

## 利用时域波形快速反演海底单参数的方法\*

屈科<sup>1)2)†</sup> 胡长青<sup>1)</sup> 赵梅<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

2) (中国科学院大学, 北京 100190)

(2013年6月21日收到; 2013年8月26日收到修改稿)

海底单参数反演由于反演维数少, 较之多维反演具有实施简单快捷的优点. 首先定义小掠射角下反射损失随掠射角变化率  $F_{dB}$  为单个参数描述海底性质, 构建单参数反演模型; 其次, 从简正波与射线理论出发, 对时域脉冲波形与海底反射性质之间的关系进行了推导, 并讨论衰减机制; 最后, 基于该关系设计出利用最小二乘法对时域波形进行反演的方法. 对北黄海实验数据进行了实际反演, 通过海底采样验证反演结果对海底性质估计的正确性, 同时基于反演结果的传播损失预报值与实测值符合良好. 该方法实施仅需要单个水听器, 待测物理量少, 所获结果较为可靠, 且能满足大多数应用的需要.

**关键词:** 单参数, 地声反演, 浅海, 海底反射损失

**PACS:** 43.30.+m

**DOI:** 10.7498/aps.62.224303

## 1 引言

海底声学参数是浅海声场分析计算的必要先验信息, 对海底声速、密度以及衰减系数等基本参数的掌握直接影响了众多声呐设备的测量准确性及工作距离. 较之传统的海底采样、钻孔等局部测量方法, 声学反演具有成本低、速度快、范围广等优点, 近年来一直是水声学研究的热点问题.

目前已经提出了众多地声反演的方法, 如匹配场反演<sup>[1-7]</sup>、分步混合反演<sup>[8-11]</sup>、简正波群延时及幅度反演<sup>[12-14]</sup>、海底反射信号反演<sup>[15-19]</sup>以及混响反演<sup>[20-22]</sup>等, 近期还有利用环境噪声进行反演的报导<sup>[23-25]</sup>. 一般而言, 目前的反演方法绝大多数都是多维反演, 即在一个多维地声模型的基础上对多个参数同时求解. 这些方法在海上实验中大多取得了较为理想的结果, 但是多维反演难以回避以下几个方面的问题: 多个待反演参数的敏感度不同, 对特定反演特征影响微弱的参数容易被海洋中的不确定性所掩盖; 寻优算法在效率与准确间有时难以兼顾; 多个参数间的耦合可能带来结果的不确定

性; 反演参数多以致反演待测环境量多且复杂等等. 值得一提的是, 以应用为目的地声反演通常需要用尽可能简单的等效模型来进行反演, 面对应用需要, 如文献[26]中用复杂过程反演13个参数的反演方法并不合适. 综合考虑规避多维反演可能面对的问题以及满足应用的需求, 最大限度减少需要的参数数量至一个成为一种可行的思路. 国内外单参数反演已经开展了研究, 但相关报导较少. 如 Joseph<sup>[27]</sup>提出用复数的单参数表示海底, 并设计了对应的反演方法. 我们在前期研究中提出以海底反射损失随掠射角变化的斜率作为海底单参数, 并推导了利用其描述浅海声场的表达式<sup>[28]</sup>. 随后在文献[29]中利用传播损失对单参数进行了反演, 但是需要测量多点传播损失, 仍然有改进的余地. 并且随着计算模型的进步<sup>[30,31]</sup>, 反演方法准确度和适应性也应随之提高.

探索新的反演方法总是有意义的, 而海底参数快速获取具有迫切的应用需求. 本文结合先前的工作, 提出利用时域波形快速反演单参数的新方案. 首先讨论单参数海底模型, 将多维反演过程降低为一维, 以期规避参数敏感性及多维寻优等问题, 同

\* 国家自然科学基金(批准号: 11174323)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: quke09@mails.ucas.ac.cn

时求解参数只有一个以减少反演所需测量的条件. 从浅海传播机制出发设计反演方案, 利用波形衰减比例快速反演海底单参数. 所获结果可以满足传播损失预报、沉积性质估计等应用需要. 最后通过海上实验数据验证方法的有效性.

以降低反演维数作为快速反演的新思路, 国内外相关的研究报道较少. 而基于海底反射损失的单参数快速反演, 国内外还未见报道.

## 2 基于单参数模型的快速反演方法

### 2.1 单参数海底模型理论简介

大量观测数据表明: 小掠射角反射损失随掠射角近似线性增加; 同时, 超过临界角的反射声衰减很快, 通常数公里后对浅海声场影响可以忽略. 依据以上客观事实, 单参数海底模型定义小掠射角下反射损失对掠射角  $\varphi$  的斜率  $F_{\text{dB}}(\text{dB}/\text{rad})$  为常数, 假设“有效”的反射声均在临界角内, 每一次反射海底反射损失  $BL$  为

$$BL = F_{\text{dB}} \cdot \varphi, \quad (1)$$

文献 [28] 研究了海底基本参数密度、声速以及衰减系数之间的耦合关系, 获得  $F_{\text{dB}}$  与它们之间的相互转化关系, 验证了单参数海底模型在物理机制上的合理性. 以指数形式  $F$  表示反射系数  $V$  有时更为方便:

$$|V|^2 = e^{-F\varphi}. \quad (2)$$

海底单参数表示的是海底反射的模量, 两种形式之间的关系式为

$$F = \frac{F_{\text{dB}}}{10 \log e}. \quad (3)$$

作为仅有一个参数的简化模型, 海底反射性质参数  $F_{\text{dB}}$  可以满足声场预报等应用需要. 基于简正波以及平滑平均理论, 可以用单参数计算声源声强  $I_0$  在距离  $r$  处的声强  $I$ , 表达式为

$$I = \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \sum_{l=1}^N \exp\left(-\frac{l^2 \lambda^2 r F}{8H^3}\right), \quad (4)$$

其中  $H$  为海深,  $\lambda$  为波长,  $N$  为有效简正波数. 文献 [32] 提出了一种简单确定反射相位  $\theta$  的方法:

$$\theta = -\pi + \frac{\pi}{\varphi_c} \varphi, \quad (5)$$

这种近似包含的物理机制是: 反射相位随着掠射角从零到临界角  $\varphi_c$  线性变化, 变化范围是  $-\pi$  到  $0$ .

由此海底单参数模型描述的海底反射模与相位关系可以作为边界条件输入 **Kraken** 等大多数计算模型, 计算声场的相干结构以及处理非等声速水平变化波导的情况.

从适用范围来看, 这种简化海底模型代表的是表面平整的高速海底. 从地声反演应用角度来说, 绝大多数浅海海底均可视作符合这种条件, 尤其是在下文中反演的低频段 (500 Hz 以下), 单参数表示具有极好的适用性.

### 2.2 利用时域波形反演海底单参数

浅海波导中声传播主要特点是多次与上下边界接触, 图 1 利用几何声线简单描述等声速波导传播结构. 由于绝大多数地声反演都忽略海面影响, 这里也把海面视作理想反射界面. 实际海底通常是相当平坦的, 甚至在靠近海底山、海脊及大陆坡的地方, 坡度很少超过  $10^\circ$ , 因此水平不变海底近似能够满足绝大多数情况的需要.

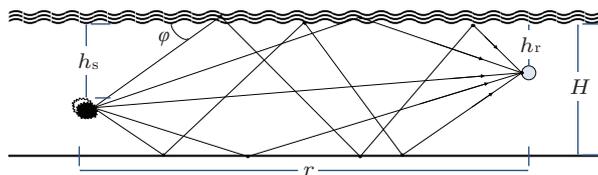


图 1 等声速浅海多途传播示意图

从简正波理论来讲, 各号简正波以各自不同的掠射角与海底相互作用, 而 1 号简正波以掠射角  $\varphi_l$  与海底接触的次数  $n$  可以表示为

$$n = \frac{r\varphi_l}{2H}, \quad (6)$$

根据单参数定义式 (2), 在  $r$  处  $n$  次反射后的能量损失系数  $E$  为

$$E = \exp\left(-\frac{Fr}{2H} \varphi_l^2\right). \quad (7)$$

通过几何关系, 可以将掠射角与直达波后的脉冲时延  $\tau$  相互转化:

$$\tau = \frac{r \sec \varphi_l - r}{c_w} \approx \frac{r\varphi_l^2}{2c_w}, \quad (8)$$

其中  $c_w$  为海水声速. 利用微分表示反射能量的随脉冲时延的变化为

$$E d\tau = \sqrt{\frac{c_w}{2r\tau}} \exp\left(-\frac{Fc_w\tau}{H}\right) d\tau. \quad (9)$$

将上式等号右方用分贝形式, 可以得到脉冲波形的变化主要分为三个部分: 第一部分为与直达波

达到时间无关的常数部分; 第二部分为  $51g\tau$ ; 第三部分与海底反射相关的  $10\frac{Fc_w\tau}{H\log_{10}e}$ . 将海水声速及海深作为待测量, 即可从波形的下降趋势中反演出海底反射性质  $F$ .

上面利用简正波推导了反演关系式, 而从射线几何的观点更容易理解其中包含的物理机制.

在小掠射角多次反射后, 声线的传播距离  $S$  可以表示为

$$S_n = \sqrt{r^2 + [2nH - (h_s + h_r)]^2}, \quad (10)$$

其中  $h_s$  和  $h_r$  分别为声源及水听器深度. 由于声线处于小掠射角且与海底多次接触, 经过与海底  $n$  次接触后达到的声线较直达波的延迟  $\tau_n$  与声源及水听器深度关系可以忽略:

$$\tau_n \approx \frac{2n^2H^2}{rc_w}. \quad (11)$$

与海底接触次数相邻的两组声线传播路径差  $s_{n+1} - s_n \approx \frac{4nH^2}{r}$ . 考虑声学上浅海的定义通常可以表达为声与海底多次的接触, 数学表示可写作  $r \gg H$ . 小掠射角下又有  $n \ll r/(2H)$ , 这里分析的直接结果为

$$s_{n+1} - s_n \ll \frac{4H^2}{r} \cdot \frac{r}{2H} \ll r, \quad (12)$$

上式可表明脉冲时延中扩展损失与直达波的扩展损失相比很小, 对脉冲波形相对衰减速度贡献小, 这也是反演设计中不用考虑传播距离的物理内涵.

考虑不同路径与海底接触的次数  $n$  不同, 声线到达水听器的时间也各异. 脉冲能量与声线到达的“密度”直接相关, 简单表示单位时间内声线到达的密度  $\zeta$  可以近似为

$$\zeta = \frac{1}{t_{n+1} - t_n} = \frac{1}{2H} \sqrt{\frac{rc_w}{2\tau_n}}, \quad (13)$$

表达式 (13) 中与反演表达式 (9) 中均包含了  $1/\sqrt{\tau}$ , 它包含的物理机制是多途衰减对时域波形的影响. 实际应用中通常多途效应的衰减比海底损失要小很多, 而 (9) 式中指数部分代表的即海底反射损失. 综合考虑时域波形的衰减机制, 海底损耗比海水要大 3 到 4 个数量级, 例如在 100 Hz 频率上, 海水吸收系数约为 0.004 dB/km, 而海底压缩波的衰减系数约为 2 dB/km (玄武岩) 到 63 dB/km (粉砂), 因此海水中吸收可以忽略. (9) 式考虑了浅海扩展损失、多途损失以及海底反射损失这三个影响衰减的主要因素, 因此反演理论才能利用波形衰减反演海底单参数.

## 2.3 利用海底单参数获得海底沉积物性质

海底反射损失对掠射角斜率  $F_{dB}$  作为反演结果可以满足传播损失预报以及定位等应用的需要. 当进一步需要海底沉积的密度等信息的时候, 利用单参数也能对海底基本参数进行推导. 这也是单参数模型的一种重要应用, 推导出的密度、声速等基本参数也是对反演结果的有效验证.

文献 [20] 中介绍了一种利用经验简单估计沉积密度、声速等信息的方法: 由于单参数模型只考虑小于临界角的情况, 利用单参数模型计算得传播损失会在临界角外反射声未完全衰减的距离内与实际值不符. 通过推导, 这个临界距离  $r_0$  的表达式为

$$r_0 = \frac{2H}{F\varphi_c^2}, \quad (14)$$

通过直观获得临界距离, 推算出临界角, 进而获得海底声速.

本文基于单参数模型, 将反演结果  $F_{dB}$  以及匹配物理量沉积声速  $c$  ( $\varphi_c = c_w/c$ ,  $c_w$  为海底附近声速, 代入 (5) 式可以转化为反射相位) 作为边界条件输入计算模型 (本文选用简正波计算模型 Kraken). 在  $N$  个不同距离  $r_i$  上, 拷贝场传播损失  $TL_m(r_i)$  与实际测量传播损失  $TL(r_i)$  之差的绝对值  $\Delta TL(r_i)$ , 在不同距离上的  $\Delta TL(r_i)$  的平均值为  $\overline{\Delta TL}$ , 定义  $\Delta TL(r)$  的标准差作为代价函数  $E$ :

$$E(c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta TL(r_i) - \overline{\Delta TL})^2}{N-1}}. \quad (15)$$

由于一维寻优计算量小, 选用穷举法搜索可能的沉积声速值, 使代价函数最小即获得结果. 在获得声速后, 通过 Hamilton 密度声速公式 [33]:

$$\frac{c}{c_w} = 1.631 - 1.78n_p + 1.2n_p^2, \quad (16)$$

$$\rho = 2.6 - 1.6n_p, \quad (17)$$

即可通过反演结果进一步推导到更为基本的声速  $c$ , 密度  $\rho$  以及孔隙率  $n_p$  值.

## 2.4 单参数时域反演方法的特点

1) 反演流程实施快捷. 反演流程为: 选用任意声源 (宽带爆炸声源、换能器发射的宽带或单频信号等), 在超过几公里的任意距离使用单个水听器接受信号即可; 仅需测量海水声速及海深; 截取信号的时域波形, 根据 (9) 式对信号按  $\sqrt{\tau}$  重新刻度能

量,用分贝形式表示波形衰减速度,利用最小二乘法从波形衰减斜率即可直接获得  $F_{dB}$ .

2) 反演结果惟一且可靠性高. 由于将通常的多维反演降低为一维,避免了结果间耦合导致的不确定性;海底反射损失斜率  $F_{dB}$  在(9)式中作为惟一影响波形衰减的海底参数,其敏感性不言而喻;待测量中没有传播距离以及声源深度等,这就规避了诸如传播距离与声源深度之间耦合导致的结果失配的情况发生.

3) 测量结果的自校准. 本方法利用时域波形的衰减比例反演,避免使用声压幅度的绝对值,对测量的声压带有“自校准”的效果;单个水听器接受,也避免了接受阵元之间的互校准工作.

4) 适用范围较广. 单参数反演作为一种快速反演方法,推导中做了几处近似. 如前文所述:理想反射海面、水平高速海底可以代表反演作业中的大多数情况. 而对于复杂的声速剖面以及倾斜海底的情况,一方面可以采用较低频率来减小影响,另一方面可以适当缩短声源与测量点的距离,在复杂波导条件影响较小时获得结果.

5) 反演结果可以用于声场预报以及定位等应用. 通过对多个点传播损失的测量,还可以进一步获得更为基本的密度、声速及孔隙率等基本参数,即快捷获取海底性质满足实际应用需要.

### 3 实验数据验证

为了验证反演方法的有效性,这里对某次北黄海浅海传播实验数据进行了反演,实验海区如图2所示. 在接收点  $R$  处布放接收潜标,其上绑缚4个自容式数据记录设备(DSG)作为接收设备,深度分别为15, 30, 40及50 m. 实验船按设定传播实验航线从  $R$  点出发,期间释放25 m/38 g 信号弹及气枪(5—10 m 深度)作为声源. 在图中圆点处有不同航次的沉积物采样资料.

在航线结束时利用声速计测量声速剖面测量如图3所示. 数据显示虽然在约40 m 处有跃变,但是整体上讲声速变化范围在4 m/s 内,海水折射对反演结果影响不大. 海深通过船载测深装置测量,海底平坦,深度测量值为  $69 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ . 反演环境可以近似等效为水平不变等声速波导,海水声速取平均值1482 m/s.

对于实验数据的处理,以下主要从三个方面验证反演方法可靠性及理论正确性.

1) 通过该方法可以反演出可靠的海底反射损失斜率值. 由于在理论推导中的近似,反演不考虑接收器深度、传播距离及海水折射等影响,需要验证在实际情况中不同距离及不同水听器深度都能反演出一致可信的值.

2) 反演结果需真实反映海底沉积物的性质. 利用反演结果  $F_{dB}$  估计沉积物性质,与采样结果比对.

3) 反演所得小掠射角下反射损失斜率必须能代表海底的反射性质,这可以通过检查单参数计算传播损失值与实测传播损失值是否符合来验证.

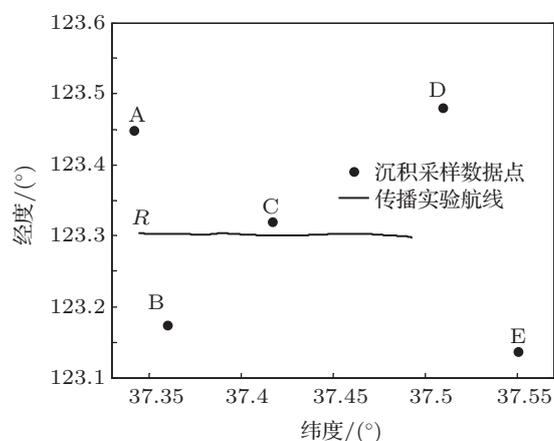


图2 传播实验航线及采样点

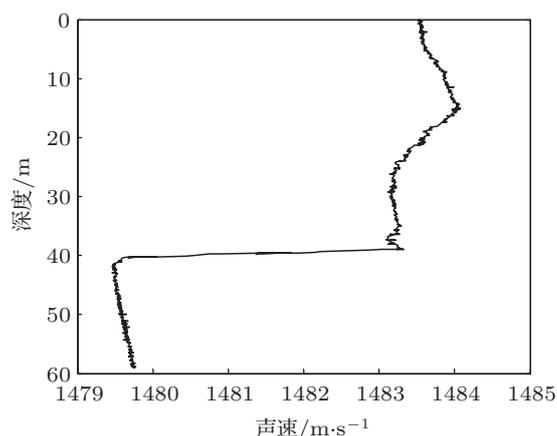


图3 声速剖面

#### 3.1 反演结果可靠性

反演主要利用10 km 到30 km 内的爆炸声源信号,按照方程(9)介绍的反演算法编写计算机程序对波形进行处理. 通过1/3 倍频程平均,获得了200 Hz 及400 Hz 的反演结果.

如图 4 及图 5 所示, 在不同传播距离, 取不同深度接收到信号反演结果在均值附近随机分布. 以均值为反演的结果 (200 Hz 为 1.37 dB/rad, 400 Hz 为 1.87 dB/rad), 绝大多数在 10% 误差范围内, 极个别点有较大偏离可能是由于噪声等影响. 总的来说, 实验证明了反演方法能够获得沉积反射性质, 且结果对于传播距离及接收器深度等不考虑的环境因素有较好的鲁棒性.

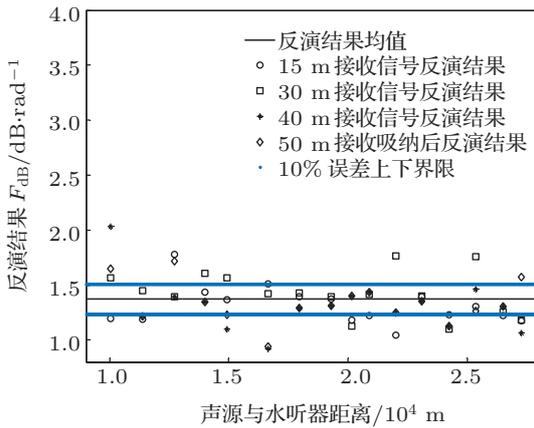


图 4 200 Hz 反演结果

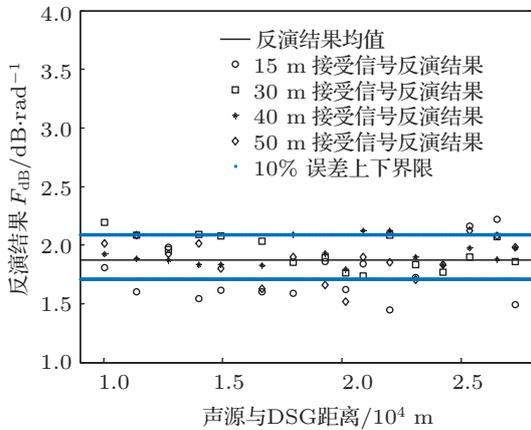


图 5 400 Hz 反演结果

### 3.2 反演结果与沉积物性质

根据 (15) 式, 在航线上任取 11 个点的传播损失推导海底声速值. 图 6 为频率为 200 Hz 时代价函数随海底声速的变化曲线, 当海底声速为 1657 m/s 时代价函数最小. 利用 (16) 和 (17) 式计算密度为 1.97 g/cm<sup>3</sup>. 表 1 为图 2 中采样点数据, 可见声速值

符合得很好, 而密度有一定误差. 考虑到密度值是由经验公式计算获得, 而声速才是对传播损失敏感的参数, 所以认为反演结果  $F_{dB}$  是可以真实反映海底沉积基本性质的.

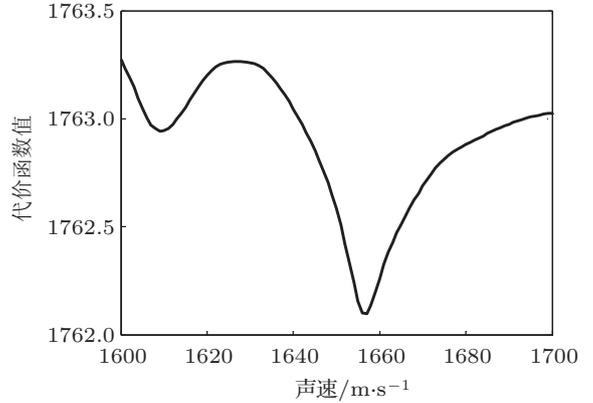


图 6 200 Hz 代价函数随声速的变化

表 1 沉积物采样

沉积类型	泥沙	泥
采样点位置	B, C, D	A, E
参考声速/m·s <sup>-1</sup>	1664	1668
参考密度/g·cm <sup>-3</sup>	1.787	1.806

### 3.3 传播损失验证

反演结果代入 (4) 式所得传播损失预报值与实验测量值比较如图 7 所示. 传播损失的预报是海底

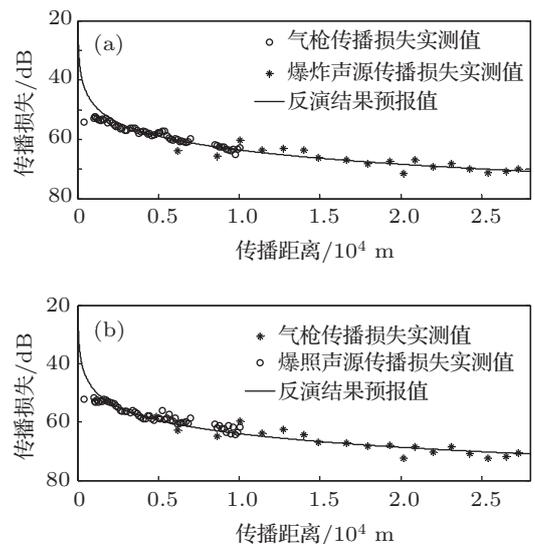


图 7 传播损失理论与试验值的比较 (a)200 Hz; (b) 400 Hz

反射性质最重要的应用,也是检验其准确性最有效的方法. 预测值与实测值符合非常好,利用时域波形所获的反演值正确地表征了海底的反射性质. 值得注意的是:由于海底单参数模型是基于小掠射角近似,在极近的距离大掠射角反射损失实际上对声场仍然有影响,所以最初几公里有若干点的传播损失误差较大.

## 4 结论

基于简正波理论,提出了一种利用时域波形衰减推导海底反射损失随掠射角变化梯度的反演方法,并利用几何射线推导揭示了其物理意义. 基于反演结果推导了更为基本的密度、声速等地声性

质,并进行传播损失预报. 对北黄海实验数据的分析验证了方法的有效性.

本文所得反演方法具有实施简单、快速获得结果的优点,其推导过程中采取一些近似,在很多复杂的实际情况中的准确性仍需要去验证. 例如:当海面因波浪等因素不能看作理想反射界面,或者海底粗糙并有较大剪切速度,小掠射角反射损失线性假设将可能不成立;当海水声速剖面不能看作等声速,海水折射可能导致远距离的反演结果不准确;当海深随距离变化,反演结果也可能在超过一定距离就不正确等等. 其适用范围及效果需要在实验中进一步检验,并依据具体问题对反演方法进一步优化,这是今后研究中一个重要的方向.

- [1] Knobles D P, Koch R A, Thompson L A, Focke K C, Eisman P E 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 205
- [2] Chapman N R, Chin-Bing S, King D, Evans R B 2003 *IEEE J. Oceanic Eng.* **28** 320
- [3] Yang K D, Chapman N R, Ma Y L 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 833
- [4] Jiang Y M, Chapman N R, Baduey M 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **121** 1879
- [5] Yang K D, Ma Y L 2003 *J. Northwestern Polytechn. Univ.* **21** 611 (in Chinese) [杨坤德, 马远良 2003 西北工业大学学报 **21** 611]
- [6] Peng H S, Li F H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1977
- [7] Qiu H B, Yang K D, Duan R 2011 *Acta Acoust.* **36** 396 (in Chinese) [邱海滨, 杨坤德, 段睿 2011 声学学报 **36** 396]
- [8] Li Z L, Zhang R H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1100
- [9] Li F H, Zhang R H 2000 *Acta Acoust.* **25** 297 (in Chinese) [李风华, 张仁和 2000 声学学报 **25** 297]
- [10] Li Z L, Zhang R H, Yan J, Li F H, Liu J J 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 973
- [11] Zhang X L, Li Z L, Huang X D 2009 *Acta Acoust.* **34** 54 (in Chinese) [张学磊, 李整林, 黄晓砥 2009 声学学报 **34** 54]
- [12] Li Z L, Yan J, Li F H, Guo L H 2002 *Acta Acoust.* **27** 487 (in Chinese) [李整林, 鄢锦, 李风华, 郭良浩 2002 声学学报 **27** 487]
- [13] Li Z L, Zhang R H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 471
- [14] Yao Y L, Gao D Z, Ren X M 2011 *Period. Ocean Univ. China* **41** 433 (in Chinese) [姚玉玲, 高大治, 任新敏 2011 中国海洋大学学报 **41** 433]
- [15] Holland C W 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 1861
- [16] Dettner J, Dosso S E, Holland C W 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 3327
- [17] Yang K D, Ma Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1798 (in Chinese) [杨坤德, 马远良 2009 物理学报 **58** 1798]
- [18] Li X G, Yang K D, Zhang T W, Qiu H B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7741 (in Chinese) [黎雪刚, 杨坤德, 张同伟, 邱海滨 2009 物理学报 **58** 7741]
- [19] Guo Y G, Li F H, Liu J J, Li Z L 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2483
- [20] Gao W, Wang N, Zhang H Z 2008 *Acta Acoust.* **33** 109 (in Chinese) [高伟, 王宁, 张好忠 2008 声学学报 **33** 109]
- [21] Wu J R, Ma L, Guo S M 2010 *J. Harbin Engineer. Univ.* **31** 856 (in Chinese) [吴金荣, 马力, 郭圣明 2010 哈尔滨工程大学学报 **31** 856]
- [22] Liu J J, Li F H, Guo L H 2004 *Acta Acoust.* **29** 49 (in Chinese) [刘建军, 李风华, 郭良浩 2004 声学学报 **29** 49]
- [23] Koch R A, Knobles D P 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 626
- [24] Siderius M, Harrison C H, Porter M B 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 1315
- [25] Quijano J E, Dosso S E, Dettmer J, Siderius M, Zurk L M, Harrison C H 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 2658
- [26] Schock S G 2004 *IEEE J. Oceanic Eng.* **29** 1200
- [27] Joseph P 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 758
- [28] Qu K, Hu C Q, Zhao M 2011 *Technical Acoustics* **31** 152 (in Chinese) [屈科, 胡长青, 赵梅 2011 声学技术 **31** 152]
- [29] Qu K, Hu C Q, Zhao M 2013 *Acta Acoust.* **38** 472 (in Chinese) [屈科, 胡长青, 赵梅 2013 声学学报 **38** 472]
- [30] Wang N, Liu J Z 2002 *Chin. Phys.* **11** 456
- [31] Luo W Y, Yang C M, Qin J X, Zhang R H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 054301
- [32] Sun W, Qu K, Hu C Q 2013 *Technical Acoustics* **32** 192 (in Chinese) [孙雯, 屈科, 胡长青 2013 声学技术 **32** 192]
- [33] Hamilton E L 1978 *J. Acoust. Soc. Am.* **63** 366

# A rapid inversion scheme for seabed single parameter using time-domain impulse response\*

Qu Ke<sup>1)2)†</sup> Hu Chang-Qing<sup>1)</sup> Zhao Mei<sup>1)2)</sup>

1) (China Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 21 June 2013; revised manuscript received 26 August 2013)

## Abstract

Compared with multi-dimension inversion, the single parameter inversion has the main advantages that inversion complexity decreases with the number of parameters increasing. Firstly, the slope of bottom loss versus grazing angle  $F_{dB}$  is proposed to serve as a single parameter. Secondly, in terms of mode and ray paths, the relation between impulse response and seabed reflection loss property  $F_{dB}$  is discussed. Finally, a time-domain inversion method using least-squares fitting to intensity decay rate is designed accordingly. Experimental data in North Yellow Sea are inverted. The inverted results are evaluated by the core samples. Good agreement is also obtained between measurement and predictions of transmission losses with using the inverted result. As this method only requires single hydrophone and comparatively few measurements, it is believed to provide a rapid but robust estimation of  $F_{dB}$  which can meet the need for many applications.

**Keywords:** single parameter, geoacoustic inversion, shallow water, bottom loss

**PACS:** 43.30.+m

**DOI:** 10.7498/aps.62.224303

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11174323).

† Corresponding author. E-mail: quke09@mails.ucas.ac.cn