论文

浅海环境噪声垂直相关提取海底反射参数

殷宝友^{①*}, 尚尔昌^①, 马力^①, 林建恒^②^① 中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190;^② 中国科学院声学研究所北海研究站, 青岛 266023

*E-mail: yinbaoyou@hotmail.com

收稿日期: 2010-10-30; 接受日期: 2011-04-28

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10774156, 10974219)

摘要 分析小掠射角海底反射特性与浅海环境噪声场垂直相关的关系, 从而提取表征海底反射的参数. 对某海域浅水区观测的海洋环境噪声数据进行垂直相关特性研究, 并用于反演海底参数. 鉴于海底参数之间存在耦合, 采用分步反演的方法: 首先利用曲线拟合或经验公式的方法获取海底反射相位, 然后再反演海底反射幅度, 最后将反演结果用于同海区的爆炸声声场预报, 预报结果和试验测量相比, 相对误差均小于 10%. 根据本文建立的噪声场垂直相关模型提取小掠射角海底反射参数, 不需要限定特定的海底模型, 反射损失中还包括界面散射的影响, 可以有效地预报声场.

关键词 浅海环境噪声, 垂直相关, 海底反射, 反演, 声场预报

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi, 43.30.Nb, 43.30.-k

浅海环境噪声是海洋中的背景声场, 在传播过程中会携带海面和海底的相关信息, 特别是, 噪声场垂直相关函数相对稳定, 随海况变化较小, 用于提取海底声学参数, 不需要复杂的发射设备, 试验条件简单. 对噪声场相关的研究, 最早可追溯到 1973 年, Cox^[1]将空间相关性分析用于环境噪声研究. Jensen 等人^[2]在 1980 年提出经典的海洋环境噪声模型, 给出简单的噪声场相关系数公式, 具有历史性突破. 之后, Buckingham 和 Carbone 等人^[3,4]对噪声场进行简化, 并用噪声场垂直相关性获取海底声学参数. Harrison 等人^[5,6]由噪声场相关函数探测海底沉积层剖面结构. He 等人和 Li^[7,8]考虑离散分布的船只对噪声场相关系数的影响, 建立了航道附近的噪声场模型, 并用于解释试验现象. Siderius^[9]根据海面噪声的

相关系数及噪声垂直能量分布获取海底反射系数. 利用海洋中广泛存在的环境耀获取海底参数, 隐蔽性好, 更为简便, 近年来, 此项技术得到了很好的重视^[10,11].

目前的海洋环境噪声场建模, 都是基于给定的海底密度、声速、衰减、分层等确切信息进行的. 然而, 要给出这些参数有一定的难度, 特别是, 中国近海海底地形复杂, 获取详尽的海底地声参数异常困难. 本文分析了远场离散谱和近场连续谱在噪声场垂直相关中的贡献, 将海底反射对噪声垂直相关的影响归结为 P 和 Q 两个参数, 提出一种新的噪声场垂直相关模型. 该模型不需要考虑海底的声速、密度及衰减信息, 而且还可以将海底界面散射归纳在参数中, 便于理论分析声场. 本文对某海域噪声数据进行

引用格式: 殷宝友, 尚尔昌, 马力, 等. 浅海环境噪声垂直相关提取海底反射参数. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 741-748

Yin B Y, Shang E C, Ma L, et al. Extracting bottom reflection parameters from the vertical correlation of ambient noise in shallow water (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 741-748, doi: 10.1360/132010-1032

处理, 拟用噪声场垂直相关反演 P 和 Q . 鉴于二者之间可能存在一定耦合, 提出分步反演的方法, 提取该海域的海底反射参数, 并用于同海区的爆炸声声场预报, 试验测量的声压随深度分布曲线与预报结果相比, 相对误差不超过 10%. 本文所提出的海洋环境噪声反演海底反射参数为快速获取海底声学特性提供了一种新的实践.

1 噪声场垂直相关函数的传统计算

假设海面噪声源相互独立, 位于海面之下一个平行于海面的无限大平面上, 满足泊松时空分布. 如图 1 所示, 对于海面上一任意小面元 dA , 两个垂直布放的水听器间的互谱密度可以表示为^[1]

$$dS_{12}(\omega) = 2\nu q^2 G(r, \omega, z_1) G^*(r, \omega, z_2) dA, \quad (1)$$

其中 ν 为单位面积噪声源密度, q 为噪声源强度, G 为格林函数, $*$ 表示复共轭.

图 1 海洋环境噪声分布示意图

Figure 1 Configuration for ambient noise sources distributing.

假设海洋环境与方位无关, 两个水听器接收到的无限大海面噪声场的互谱密度为

$$S_{12}(\omega) = 4\pi\nu q^2 \int_0^\infty G(r, \omega, z_1) G^*(r, \omega, z_2) r dr. \quad (2)$$

引入无量纲角频率为

$$\Omega = \omega d / c_0, \quad (3)$$

式中 d 和 c_0 分别为水听器垂直间距、声速. 互谱密度改写成无量纲角频率的函数, 然后归一化, 得到噪声

场宽带垂直相关系数:

$$C(\Omega) = \frac{S_{12}(\Omega)}{\sqrt{S_{11}(\Omega) S_{22}(\Omega)}}. \quad (4)$$

如图 2 所示, 50 m 深的 Pekeris 波导, 声速为 1528 m s^{-1} , 其下边界为液态半空间, 声速为 1615 m s^{-1} , 密度为 1.74 g cm^{-3} , 衰减为 $0.42 \text{ dB}/\lambda$. 分别计算噪声场近场、远场及总声场的垂直相关函数, 如图 3 所示. 对于低损失液态海底, 大掠角的海底反射损失较大, 因此, 近场连续谱的贡献很小, 海底对风关噪声场垂直相关的影响主要是小掠角部分^[2,3]. 从图 3 中可以看出噪声场远场垂直相关函数和总声场几乎吻合, 近场对噪声场垂直相关的贡献非常小.

图 2 Pekeris 波导环境参数

Figure 2 Environmental parameters for the Pekeris waveguide.

图 3 噪声场垂直相关系数

Figure 3 Vertical correlation for ambient noise field.

也就是说, 在计算海洋环境噪声垂直相关函数时, 可以忽略近场连续谱的贡献, 用远场离散谱近似表示噪声场垂直相关. 由简正波理论, 格林函数可以表示为一系列离散谱的形式为

$$G(r, z_r) = i\pi \sum_n \psi_n(z_r) \psi_n(z_s) H_0^1(\gamma_n r), \quad (5)$$

噪声场的互谱密度可以表示为^[4]

$$S_{12} = 16\pi\nu q \sum_n \psi_n(z_1) \psi_n(z_s) \sum_m \psi_m^*(z_2) \psi_m^*(z_s) \times [\ln(\gamma_n / \gamma_m^*) - i\pi] / [\gamma_m^{*2} - \gamma_n^2], \quad (6)$$

其中 ψ 为本征函数, γ 为本征值, 包括传播波数 k 和衰减系数 β 两部分 (k 和 β 为实数):

$$\gamma_n = k_n + i\beta_n, \quad (7)$$

即得到浅海环境噪声场垂直相关系数的简正波形式.

2 小掠射角海底反射对噪声场垂直相关的控制

第一节的仿真结果表明: 垂直相关系数主要是远场离散谱的贡献, 小掠射角的海底反射特性十分重要. 本文引入一个简单的参数化模型来描写海底反射损失随掠射角变化的基本特征^[12]:

$$-\ln |V(\theta)| = Q\theta, \quad (8)$$

$$\phi_b(\theta) = \arg V(\theta) = -\pi + P\theta, \quad (9)$$

其中 P 和 Q 两个参数分别是海底界面反射相移和反射损失的表征参数. 对于 Pekeris 波导, P 和 Q 分别表示为

$$P = 2(\rho_0 / \rho_b) / [1 - (c_0 / c_b)^2]^{1/2}, \quad (10)$$

$$Q = 2\eta(\rho_b / \rho_0)(c_0 / c_b)^2 / [1 - (c_0 / c_b)^2]^{3/2}, \quad (11)$$

$$\eta = K_b c_b / (2\pi \times 8686), \quad (12)$$

其中 K_b 为衰减系数 ($\text{dB kHz}^{-1} \text{m}^{-1}$).

海水层中的本征函数可以表示为^[13,14]

$$\psi_m(H) = (2 / H_{\text{eff}})^{1/2} \sin[m(H / H_{\text{eff}})], \quad (13)$$

其中

$$H_{\text{eff}} = H + \Delta H = H + P / (2k_0), \quad (14)$$

相应的频散方程可以表示为

$$H_{\text{eff}}(k_0^2 - k_m^2)^{1/2} = m\pi. \quad (15)$$

这样, 本征函数可以表示为

$$\psi_m(H) = (2 / H_{\text{eff}})^{1/2} \sin(\theta_m P / 2), \quad (16)$$

其中

$$\theta_m = \cos^{-1}[1 - k_m^2 / k_0^2]^{1/2}. \quad (17)$$

对于一般波导, 利用 WKB 近似可以得到频散方程. 当水层 z_r 深度处有一个反转点时, 频散方程为

$$2 \int_{z_r}^H [k^2(z) - k_m^2]^{1/2} dz - \pi / 2 - \arg V(\theta_m) = 2m\pi, \quad (18a)$$

当水层中无反转点时, 频散方程为

$$2 \int_0^H [k^2(z) - k_m^2]^{1/2} dz - \pi - \arg V(\theta_m) = 2m\pi. \quad (18b)$$

对应的本征函数分别为

$$\psi_m(H) = 2[k_m / (D_m + \delta_m)]^{1/2} [k_0^2(H) + k_m^2]^{-1/4} \times \sin \left[\int_{z_r}^H [k_0^2(z) + k_m^2]^{1/2} dz + \pi / 4 \right], \quad (19a)$$

$$\psi_m(H) = 2[k_m / (D_m + \delta_m)]^{1/2} [k_0^2(H) + k_m^2]^{-1/4} \times \sin \left[\int_0^H [k_0^2(z) + k_m^2]^{1/2} dz \right], \quad (19b)$$

浅海均匀层中的简正波指数衰减系数可以表示为

$$\beta_m = -\ln |V(\theta)| / (D_m + \delta_m), \quad (20)$$

其中 D_m 为声线跨度, δ_m 为海底反射相移:

$$D_m = 2 \int_0^H \{k_m / [k^2(z) - k_m^2]\}^{1/2} dz, \quad (21)$$

$$\delta_m = (\partial / \partial k_m) \phi_b. \quad (22)$$

因此, (4) 式可以表示为

$$C(\Omega, P, Q) = \frac{S_{12}(\Omega, P, Q)}{\sqrt{S_{11}(\Omega, P, Q) S_{22}(\Omega, P, Q)}}. \quad (23)$$

在本节, 用 P 和 Q 两个参数表征了小掠角海底反射特征, 给出小掠射角海底反射条件下, 简正波声场中的本征值和本征函数, 从而海底反射对噪声场垂直相关函数的控制可以用 P 和 Q 来描述, 以上方法记为 PQ 法.

对于图 1 所示的 Pekeris 波导环境, 由(10)~(12)式计算得到: $P=10.7$, $Q=1.15$. 第 1 节介绍的传统方法和本节引入的 PQ 法分别计算噪声场垂直相关函数, 如图 4 所示.

可以看出, 两种方法计算的垂直宽带相关函数随无量纲角频率的变化几乎一致, 从而验证了本文采用 PQ 法计算噪声场垂直相关函数与传统方法精度相近, 然而, PQ 法可以不用考虑选取特定的海底模型, 只需要设定 P 和 Q 两个参数就可以近似表征海底反射特性. 此外, 在实际水声传播过程中往往涉及海底、海面两个起伏不平整表面, Q 中还可以纳入粗糙表面的散射损失, 考虑 Eacc 微扰理论的散射后, 可将小掠角反射损失表示如下^[15]:

$$-\ln |V(\theta)| = [Q_0(\rho, c, K_b) + Q_1(f, \sigma)]\theta, \quad (24)$$

其中 Q_0 项代表瑞利损失, Q_1 代表散射损失, 依赖于

具体的粗糙度谱函数, f 为频率(kHz), σ 为起伏表面的方差(m).

图4 传统方法与 PQ 法比较

Figure 4 Comparison for conventional and PQ method to calculate noise vertical correlation.

3 噪声试验分析及海底参数反演

研究表明^[4,16]: 噪声场垂直相关函数在较长时间内相对稳定, 随海况变化很小; 在浅海, 海底声学参数对噪声场垂直相关影响很明显. 因此, 可以用垂直相关函数反演海底声学参数. 本文利用某次海试测量的噪声垂直相关系数提取表征小掠角海底反射的相移和幅度的参数.

3.1 噪声试验过程

试验选在某海域浅水区, 平均海深约为 37 m, 接近水平不变海底, 平均声速剖面如图 5 所示, 10~15 m 范围内有较强的跃层. 试验期间, 海况良好, 风速在 $2\sim 5\text{ m s}^{-1}$ 左右. 特别是, 试验选在禁渔期, 船只较少, 可以将采集的噪声近似看成海面风关噪声.

试验布放了自动记录式的水听器垂直线列阵, 用于采集噪声数据, 我们选取其中两个间距为 1 m 的阵元, 距离海面的深度分别为 19.5 和 20.5 m, 位于跃层之下的等温层内.

3.2 反演方法

下面扼要介绍海底声学参数的反演方法. 待反演的参数有 P 和 Q 两个, 采用不同深度水听器之间的噪声互谱密度的理论值 S_s 与试验值 S_t 的均方差为代

价函数:

$$\text{cost} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N |S_s(\Omega_n, P, Q) - S_t(\Omega_n)|^2}, \quad (25)$$

其中 N 为无量纲角频率的个数.

图5 试验期间平均声速剖面

Figure 5 Mean sound speed profile during the experiment.

本文选择在匹配场反演中广泛应用的自适应单纯形模拟退火算法(ASSA)^[17]实现最优参数 P 和 Q 的最优值求解. 自适应模拟退火算法结合模拟退火和单纯形下降法两种方法的优点, 具有很强的全局优化搜索能力, 速度快, 鲁棒性较好.

此外, 参数反演结果的有效性分析是优化反演步骤中的重要环节. 根据贝叶斯理论^[18], 反演结果的不确定性可以由后验概率分析. 本文采用吉布斯采样来实现后验概率的估计.

将多次反演统计平均, 得到最优值为: $P=8.04$, $Q=0.93$. 图 6 给出参数 P 和 Q 的一维和二维后验概率分布, 其中下边和左边的图分别为 P 和 Q 的一维后验概率分布. 左图的纵坐标和下图的横坐标是相应的搜索区间, 虚线位置对应参数反演结果的最优值. 从图 6 中的二维后验概率分布中的条带可以看出 P 和 Q 之间存在一定程度的参数耦合, 当参数 P 增加或减小时, 参数 Q 也增加或减小, 不同的参数组合对应的代价函数值近似相等. 参数耦合会导致参数反演结果的不确定性增大, 具体可表现为最大一维后验概率对应的参数值与反演最优值不一致(如 P)、一维后验概率分布曲线相对较平(如 Q).

为了有效地确定海底参数, 本文提出分步反演方法, 具体的方法为: 先得到参数 P , 然后反演参数

Q . 参数 P 与海底反射临界角有如下关系^[14]

$$P = \pi/\theta_c. \quad (26)$$

因此, 只要确定了临界角 θ_c , 就可以得到参数 P . 有两种方法可以由浅海环境噪声场垂直相关函数获取临界角.

图 6 P 和 Q 反演结果的一维和二维后验概率分布

Figure 6 1D and 2D marginal probability distributions for P and Q inversion results.

第一种, 曲线拟合法. Buckingham^[3]给出噪声场的垂直相关函数的半经验公式:

$$C_{sv}(\Omega) = b \frac{\sin \Omega}{\Omega} + (1-b) \frac{\sin(\Omega \sin \theta_c)}{\Omega \sin \theta_c}, \quad (27)$$

式中未知数为 b 和 θ_c , 用(27)式去试验获取的噪声垂直相关曲线拟合, 使得(27)式给出的曲线与试验曲线的最小均方差最小, 就可以确定 b 和海底临界角 θ_c . 此方法仅适应于 0 到过零点(垂直相关系数与 0 的交点)之间.

将(27)式与噪声垂直相关试验曲线进行拟合, 可以得到临界角 $\theta_c=24.91^\circ$, 从而得到 $P=7.224$, 利用(25)式, 只反演参数 Q , 得到 $Q=0.96$. 把曲线拟合、反演最优值计算的垂直相关函数与试验测量值比较, 如图 7 所示. 可以看出, 当无量纲角频率小于 3 时, 也就是第一个过零点之前, 三者吻合的较好; 随着无量纲角频率增大, 由直接反演得到的参数计算垂直相关比试验值偏小, 垂直相关系数半经验的拟合曲线比试验值有显著的差别, 可见随着频率升高, 曲线拟合法不再适应.

第二种, 公式近似方法. 将垂直相关函数在角频率 Ω 范围内 N 等分采样, 记第一个频率点为 Ω_0 ,

图 7 比较反演结果及曲线拟合计算的

垂直相关与试验测量值的差异

Figure 7 Comparison for measured vertical correlation and simulated results by inverted and curve fitting parameters.

求和:

$$S_N = \sum_{n=1}^N C(n\Omega_0). \quad (28)$$

将(26)式代入上式中, 并使用伯努利近似, 得到:

$$(2S_N + 1) \frac{\Omega_0}{\pi} = b + \frac{1-b}{\sin \theta_c}, \quad (29)$$

并记

$$X = (2S_N + 1)\Omega_0/\pi, \quad (30)$$

X 可由试验数据直接获得.

当 $\Omega=\pi$, 相当于两个水听器间距为半个波长, 噪声场各项同性部分为 0, (26)式变为

$$C(\pi) = (1-b) \frac{\sin(\pi \sin \theta_c)}{\pi \sin \theta_c}, \quad (31)$$

(29)和(31)式联立, 消去 b , 得到:

$$\frac{\sin(\pi \sin \theta_c)}{1 - \sin \theta_c} = \frac{\pi C(\pi)}{X} - 1. \quad (32)$$

因此, 因此只要得到 X 和 $\Omega=\pi$ 时噪声场垂直相关的试验测量结果, 就可以通过解牛顿方程求得海底反射临界角 θ_c , 进而得到参数 P .

按照上述公式近似的方法, 利用试验测量的噪声场垂直相关, 得到 $\theta_c=20.40^\circ$, $P=8.82$, 进而只反演一个参数 Q , 得到 $Q=1.053$.

比较反演法、曲线拟合、公式近似三种方法得到的 P 和 Q , 结果相近, 说明 3 种方法在某种程度上都可以获取海底参数, 但相比之下, 曲线拟合和公式近

似法由于仅反演参数 Q , 速度较快. 值得注意的是, 在高频时, 垂直相关函数的试验结果和曲线拟合结果相差较大, 可能 P 和 Q 与频率之间存在某种非线性关系^[19].

3.2 爆炸声声场预报

在噪声测量间隔, 同一海区还进行了爆炸声传播试验. 传播试验过程中, 接收船抛锚不动, 船舷悬 29 元垂直接收阵, 阵元间距为 1 m, 位于 2.5~30.5 m 的水层中. 发射船在航行过程中不断投放爆炸声源. 本文选取距离接收阵分别为 4.07 km 的爆炸声源, 传播试验反演结果^[20]给出其深度约为 13.3 m.

数值仿真的声压公式为

$$\phi(r, z) = \frac{1}{\sqrt{8\pi r}} \left| \sum_{m=1}^M \psi_m(z) \psi_m(z_s) \frac{\exp[i(\gamma_m r - \pi/4)]}{\sqrt{k_m}} \right|. \quad (33)$$

为了方便表示, 将声压的幅值沿深度归一化(除以最大值). 将直接反演和分步反演(包括曲线拟合和公式近似)得到的 P 和 Q , 用于预报爆炸声归一化声压随深度的变化, 以频率为 380 Hz 为例, 如图 8 所示. 3 种预报方法得到的声压幅值随深度的分布趋势一致, 大致吻合. 引入曲线相关系数描述两条曲线 $g(x)$ 和 $h(x)$ 的相似程度为

$$\text{Simi} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N [g(x_n) - h(x_n)]^2}, \quad (34)$$

其中 N 为 x 的采样点数. Simi 取百分制, 越小表示两条曲线的误差越小.

与试验中垂直接收阵记录的声压幅值相比, 直接反演、公式近似和曲线拟合 3 种方法相关系数分别为: 7.344%, 6.997%, 7.256%, 相对误差均小于 10%. 特别是在靠近海底处, 试验测量和预报结果有明显的偏差. 出现误差的原因大致有两个: (i) 噪声源深度由传播反演结果给定, 本身可能存在一定误差; (ii) P 和 Q 可能与频率存在某种关系, 而噪声场宽带垂直相关反演仅能给出某频段的均值, 在某一频率上, 可能会与真实值存在偏差.

总之, 利用 3 种方法从噪声场垂直相关函数中提取 P 和 Q 两个参数, 各有优劣. 用于预报海洋声场, 在允许一定误差的情况下比较吻合, 特别是, 依本文的结果分析, 公式近似法获取参数快, 而且又不损失精度, 可以作为声场快速预报的一种方法.

图 8 三种方法得到的 P 和 Q 用于爆炸声传播预报

Figure 8 Explosive sound field prediction with parameters P and Q obtained by these three methods.

4 结论

数值仿真表明, 海洋环境噪声场垂直相关系数主要是远场离散谱的贡献. 本文建立了噪声场垂直相关系数和小掠射角海底反射特性的关系, 对某海区观测到的海洋环境噪声数据进行了分析, 分别用直接反演和分步反演两种方法, 得到了表征海底反射相移的参数 P 和表征反射损失的参数 Q , 并将两种方法用于同海域的爆炸声声场预报. 本文的主要结论总结如下:

(i) 由海洋环境噪声噪声场互谱密度直接反演 P 和 Q , 由于二者之间存在耦合, Q 的一维后验概率分布曲线相对较平, P 的反演最优值与最大后验概率不一致, 因此采用分步反演方法: 首先获得参数 P , 然后只反演参数 Q .

(ii) 曲线拟合法仅适应于低频时, 当频率较高, 曲线拟合与试验值存在较大的偏差; 经验公式近似法应用范围相对较广. 与直接反演法相比, 这两种方法提取海底参数速度较快, 还可以避免参数间的耦合.

(iii) 将反演的参数用于爆炸声试验预报. 比较同一频率下, 归一化声压随深度的变化的预报结果和试验值趋势相近, 相对误差不超过 10%.

(iv) 采用 PQ 法建立噪声场垂直相关模型, 可以将界面散射纳入到参数 Q 中, 亦可以将不确定的海底模型等效为 P 和 Q 两个参数描述, 与传统方法比, 相对简单, 又不失精度, 可以作为快速反演海底参数的一种方法.

致谢 感谢中国科学院水声环境特性重点实验室的参加本次试验的工作人员, 是他们的精诚合作、一丝不苟为本文提供了详实的试验数据. 同时, 作者衷心感谢审稿专家提出的宝贵修改意见, 使论文得以更加完善.

参考文献

- 1 Cox H. Spatical correlation in arbitrary noise field with application to ambient sea noise. *J Acoust Soc Am*, 1973, 54(5): 1289–1301
- 2 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. *Computational Ocean Acoustics*. 2nd. New York: AIP Press, 2001. 489–519
- 3 Buckingham M J, Jones S A S. A new shallow-ocean technique for determining the critical angle of the seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column. *J Acoust Soc Am*, 1987, 81(4): 938–946
- 4 Carbone N M, Deane G B, Buckingham M J. Estimating the compressional and shear wave speeds of a shallow water seabed from the vertical coherence of ambient noise in the water column. *J Acoust Soc Am*, 1998, 103(2): 801–813
- 5 Harrison C H, Simons D G. Geoacoustic inversion of ambient noise: A simple method. *J Acoust Soc Am*, 2002, 112(4): 1377–1389
- 6 Harrison C H. Sub-bottom profiling using ocean ambient noise. *J Acoust Soc Am*, 2004, 115(4): 1505–1515
- 7 He L, Li Z L, Peng Z H. Ambient noise near the sea-route. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52(1): 40–45
- 8 Li Z L, He L, Zhang R H. Vertical correlation of ambient noise at the ASIAEX site in the East China Sea. In: *Proceedings of the 1^{0th} Western Pacific Acoustics Conference*. Beijing, 2009
- 9 Siderius M. Acoustic remote sensing of the seabed using ambient noise. In: *Proceedings of the second international shallow-water acoustics conference*. Shanghai: AIP, 2010. 262–269
- 10 Lin J H, Yin B Y, Yi X J. A rapid method of estimating for sound speed in the upper seabed from ocean ambient noise (in Chinese). *Tech Acoust*, 2010, 29(6): 80–81 [林建恒, 殷宝友, 衣雪娟. 海洋环境噪声快速获取海底表层声速. *声学技术*, 2010, 29(6): 80–81]
- 11 Godin O A. Cross correlation fuction of acoustic fields generated by random high-frequency sources. *J Acoust Soc Am*, 2010, 128(2): 600–610
- 12 汪德昭, 尚尔昌. *水声学*. 北京: 科学出版社, 1981. 170–175
- 13 Shang E C, Gao T F, Wu J R. A shallow-water reverberation model based on perturbation theory. *IEEE J Oceanic Eng*, 2008, 33(4): 451–461
- 14 Wu J R, Shang E C, Gao T F. A new energy-flux model of waveguide reverberation on perturbation theory. *J Comp Acoust*, 2010, 18(3): 209–225
- 15 Shang E C, Zhou J X, Guan D H. Theoretical analysis of the boundary reflection loss and the parameter extraction at small grazing angles (in Chinese). *Acta Acust*, 1981, 6(5): 308–313 [尚尔昌, 周纪浚, 关定华. 小掠角边界反射损失理论分析及参数提取问题. *声学学报*, 1981, 6(5): 308–313]
- 16 Yin B Y, Lin J H, Yi X J, et al. Sensitivity of geoacoustic parameters to vertical coherence of ocean ambient noise (in Chinese). *Tech Acoust*, 2009, 28(3): 82–84 [殷宝友, 林建恒, 衣雪娟, 等. 海底参数对海洋环境噪声垂直相干的敏感性. *声学技术*, 2009, 28(3): 82–84]
- 17 Dosso S E, Wilmut M J, Lapinski A L S. An adaptive-hybrid algorithm for geoacoustic inversion. *IEEE J Oceanic Eng*, 2001, 21(3): 324–336
- 18 Jang Y M, Chapman N R. Quantifying the uncertainty of geoacoust parameter estimates for the New Jersey shelf by inverting air gun data. *J Acoust Soc Am*, 2007, 121(4): 1879–1894
- 19 Harrison C H. An approximate form of the Rayleigh reflection loss and its phase: Application to reverberation calculation. *J Acoust Soc Am*, 2010, 128(1): 50–57
- 20 Lu L C, Ma L. Geoacoustic inversions from experiment data in shallow water (in Chinese). *Tech Acoust*, 2008, 27(5): 56–57 [鹿力成, 马力. 浅海海底反演实验研究. *声学技术*, 2008, 27(5): 56–57]

Extracting bottom reflection parameters from the vertical correlation of ambient noise in shallow water

YIN BaoYou^{1*}, SHANG ErChang¹, MA Li¹ & LIN JianHeng²

¹Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190 China;

²Qingdao Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266023, China

A method is introduced to extract reflection characteristics at smaller angles from the vertical correlation of surface-generated noise in shallow water, since the relationship of the two is analyzed. By presenting the vertical correlations of the ambient noise data measured in one experiment in China, the geo-acoustics parameters are estimated. It is shown that these parameters are mutual coupled, therefore a segmentation inversion algorithm has been developed. The reflection phase shift is obtained according to curve fitting or empirical expressions, while the reflection energy is inferred subsequently. The simulation calculated using the inverted geo-acoustic parameters is in good agreement with the explosive sources measurement. There is a discrepancy of about 10% in the prediction values. It is effective for acoustic field prediction by extracting bottom reflection parameters from the noise vertical correlation. The advantage of using reflection parameters is not limited. In addition, it is simple and precision to predict acoustical field, as a result of containing interface scattering in the reflection loss.

ocean ambient noise, vertical correlation, bottom reflection, inversion, acoustical prediction

PACS: 43.30.Pc, 43.30.Wi, 43.30.Nb, 43.30.-k

doi: 10.1360/132010-1032