

基于环境噪声的浅海海底单参数反演

陈 勃^{1,2}, 赵 梅², 胡长青²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;
2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815)

摘要: 利用环境噪声反演浅海海底声学特性一直是学者们研究的热门课题之一, 目前绝大多数的噪声场建模方法依赖于多维海底模型, 而多维参数的求解过程加大了反演的复杂度。减少反演参数个数可以有效降低反演的复杂性, 提高反演的速度, 以此为目的开展了基于单个参数海底模型的噪声场建模研究, 并计算得到了基于海底单参数的噪声场空间相干系数表达式。通过与传统模型的对比, 验证了该计算模型的有效性。结合实验数据, 利用该模型对实验海域进行了海底单参数反演, 并结合海底反射临界角确定了实验海域的沉积物类型为粉砂质砂, 该结论与文献记载相吻合。

关键词: 环境噪声; 单参数; 海底反演; 底质分类

中图分类号: O427.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-02-0110-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.02.003

Single parameter inversion based on ambient noise in shallow sea

CHEN Bo^{1,2}, ZHAO Mei², HU Chang-qing²

(1. University of Chinese Academic of Science, Beijing 100049, China;
2. Shanghai Acoustic Laboratory, Chinese Academic of Sciences, Shanghai 201815, China)

Abstract: Geo-acoustic characteristics inversion based on ambient noise is one of the hot topics in underwater acoustics. At present, most of noise field modeling methods rely on multidimensional seabed models, which increases the complexity of the inversion process. In order to reduce the number of parameters and improve the inversion efficiency effectively, a study of noise field modeling based on single parameter is carried out, and the correlation expression of ambient noise is also derived based on the single parameter model. By comparison with the traditional model, the validity of this model is verified. Based on the experimental data, the seabed single parameter inversion is made and the sediment type in the experimental sea area is determined as silty sand, this conclusion is in good agreement with the documentary record.

Key words: ambient noise; single parameter; geo-acoustic inversion; sediment classification

0 引 言

环境噪声作为海洋中的背景声场, 无时无刻不存在于海洋环境中, 环境噪声在传播过程中, 不断与海底海面发生接触, 携带有大量的海底信息, 因此, 利用环境噪声去反演海底信息成为了可能。Cox^[1]在上世纪 70 年代开始对海洋环境噪声相关性进行研究, 推导了噪声场中相关性的理论表达式并与实验数据吻合较好; Kuperman 和 Ingeito^[2]利用波动理论建立了海洋环境噪声场模型, 即 KI 模型, 假设噪声源为随机均匀分布在海面以下无限大平面

上的单极子源, 同时考虑了连续谱和离散谱的贡献, 可以相当准确地描述噪声场性质, 但计算速度较慢; Buckingham^[3]利用简正波模型, 忽略近场连续谱的贡献, 得到了噪声场模型的数学表达式; Harrison^[4-5]利用射线方法, 将声速剖面、噪声源深度等海洋环境中的多种影响作为输入参数, 建立了噪声场的射线模型, 该模型计算速度快, 但缺乏大量实验数据的验证; T.C.Yang 等^[6]对 Buckingham 的方法进行了改进, 在大掠射角处采用波束积分的方法进行计算, 提高了模型的精度; Siderius 等^[7-8]利用垂直阵列得到噪声场竖直方向上的相关信息, 并由此反演海底的分层情况, 并通过大量实验数据对反演结果进行了验证。

传统的噪声场建模方法, 需要确切的海底信息作为输入参数, 这些海底信息包括海底的声速、密度、衰减系数等, 若考虑分层海底的情况, 还需输入各层海底厚度及各层对应的声学参数, 这些参数

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2018-02-10

基金项目: 上海市扬帆计划资助项目(15YF1414900)

作者简介: 陈勃(1991—), 男, 河南洛阳人, 回族, 博士在读, 研究方向为海洋环境噪声。

通讯作者: 胡长青, E-mail: hchq@mail.ioa.ac.cn

获取困难，同时也使得模型变得复杂，若使用匹配场技术进行海底反演，过多的待反演参数也会使传统的优化算法难以收敛到全局最优解。本文将一种简化的海底反射模型运用到噪声场建模中，以单参数 F_{db} [9-10] 描述海底反射损失，该参数对于不同类型的海底敏感，可用于快速海底底质分类研究。基于单参数的噪声场模型，不仅可以简化反演过程，做到快速反演，同时由于模型将多个海底声学参数简化为一个单参数 F_{db} ，也在一定程度上规避了海底多参数之间的耦合及敏感性问题。本文首先计算得到了基于单参数的噪声场模型空间相干系数表达式，随后通过仿真和实验数据开展了基于环境噪声的浅海海底单参数反演研究。

1 理论计算

1.1 单参数浅海海底模型

本文中假设海底为一液态半无限大海底，这一海底模型，也称作瑞利模型。瑞利模型通过海底声速、密度和衰减系数三个参数来描述一个均匀且存在吸收的半无限海底。这种模型虽然简单，但却在浅海传播问题上有很好的适用性，适用于大范围快速的海底反演。图 1 给出了三种典型沉积物下反射损失的计算结果，可以看到，在小掠射角区域，即临界角以下，反射损失与掠射角之间近似于线性关系，而大于掠射角之后，反射损失骤增并逐渐趋近于一个常数。在考虑浅海传播问题时，声在传播过程中会与海底有多次接触，大掠射角区域因为传播损失过大，在多次反射后对于声场的影响就可以忽略，因此在一定距离后对于声场起主要贡献的为小掠射角下的声波。

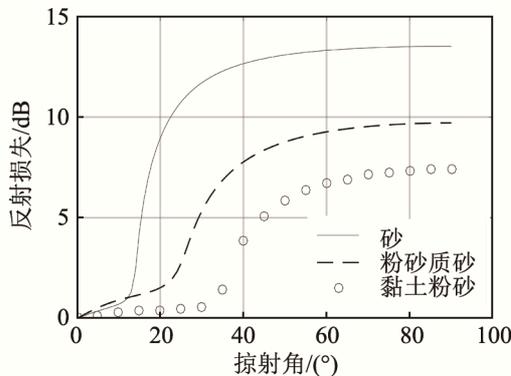


图 1 三种不同底质的海底反射损失

Fig.1 Seabed reflection losses of three different types of sediments

在液态半无限大海底的假设下，声波入射到海底的反射系数可以通过海底声速、密度以及衰减系

数表示：

$$V = \frac{Z - Z_w}{Z + Z_w} \quad (1)$$

其中， Z 和 Z_w 分别代表海底和海水的声阻抗。小掠射角下，海水中的声阻抗表示为

$$Z_w = \frac{\rho_w c_w (1 + \beta_w i)}{\theta} \quad (2)$$

其中： ρ_w 为海水密度； c_w 为海水声速； β_w 为海水的损耗因子； θ 代表掠射角，即声波入射方向与海底的夹角。声波在海水中的衰减通过为声速添加一虚部的形式体现，在浅海、低频这两个前提下，海底声吸收要比海水中大得多，因此往往可以忽略 β_w 的影响。同理，海底的声阻抗表示为

$$Z = \rho c (1 + \beta i) \csc \theta \quad (3)$$

根据 Hamilton 的假设，海底密度 ρ 和海底中声速 c 均不随频率变化， β 是海底的损耗因子， $\csc \theta$ 为掠射角的余割函数。损耗因子与声衰减系数 α (dB/ λ) 的关系为

$$\beta = \frac{\alpha}{40\pi \lg e} \quad (4)$$

海底反射损失 BL 写作：

$$BL = 10 \lg(1 - V^2) \quad (5)$$

将公式(1)、(2)、(3)代入式(5)得：

$$BL = 40 \lg e \cdot \left(\frac{c_w}{c}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \frac{\beta \theta}{(1 - (c_w/c)^2)^{3/2}} \quad (6)$$

由于小掠射角下反射损失随掠射角的增加近似呈线性增长，定义单参数 F_{db} 为海底反射损失随掠射角的变化率，认为它是一个常数，则海底反射损失 BL 可以表示为

$$BL = F_{db} \cdot \theta \quad (7)$$

联立公式(6)和公式(7)，可以得到单参数 F_{db} 的表达式

$$F_{db} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{c_w}{c}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \frac{\alpha}{(1 - (c_w/c)^2)^{3/2}} \quad (8)$$

将反射能量损失写成指数形式，即

$$|V|^2 = \exp(-F\theta) \quad (9)$$

单参数的分贝形式 F_{db} 和指数形式 F 之间的换算关系式为

$$F = \frac{F_{db}}{10 \lg e} \quad (10)$$

至此，我们得到了单参数的表达式。该参数与海底的声速、密度以及衰减系数有关，可以看作小掠射角下反射损失曲线的斜率。单参数海底模型是对传统海底模型的一种简化，利用这一海底模型进行反演可以提高反演效率，但需要指出的是，由于在单参数推导过程中没有考虑切变波的影响，在处

理非常“硬”的海底时，切变波引起的反射损失影响增大，此时模型误差会增大。基于单参数进行海底反演的方法在文献[9]和文献[10]中有涉及，反演取得了较好的效果。

1.2 浅海环境噪声场空间相干系数表示

本文中考虑的噪声来源主要为风成噪声，风成噪声顾名思义由海面风作用产生，当风吹过海面时，海面形成无数个随机分布的海浪，海浪落下破碎形成的声音即为风成噪声。假设这些噪声源之间相互独立，位于一个海平面以下且靠近海平面的无限大平面上，如图 2 所示。浅海环境由海水层和海底构成，噪声源位于海平面以下 z' 处。

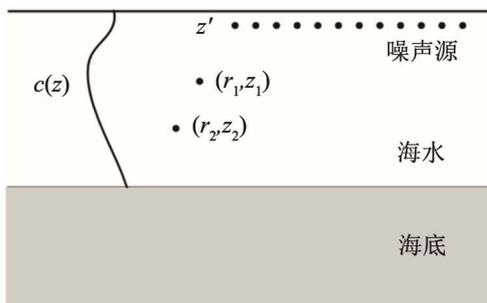


图 2 海面噪声源分布示意图
Fig.2 Noise source distribution on the sea surface

噪声场的空间分布特征用 (r_1, z_1) 点的声场与 (r_2, z_2) 点声场的互谱密度 S_{12} 表示，当两个声场的声源在同一位置时，简化为局部的声场强度。这种利用互谱密度表示的噪声场的空间特性，可以通过水听器阵测量出来，这为随后的反演提供了基础。若把海面看作一个极坐标系，用 r, ϕ 表示，那么互谱密度写作：

$$S_{12} = q \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \psi(r_1, z_1) \psi^*(r_2, z_2) g^2(\theta_s) r dr d\phi \quad (11)$$

式中： q 代表单位面积的噪声源强度； $g(\theta_s)$ 为噪声源的指向性； θ_s 为出射角。由于噪声源靠近海表面，且海表面看作是一软边界，因此，噪声源指向性一般认为与偶极子指向性相同，即 $g(\theta_s) = |\sin \theta_s|$ 。 $\psi(z_n, r_n)$ 代表第 n 处接收点的声压，结合射线理论，式(11)进一步写作：

$$S_{12} = 2\pi q \int_0^{\pi/2} \frac{e^{-\alpha s_p} + V_b(\theta_b) e^{-\alpha(s_c - s_p)}}{1 - V_b(\theta_b) e^{-\alpha s_c}} \times \cos \theta_r |\sin \theta_s| e^{iku \cos \zeta} d\theta_r \quad (12)$$

式中， θ_r 和 θ_b 分别代表接收角和海底反射角； S_c 和 S_p 分别代表完成一次声循环的距离和声源不经海底反射到达接收点的声传播距离； V_b 代表海底反射系数。两个水听器接收到的噪声信号是存在相位差的，这一相位差写做 $ku \cos \zeta$ ， u 代表相邻接收水听

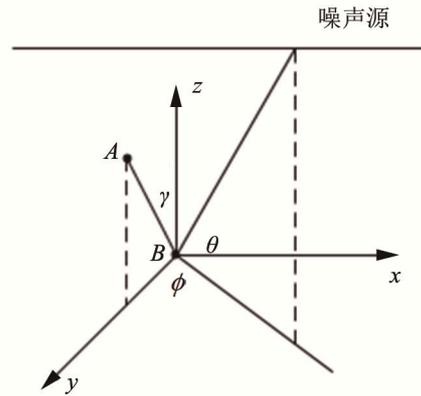


图 3 水听器 A、B 几何分布示意图
Fig.3 Geometric distribution of hydrophone A and B

器之间的距离。结合图3的几何关系，相位差表示为

$$\cos \zeta = \sin \theta_r \cos \gamma + \cos \theta_r \sin \gamma \cos \phi \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)，进一步化简，得到：

$$S_{12} = 2\pi q \int_0^{\pi/2} \frac{e^{-\alpha s_p} + V_b(\theta_b) e^{-\alpha(s_c - s_p)}}{1 - V_b(\theta_b) e^{-\alpha s_c}} \cos \theta_r \times |\sin \theta_s| e^{iku \sin \theta \cos \gamma} J_0(ku \cos \theta \sin \gamma) d\theta_r \quad (14)$$

结合公式(9)，用单参数的形式表示海底反射系数，并且对公式(14)进行归一化处理，得到最终的噪声场空间相干系数表达式为

$$C(F_{dB}) = \frac{S_{12}(F_{dB})}{\sqrt{S_{11}(F_{dB}) S_{22}(F_{dB})}} \quad (15)$$

结合上述推导，得到了单参数模型下，噪声场的空间相干系数的计算方法。

2 数值仿真

2.1 与传统模型对比

仿真采用 100 m 深的 Pekeris 波导，声速为 $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，下方海底看作一无限大液态半空间，其中的声速为 $1800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，密度为 $1.80 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，衰减系数为 $0.5 \text{ dB}\cdot\lambda^{-1}$ ，一对接收水听器位于水下 50 m 处，计算频率为 500 Hz。在本节中利用传统模型与单参数模型下计算得到的噪声场垂直相关性进行对比。其中传统的计算模型采用 Harrison 的射线模型，利用射线理论得到噪声源和接收点间的格林函数，并同样利用互谱密度来表示噪声场中两点间的空间相干系数。计算结果如图 4 中的实线所示，图 4 中的圆圈线代表单参数模型下的计算结果。其中横坐标 Ω 为一无量纲数，表示为 $\Omega = \omega u / c$ 。由图 4 可以看出，两种方法下得到的空间相干系数的变化规律一致，由此验证了本文采用的单参数方法计算噪声场空间相干系数的准确性。

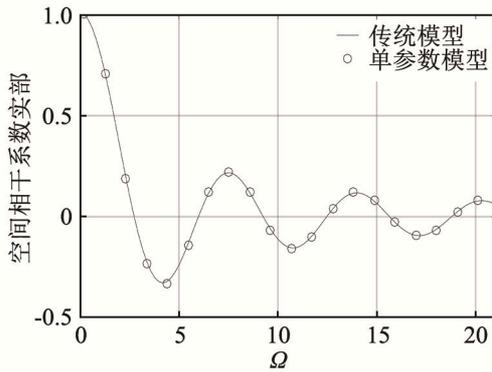


图 4 传统模型下和单参数模型下浅海环境噪声场空间相干系数比较
Fig.4 Comparison of ambient noise field correlation between traditional model and single parameter model

2.2 敏感性分析

不同的海底沉积类型可以通过其物理属性进行判定，其中中值粒径^[11]是最为常用的参数之一。利用中值粒径进行分类最具代表性的标准是 Shepard 的砂-粉砂-黏土分类。Hamilton^[12]根据 Shepard 的分类方法，结合大量的实验数据，得到了大陆台地海洋环境下海底声速和密度与中值粒径 M_z 的经验公式：

$$\rho_2 = 2.374 - 0.175M_z + 0.008M_z^2 \quad (16)$$

$$c_2 = 1952.5 - 86.26M_z + 4.14M_z^2 \quad (17)$$

式(16)、(17)中， ρ 和 c 分别代表海底的密度和声速，中值粒径 M_z 可以有效反映海底沉积物的平均粒度值，单位： φ ， $\varphi = -\log_2 d$ ， d 为粒子的直径(mm)。通过中值粒径可以区分海底沉积物的类型，对海底进行分类。将式(16)和式(17)代入式(8)中，若把海水中的声速和密度看作固定常数，此时便可以将单参数 F_{db} 写成中值粒径 M_z 和衰减系数 α 的函数。图 5 中的四条曲线代表了衰减系数(dB/λ)分别为 0.2(虚点混合)、0.4(点线)、0.6(虚线)和 0.8(实线)时，单参数 F_{db} 随中值粒径 M_z 的变化规律。不同的中值粒径代表了不同的海底沉积类型，随着中值粒径的增大，单参数呈近似指数规律上升，说明单参数 F_{db} 对于不同的海底类型是敏感的，通过反演海底单参数去探究海底特性并进行底质分类工作是可行的，同时单参数与衰减系数之间也存在正比关系。值得指出的是，在实际海底沉积情况下，中值粒度与衰减系数之间也存在一定的耦合关系，衰减系数通常通过下式计算得到：

$$\alpha = K \cdot f^m \quad (18)$$

其中： f 是声音频率； K 是衰减因子，与海底类型有关； m 是近似线性关系的指数，具体大小存在争议，一般认为在 0.9~1.1 之间。

图 6 为三种不同底质类型下单参数模型计算

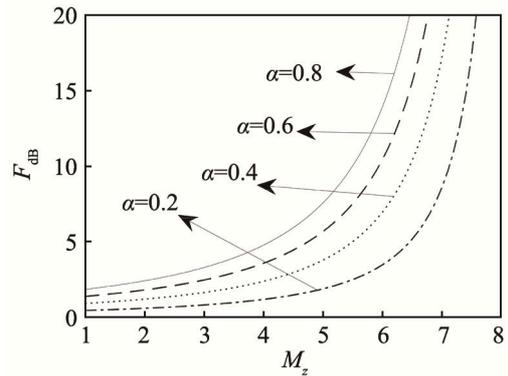


图 5 单参数 F_{db} 随中值粒径 M_z 以及衰减系数 α 的变化规律
Fig.5 The variations of the single parameter F_{db} with median particle size M_z and attenuation coefficient α

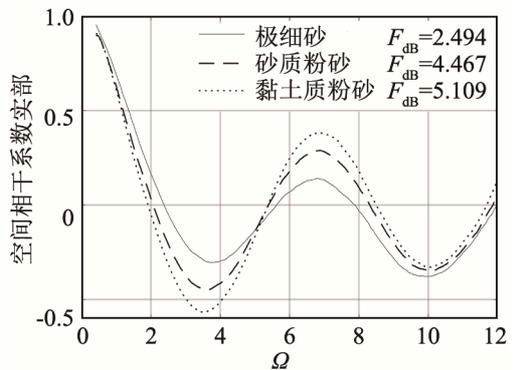


图 6 三种不同底质类型下单参数噪声场空间相干系数模型计算结果
Fig.6 Calculation results of the spatial correlation coefficient of ambient noise field for three different sediments

得到的噪声场空间相干系数。黏土质粉砂是最软的，因此其密度是最小，声波在其中的传播也最慢；粉质黏土的孔隙率比较大，声波在入射到这种底质上时，大部分穿透到海底，因此声波损失较多。这种影响体现在图 6 中，相干系数曲线振幅大，下降迅速；细砂型海底则与粉质黏土正好相反，在细砂型海底中，声速和密度都非常大，孔隙率很低，这种海底的反射系数较大，声波不容易透射，大部分入射的声波都反射回水体中，体现在相干系数曲线上为振幅相对较小，且下降缓慢；介于粗砂型海底和粉质黏土海底之间的是砂质粉砂型海底，它的声速、密度及孔隙率均处于中等水平，相干系数曲线的下降速度也处于中间，但可以明显区别于其他两种类型。从图 6 中不同单参数下的空间相干系数也再次印证了单参数对于不同的底质类型是敏感的。

3 实验研究

噪声场空间相干系数是浅海噪声场中相对稳定的物理量，其受海况变化影响较小，主要由海底特性决定。因此，可以利用噪声场的空间相干系数

来反演浅海海底特性。本文利用噪声场数据来反演实验海域的海底单参数,并确定海底沉积物的类型。

3.1 实验介绍

实验数据来自于某浅海海域环境噪声试验。实验期间海面风速为 $8\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,浪高 $1\sim 2\text{ m}$,海面可见白浪花,实验时间选在禁渔期,周围基本没有船只,因此噪声来源主要为风成噪声。实验海域水深 70 m ,地势较为平坦,声速剖面由温盐深仪(Conductance Temperature Depth, CTD)测得,如图7所示,剖面为典型的夏季浅海声速剖面,在 $25\sim 35\text{ m}$ 之间存在明显温跃层。实验采用8元水听器阵,各阵元之间间距 0.5 m ,全阵位于温跃层以下,阵中心在 45 m 深处,接收器工作频带为 $20\text{ Hz}\sim 20\text{ kHz}$,内置 20 dB 前置放大器。由于受海流的作用,水听器阵列在水下会发生倾斜,实验时在阵列的上、中、下三个位置处分别固定一个温深仪(Temperature and Depth, TD),用来计算阵列的倾斜角度。

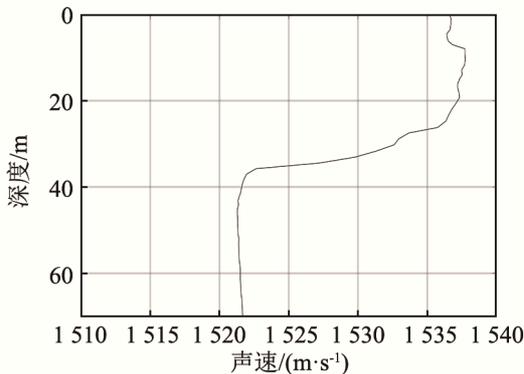


图7 实验海域声速剖面
Fig.7 Sound speed profile in experimental sea area

3.2 反演海底单参数

待反演参数为海底单参数 F_{dB} ,代价函数(Cost Function, CF)定义为实验中水听器间相干系数 $C_d(f)$ 与理论计算得到的水听器间相干系数 $C_l(f)$ 的均方差,表示为

$$C_f(F_{\text{dB}}) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N [C_d(F_{\text{dB}}) - C_l(F_{\text{dB}})]^2} \quad (19)$$

在第1节的理论推导中,空间相干系数可以通过单参数 F_{dB} 唯一表示,因此在式(19)中, C_f 也可以通过单参数 F_{dB} 来表示。实验数据选取 $100\sim 1800\text{ Hz}$ 频段内的环境噪声数据进行计算,相干系数通过水听器接收的噪声信号计算得到,取连续若干段相同长度的噪声信号,分别计算空间相干系数,然后取平均值,即得到这段时间内的噪声场空间相干系数。实验选取的一对水听器间隔为 1 m ,但该间距

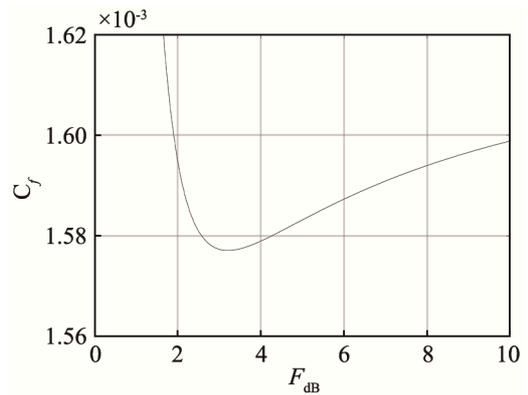


图8 代价函数随单参数的变化情况
Fig.8 The variation of cost function with the single parameter F_{dB}

并不能当作垂直间距进行计算,因为实验时阵列发生倾斜,水听器连线与垂直方向存在夹角。将多次反演结果平均,得到单参数 F_{dB} 的值为 3.3 。图8为代价函数随单参数的变化。

图9是反演曲线与实验曲线的对比情况,由图9可以看到实验曲线与反演曲线拟合较好,具有近似相同的过零点以及最低点。

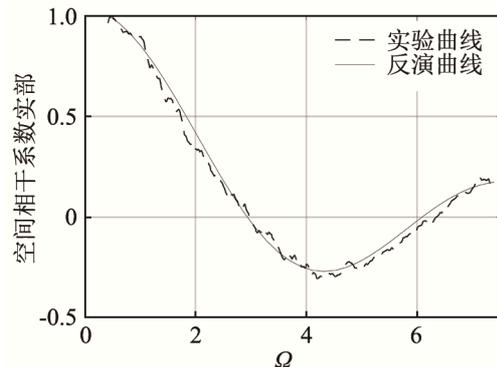


图9 反演曲线和实验曲线的对比
Fig.9 Comparison between inversion curve (solid line) and experimental curve (dashed line)

3.3 海底底质分类及反演结果验证

单参数虽然对于不同底质类型是敏感的,但是直接利用单参数 F_{dB} 的值确定海底类型却存在问题,表1给出了 300 Hz 下,8种高声速海底^[13]对应

表1 8种不同底质类型对应的基本参数
Table 1 Basic parameters of eight types of sediments

底质类型	中值粒径	衰减系数	单参数
砂	1.4517	0.8708	2.1245
细砂	2.5570	0.8879	3.1466
极细砂	3.3669	1.0411	4.9874
粉砂质砂	4.3026	1.1155	8.0519
砂质粉砂	4.5856	1.0659	8.9346
粉砂	5.2207	0.9286	11.330
砂粉砂黏土	6.0545	0.1854	3.8333
黏土质粉砂	7.2017	0.1475	10.219

的中值粒径、衰减系数以及单参数的值。由表 1 可以看到,随着中值粒径的增长,单参数的值并不呈线性变化,这主要是因为在中值粒径达到某一值后,随着中值粒径的增大,衰减系数开始单调递减,从而影响了单参数值的变化。

因此,若利用单参数去确定底质类型,还需借助其他参数值。在这里选取了海底反射临界角 θ_c ,由于大掠射角处噪声损失很快,对于噪声场空间相干性的贡献很小,因此在这里把大掠射角处的海底反射损失置为 1,即忽略大掠射角处噪声对于相干性的影响,那么式(7)重写为

$$BL = \begin{cases} F_{db} \cdot \theta, & \theta < \theta_c \\ 1, & \theta > \theta_c \end{cases} \quad (20)$$

这样噪声场空间相干系数即表示为单参数 F_{db} 和临界角 θ_c 的函数 $C(F_{db}, \theta_c)$,又由于斯奈尔定律:

$$\theta_c = \arccos \frac{c_1}{c_2} \quad (21)$$

因此,空间相干系数 $C(F_{db}, \theta_c)$ 进一步写做 $C(F_{db}, c_2)$ 的形式。同样利用噪声场相干系数的实验值与理论值的均方差函数作为代价函数再一次反演海底单参数 F_{db} 和海底声速 c_2 ,图 10 是反演结果的一维和二维后验概率密度,图 10 中左图为单参数 F_{db} 一维后验概率密度,搜索区间为 1 到 10,下图为海底声速 c_2 的后验概率密度,搜索空间为 1 500~2 500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,假设两个参数在先验空间中满足均匀分布,对多次反演结果进行平均,最优值为 $F_{db}=3.35$, $c_2=1\ 679\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从图 10 中可以看到单参数 F_{db} 的后验概率收敛情况较好,能够收敛到全局最优解处,而声速 c_2 的后验概率曲线较为平坦,原因在于单参数 F_{db} 和声速 c_2 之间存在一定程度的参数耦合,当声速 c_2 增加或者减小时,单参数 F_{db} 也会发生变化,参数耦合会增大反演结果的不确定性,导致声速 c_2 的一维后验概率密度收敛情况不好。

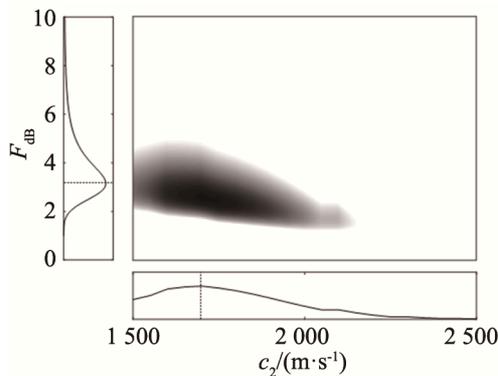


图 10 单参数和海底声速的一维和二维后验概率密度
Fig.10 One and two dimensional posteriori probability densities of the single parameter F_{db} and seabed velocity

将 $c_2=1\ 679\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 代入式(17),得到实验海域海底沉积物的中值粒径为 3.9,海底沉积物类型接近粉砂质砂,根据文献[14]记录,该处海域沉积物中值粒径在 4 左右,沉积物类型为粉砂质砂,本文的反演结果与实际情况符合较好。

4 结论

利用环境噪声反演浅海海底特性是一种被动探测手段,可以有效节约调查时间和成本,但是建立在多维海底模型上的反演方法,往往复杂性高,反演时间长。根据反演复杂性随着反演参数的个数减少而降低的原理,本文提出了一种建立在单个参数海底模型基础上的噪声场空间相干系数计算方法,有效地降低了反演的复杂性。为了验证该方法的可行性,本文通过仿真计算对比了空间相干系数在单参数模型下和传统模型下的计算结果,两者拟合较好。

另外,进一步观察单参数模型下噪声场的空间相干系数对于不同的海底类型的敏感性。结合某海试数据对实验海域的海底单参数进行了反演,该处海域单参数值为 $F_{db}=3.35$,结合海底反射临界角,进一步得到了该处海域的海底沉积物类型为粉砂质砂,与实际情况符合较好。该方法对于高声速海底类型的快速反演较为有效,但当海底沉积层较薄,基底对于反射损失影响较大时,单参数方法的适用性还有待进一步验证。

参 考 文 献

- [1] COX H. Spatical correlation in arbitrary noise field with application to ambient noise[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1973, 54(5): 1289-1301.
- [2] KUPERMAN W A, INGENITO F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 67(6): 1988-1996.
- [3] BUCKINGHAM M J. A theoretical model of ambient noise in a low-loss, shallow water channel[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 67(4): 1186-1192.
- [4] HARRISON. C. H. Formulas for ambient noise level and coherence[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 99(4):2055-2066.
- [5] HARRISON C. H. CANARY:A model of ambient noise, coherence and array response[J]. Applied Acoustics, 1997, 51(3): 289-315.
- [6] YANG T C, KWANG Y. Modeling the environmental influence on the vertical directionality of ambient noise in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1997, 101(5): 2541-2554.
- [7] SIDERIUS M, HARRISON C H, PORTER M B. A passive fathometer technique for imaging seabed layering using ambient noise[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 120(3): 1315-1321.
- [8] SIDERIUS M, SONG H, GERSTOFT P. Adaptive passive fathometer processing[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2010, 127(4): 2193-

- 2200.
- [9] 赵梅, 胡长青, 屈科. 浅海海底单参数模型分析与研究[J]. 声学技术, 2014, 33(6): 494-498.
ZHAO Mei, HU Changqing, QU Ke. Analysis of single parameter seabed model in shallow water[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(6): 494-498.
- [10] 屈科, 胡长青, 赵梅. 浅海海底单参数快速反演模型研究[J]. 声学技术, 2012, 31(2): 152-155.
QU Ke, HU Changqing, ZHAO Mei. Single parameter rapid inversion model of shallow water[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(2): 152-155.
- [11] LONG Jianjun, LI Ganxian. Theoretical relationship between sound velocity and physical properties of submarine sediment[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2015, 34(4): 401-412.
- [12] HAMILTON E. L. Sound velocity and related properties of marine sediments[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 72(6): 1891-1904.
- [13] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981, 32-34.
WANG Dezha, SHANG Erchang. Underwater Acoustic[M]. Beijing: Science Press, 1981, 32-34.
- [14] 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992:185-196.
JIN Xianglong. Marine geology of East China sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 185-196.

• 简 讯 •

2018 年全国物理声学学术会议征文通知(第一轮)

2018 年全国物理声学学术会议定于 2018 年 9 月 14~17 日在河北省保定市召开。本届会议由中国声学学会物理声学分会、江苏省声学学会主办, 由华北电力大学承办。以“物理声学迈入新时代”为主题, 会议征文范围涵盖与物理声学相关的基础与应用基础研究领域。会议将邀请专家作物理声学前沿问题的特邀报告。欢迎广大声学、物理学及其它相关学科的科技工作者踊跃投稿, 参加会议。

会议报到时间: 2018 年 9 月 14 日

会议报到地点: 河北省保定市卓正酒店

会议时间: 2018 年 9 月 15~17 日

会议秘书暨联系人: 南京大学声学研究所 刘杰惠博士

通信地址: 210093 南京市汉口路 22 号南京大学声学研究所

电话: 025-83592385; 电子邮件: wljh@nju.edu.cn

来稿须知:

1. 论文内容具体, 突出作者最新的研究成果, 有较重要的学术价值, 未曾在国内外公开发行的刊物或全国性的会议上发表或宣读。

2. 摘要投稿: 摘要投稿截止日期为 2018 年 6 月 30 日。论文摘要通过 E-mail 发至会议秘书处(wljh@nju.edu.cn), 请在 E-mail 中注明论文分类(见论文分类)。

3. 文章摘要将形成会议摘要集。

4. 凡涉及保密的内容, 请作者单位自行审查, 责任自负。

论文分类:

- | | |
|---------------------|------------------|
| A. 线性声学(包括理论与计算声学) | H. 噪声及其物理效应 |
| B. 非线性声学(包括非线性物理学) | I. 结构与建筑声学 |
| C. 气动声学及大气声学 | J. 语言声学及语音通讯 |
| D. 水声物理学、水声通讯与传感器技术 | K. 声学测量的理论与方法 |
| E. 超声学、量子声学及声物理效应 | L. 声信号与信息处理 |
| F. 生物医学超声学 | M. 超材料和声振动 |
| G. 生物声学及仿生声纳技术 | N. 一般的振动与波以及相关问题 |

中国声学学会物理声学分会