** 260]
- [3] Buckner H P, Morris H E 1968 *J. Acoust. Soc. Am.* **44** 827
- [4] Zhang R H, Jin G L 1984 *Acta Acust.* **9** 12 (in Chinese) [张仁和, 金国亮 1984 声学学报 **9** 12]
- [5] Wang L H, Qin J X, Fu D L, Li Z L, Liu J J, Weng J B 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 134303 (in Chinese) [王龙昊, 秦继兴, 傅德龙, 李整林, 刘建军, 翁晋宝 2019 物理学报 **68** 134303]
- [6] Li F H, Jin G L, Zhang R H 2000 *Sci. China (Ser. A)* **30** 560 (in Chinese) [李风华, 金国亮, 张仁和 2000 中国科学 A 辑 **30** 560]
- [7] Liu J J, Li F H, Guo L H 2004 *Acta Acust.* **29** 49 (in Chinese) [刘建军, 李风华, 郭良浩 2004 声学学报 **29** 49]
- [8] Liu J J, Li F H, Zhang R H 2006 *Acta Acust.* **31** 173 (in Chinese) [刘建军, 李风华, 张仁和 2006 声学学报 **31** 173]
- [9] Wu J R, Sun H, Huang Y W 2002 *J. Harb. Eng. Univ.* **23** 4 (in Chinese) [吴金荣, 孙辉, 黄益旺 2002 哈尔滨工程大学学报 **23** 4]
- [10] Etter P C 2018 *Underwater Acoustic Modeling and Simulation* (Boca Raton: CRC Press)
- [11] Hu M, Chen L G 2015 *Acoust. Electron. Eng.* **2015** 1 (in Chinese) [胡明, 陈立纲 2015 声学与电子工程 **2015** 1]
- [12] Yao W J, Cai Z M, Wei H K 2009 *Acta Acust.* **34** 223 (in Chinese) [姚万军, 蔡志明, 卫红凯 2009 声学学报 **34** 223]
- [13] Guo X Y, Su S J, Wang Y K, et al. 2010 *J. Natl. Univ. Def. Technol.* **32** 141 (in Chinese) [郭熙业, 苏绍璟, 王跃科, 等 2010 国防科技大学学报 **32** 141]
- [14] Guo X Y, Su S J, Wang Y K 2009 *J. Natl. Univ. Def. Technol.* **31** 92 (in Chinese) [郭熙业, 苏绍璟, 王跃科 2009 国防科技大学学报 **31** 92]
- [15] Guo X Y, Su S J, Wang Y K 2009 *Tech. Acoust.* **28** 203 (in Chinese) [郭熙业, 苏绍璟, 王跃科 2009 声学技术 **28** 203]
- [16] Fang Y Y, Li Y A, Cui L 2013 *Tech. Acoust.* **32** 473 (in Chinese) [房媛媛, 李亚安, 崔琳 2013 声学技术 **32** 473]
- [17] Li H Z 2023 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [李汉治 2023 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]
- [18] Zhao Y C, Liu X H, Yang Y X 2025 *Acta Acust.* **50** 933 (in Chinese) [赵亚聪, 刘雄厚, 杨益新 2025 声学学报 **50** 933]
- [19] Bellettini A, Pinto M 2008 *IEEE J. Ocean. Eng.* **34** 285
- [20] Bjørnø L 2011 *IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies* Tokyo Japan, April 5–8, 2011 p1
- [21] Huang Y S, Ge H L, Wang F Y, Xie Y 2020 *J. Unmanned Undersea Syst.* **28** 1 (in Chinese) [黄颖淞, 葛辉良, 王付印, 谢勇 2020 水下无人系统学报 **28** 1]
- [22] Yang Y X, Zhou J B, Li M Y, Hou X H, Yang L, Xie L, Wang L, Shen H, Liu X H, Lei B, Du Z H 2025 *Tech. Acoust.* **44** 309 (in Chinese) [杨益新, 周建波, 李明杨, 侯翔昊, 杨龙, 谢磊, 王璐, 沈贺, 刘雄厚, 雷波, 杜朝辉 2025 声学技术 **44** 309]
- [23] Zhang X B, Chen X H, Qu W 2017 *IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)* IEEE Chengdu, China, October 27–30, 2017 p1601
- [24] Duersch M I, Long D G 2015 *Int. J. Remote Sens.* **36** 2010
- [25] Abraham D A, Lyons A P 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 347
- [26] Xue R Z, Duan R, Yang K D, Ma Y L, Guo Y 2021 *Acta Acust.* **46** 926 (in Chinese) [薛润泽, 段睿, 杨坤德, 马远良, 郭玥 2021 声学学报 **46** 926]
- [27] Yin L J, Wu J R, Hou Q N 2021 *Appl. Acoust.* **40** 828 (in Chinese) [殷丽君, 吴金荣, 侯倩男 2021 应用声学 **40** 828]
- [28] Zhang Z X, Wu J R, Zhu J H, Hou Q N, Zhang Y F 2025 *Acta Acust.* **50** 600 (in Chinese) [张祚祥, 吴金荣, 朱嘉慧, 侯倩男, 张扬帆 2025 声学学报 **50** 600]
- [29] Mourad P D, Jackson D R 1989 *J. Acoust. Soc. Am.* **94** 344
- [30] Lu Y H 2020 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [陆永华 2020 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [31] Dashen R, Henyey F S, Wurmser D 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 310
- [32] Zhao B Q, Wang Y M, Wang H R 2005 *J. Inf. Command Control Syst. Simul. Technol.* **27** 83 (in Chinese) [赵宝庆, 王英民, 王华荣 2005 情报指挥控制系统与仿真技术 **27** 83]
- [33] Yin L J, Wu J R, Hou Q N, Ma L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 174303 (in Chinese) [殷丽君, 吴金荣, 侯倩男, 马力 2021 物理学报 **70** 174303]
- [34] Gauss R C, Gragg R F, Wurmser D, Fialkowski J M, Nero R W 2002 *Broadband Models for Predicting Bistatic Bottom, Surface, and Volume Scattering Strengths* Naval Research Laboratory Report 10042
- [35] Hui J, Wang Z J, Hui J Y, He W X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5491 (in Chinese) [惠娟, 王自娟, 惠俊英, 何文翔 2009 物理学报 **58** 5491]

Modeling and analyzing of interface reverberations for moving-platform imaging sonar in very shallow water environments^{*}

ZHAI Qingyue¹⁾ LIU Xionghou^{1)†} YANG Yixin²⁾

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

²⁾ (*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(Received 4 March 2026; revised manuscript received 30 April 2026)

Abstract

An imaging sonar in very shallow water environments faces significant challenges in accurately detecting underwater small targets due to the adverse effects of dense multipath propagation and strong interface reverberations. To accurately characterize the interface reverberation characteristics of imaging sonar under moving platform conditions in very shallow water, an interface reverberation model incorporating both sea surface and seabed reverberation is established. This model integrates physical processes such as the acoustic propagation in very shallow water, sea bottom and surface scattering, and sonar platform motion. Ray theory is employed to calculate high-frequency acoustic propagation, while unit scattering and the small slope approximation (SSA) are used to compute sea bottom and surface scattering. Taking water depth, platform speed, imaging range, and vertical beamwidth as inputs, the model yields the statistical characteristics of reverberation under dense multipath conditions in very shallow water. Results from numerical simulations and experimental data analyses indicate that the statistical characteristics of the envelope of interface reverberation in very shallow water are primarily influenced by water depth, imaging range, and vertical beamwidth. The presence of dense multipaths in the very shallow water causes the interface reverberation envelope to tend towards the Rayleigh distribution and enhances the temporal correlation of the reverberation through superposition of dense multipaths. Platform speed has little impact on the statistical characteristics of the reverberation except for the Doppler shift caused by relative motion. Furthermore, as the imaging range increases, the multipath components in interface reverberations become richer, causing the envelope to conform more closely to the Rayleigh distribution. Additionally, as the vertical beamwidth increases, the interface reverberation envelope gradually transitions from the K-distribution to the Rayleigh distribution.

Keywords: very shallow water, moving platform sonar, interface reverberation, statistical characteristics

DOI: [10.7498/aps.75.20260314](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260314)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260314](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260314)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U2341203, 12274346) and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFC1400200).

[†] Corresponding author. E-mail: xhliu@nwpu.edu.cn

极浅海环境中动平台成像声呐界面混响建模与分析

翟清越 刘雄厚 杨益新

Modeling and analyzing of interface reverberations for moving-platform imaging sonar in very shallow water environments

ZHAI Qingyue LIU Xionghou YANG Yixin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 181004 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260314

CSTR: 32037.14.aps.75.20260314

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260314>

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

浅海波导中非线性声传播特性研究

Characteristics of nonlinear acoustic propagation in shallow-water waveguides

物理学报. 2026, 75(4): 181004 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251274>

浅海环境中用于目标深度属性判别的线谱起伏特征量分析

Analysis of line spectral fluctuation characteristics for source depth discrimination in shallow water

物理学报. 2024, 73(13): 134301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231911>

不确定浅海环境中水平阵角度域子空间检测

Detection by angle-domain subspace with horizontal array in uncertain shallow-water environment

物理学报. 2022, 71(8): 084304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211742>

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>

浅海内波环境下声场干涉条纹的稀疏重建

Sparse reconstruction of acoustic interference fringes in shallow water and internal wave environment

物理学报. 2023, 72(7): 074301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221932>

基于多频共稀疏建模的浅海模态分离方法

A shallow-water modal separation method based on multi-frequency joint sparse modeling

物理学报. 2026, 75(6): 074301 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251685>