

利用传播损失反演海底单参数*

屈 科 胡长青 赵 梅

(中国科学院声学研究所东海研究站 上海 200032)

2012 年 4 月 19 日收到

2012 年 8 月 12 日定稿

摘要 根据地声反演复杂性随着待反演参数的个数减少不断降低的原理, 提出一种利用传播损失反演海底单个参数的方法。通过对海底声阻抗的推导, 利用声速、密度和衰减系数拟合出海底反射损失对掠射角的斜率 F 。基于简正波理论推导了用 F 描述声场的公式, 并据此设计出对传播损失数据进行最小二乘法处理的反演方法。得益于将待反演参数减少至一个, 该方法只需单个水听器, 避免了复杂测量及多维寻优。对东海实验数据进行了实际反演, 并介绍了利用反演结果 F 进行传播损失预报和海底性质估计的步骤。所获结果与多参数混合反演方法及实测真值进行比较, 其一致性验证了方法的有效性。

PACS 数: 43.30

Single parameter inversion using transmission loss in shallow water

QU Ke HU Changqing ZHAO Mei

(Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of science Shanghai 200032)

Received Apr. 19, 2012

Revised Aug. 12, 2012

Abstract According to the fact that inversion complexity decreased with the number of parameters, a single parameter inversion scheme which conveniently obtains seabed property from range-intensity relation was proposed. Considering bottom impedance, the slope of bottom loss versus grazing angle F was established by fitting sound speed, density and attenuation. The acoustic field expression, described by F , was deduced based on the normal mode approach. Accordingly, an inversion scheme using a least-squares fitting to transmission loss was designed. Due to reducing the number of parameters to one, this method only requires single hydrophone and avoids complex measurement and optimization algorithm. Experimental data in East China Sea were inverted. The applications of F for transmission loss prediction and seabed property estimation were described. Both results were compared with the results from multi-parameter hybrid inversion and measurement, and the agreement evaluated the validity of inversion.

引言

海底声参数是浅海声场计算必要的先验信息, 而海底声速、密度、衰减系数等基本参数很难直接测量。因此地声反演作为获取海底声学性质相对经济高效的办法近年来一直是水声研究的热点问题。一般而言, 目前的反演办法多是多维反演。虽然方法各异, 最终反演出的是与地声模型相对应的一组多个海底参数^[1]。多维反演虽然能准确获得海底声参

数, 但也面临一些问题, 水声学者也不断提出相应的优化办法。例如: 针对多个待反演参数的敏感度不同, 对特定声信号影响微弱的参数容易被海洋中的不确定性所掩盖的问题, 国外提出了选取不同代价函数的解决办法^[2]。国内学者提出多种方法反演不同参数的联合反演思路^[3-5], 也较好地解决了这一问题。同时面对多维寻优算法获得多维反演结果带来大量计算量的问题, 差异进化方法 DE(Differential Evolution)^[6]等一系列的优化寻优策略也成为地声反演的一个重要研究方向。除此以外, 多维反演因为待

* 国家自然科学基金资助项目 (11174323)

求未知数多, 自然需要更多求解条件, 还会遇到海上待测物理量多且复杂以及反演声信号处理复杂等问题。当反演的目的为快捷地获得海底性质时, 最大限度减少需要的参数数量是一种可行的思路。国外对于单个参数表示海底性质较早进行了研究^[7], 但是设计的反演方法报道较少。吴金荣等^[8]利用 Hamilton 地声模型, 分别将海底声速、密度和衰减系数表示成孔隙率的函数, 对孔隙率进行单个未知数反演, 最后分别获得海底参数和海底反向散射常数。但正如该作者所述: 只反演单个参数确实非常容易地获得海底性质, 但孔隙率作为单参数表征海底性质受到地声模型约束, 而 Hamilton 和 Biot 等地声模型尚存在争议。本文前期研究中^[9-10]提出了不以基本参数作为单个反演对象, 避免基本参数间客观存在的耦合关系影响单参数假设。探讨将基本参数拟合来构建参数, 提出了海底反射损失对掠射角斜率作为单参数, 并讨论了反演的可行性, 但是没有设计出可以实际操作的反演方法。

本文结合之前的工作, 提出用传播损失反演单参数方法。其基本思想是: 对海底基本参数进行拟合, 建立相应单参数反演模型, 利用若干点声强的衰减规律直接获得单参数的值。对 2001 年中美东海联合实验 (ASIAEX 2001) 数据进行了实际反演, 证明对海底基本性质进行拟合并反演的单参数方法是简单快捷获得海底性质的可行思路。

1 反演原理

Chapman 等^[11]曾经讨论过: 反演一个结构复杂的多参数地声模型需要在声源附近进行精细的边界条件测量, 因为声场中包含了大量大掠射角声线的信息。与之相反, 大空间跨度的远距离传播的声场基本由小掠射角的海底反射声线构成, 一个简单的半无限海底模型足以表现声场特性。综上考虑, 在液态半无限海底模型基础上拟合基本声学参数, 围绕海底反射性质设计对大空间跨度海底性质进行反演的方法是可行的, 获得的结果也可以满足许多实际应用的需要。

1.1 海底单参数模型

大量历史观测数据表明: 小掠射角下反射损失 BL (Bottom loss) 随掠射角近似线性增加, 经过一个剧变区后接近常数。由于超过临界角的反射声衰减非常快, 一定距离后对浅海声场的影响可以忽略, 声场主要由小掠射角的反射声控制。因此, 定义小掠射角下海底反射损失随角度变化率 F_{db} 为单参数 (以

下角度均为小掠射角 $\varphi \ll 1$ 的情况), 其与高速海底反射损失 BL 及掠射角 φ 关系:

$$BL = F_{db} \varphi. \quad (1)$$

反射损失也可以用指数形式表示, 反射后声强 I 与入射声强 I_0 关系为:

$$I = I_0 \exp(-F\varphi). \quad (2)$$

代入海底反射损失与入射前后声强的关系 $BL = 10 \log_{10}(I_0/I)$, 得到两种表达的关系为:

$$F_{db} = 10 \log_{10} e F \quad (3)$$

假设海底是均匀的高速液态介质, 从海底声阻抗出发, 用海底沉积物密度 ρ_1 、声速 c_1 、衰减系数 α 通过密度 ρ 和声速 c 海水的反射系数 V 来构建单参数 F_{db} ^[9]:

$$F_{db} = \frac{10}{\varphi} \log_{10} |V|^2 = 40 \log_{10} e \left(\frac{c}{c_1} \right)^2 \frac{\rho_1}{\rho} \frac{\beta}{(1 - (c/c_1)^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

损耗因子 β 与海底衰减系数 α (分贝 / 波长) 的关系是:

$$\beta = \frac{\alpha}{40\pi \log_{10} e}. \quad (5)$$

1.2 反演基本原理及理论

根据 Weston 的理论^[7], 浅海衰减随距离依次服从 4 种衰减规律, 分别是: 球面扩展 (r^{-2})、柱面扩展 (r^{-1})、“三分之二方”多号筒正波干涉区 ($r^{-3/2}$)、单号筒正波柱面扩展衰减 ($r^{-1}e^{-Fr}$)。

采用无限大均匀液态海底模型, 取靠近海底海水声速, 在之前单参数反演模型研究中^[10], 已经取得了以上 4 种衰减规律的单参数表达式如表 1。

表 1 衰减规律的单参数表示

衰减类型	衰减区间	衰减规律
球面扩展	$0 \sim \frac{H}{2}$	$I = \frac{I_0}{r^2}$
柱面扩展	$\frac{H}{2} \sim \frac{2H}{F}$	$I = \frac{2I_0}{Hr}$
多号筒正波干涉区	$\frac{H}{2} \sim \frac{9H^3}{F\lambda^3}$	$I = \sqrt{\frac{2\pi}{F H r^3}} I_0 \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{Fr}{2H}} \right)$
单号筒正波衰减区	$\frac{9H^3}{F\lambda^3} \sim \infty$	$I = \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \exp \left(-\frac{\lambda^2 r F}{8H^3} \right)$

在实际浅海环境中, 球面扩展和柱面扩展影响距离相当有限, 在长距离衰减中可以忽略。在 $r \gg H$ 的距离 erf 函数自变量可取做 $Fr/2H \gg 1$, 多号筒正波干涉区的衰减受到单参数 F 的控制可以近似表达

为简单的关系式:

$$I = \sqrt{\frac{2\pi}{FHr^3}} I_0. \quad (6)$$

利用若干距离上声强衰减的数据和衰减表达式 (6), 即可以直接拟合出海底反射损失随掠射角变化率 F 。整个反演过程只需利用单个水听器测量不同传播距离 r 处声强 I , 记录海深 H , 无多维寻优计算, 是一种测量方便而且数据处理简单的反演方法。

2 实验数据反演

2.1 实验情况

2001 年中美两国水声学者在东中国海域进行了一次浅海水声考察 (ASIAEX2001), 期间进行了爆炸声源传播实验。图 1 为实验过程中投弹的轨迹。接收船在 M 点抛锚, 发射船沿图中圆周及直线 FH 航行。发射船航行中投定深 50 m 的 38 g TNT 爆炸声源并记录两船间距和海深。

声速剖面如图 2, 除去夏季海面受热具有稍高声速外, 可近似看作具有等声速结构, 同时又具有轻微的向下折射特性, 加强了海底反射性质对声场的控制。本文反演的 MG 段前 30.5 km 可以近似看作

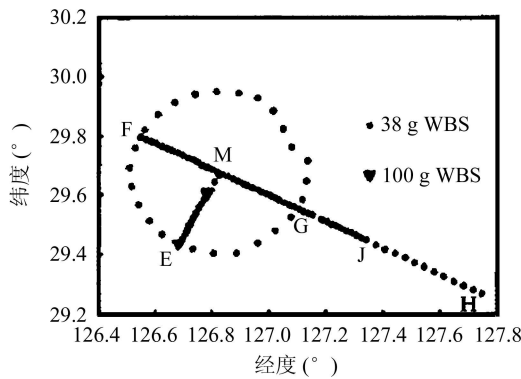


图 1 实验海区及发射船航行过程中爆炸声源投放点

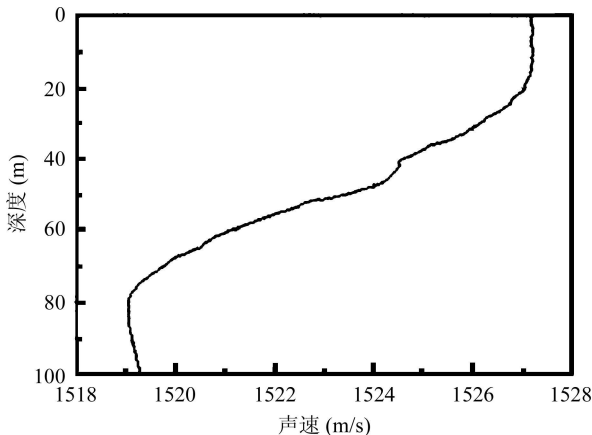


图 2 声速剖面

等声速水平不变结构, 数据可以用于拟合反演; 后 30 km 由于海深增加很快, 仅在验证传播损失时用作参考。

2.2 反演结果

考虑球面扩展和柱面扩展区域, 选用 4 到 30.5 km 内任意 9 个点的距离与声强为一组拟合数据, 直接利用最小二乘法从式 (6) 中拟合出单参数 F 。由于采用的是爆炸声源, 实验值都是经过 1/3 倍频程平均的结果。当频率为 100 Hz, 海底反射损失随掠射角变化率为 0.5541 dB/rad。同样的办法, 反演出 300 Hz 单参数 F_{db} 为 3.0170 dB/rad。由于低、中频 (1000 Hz 以下) 浅海传播主要受到海底反射损失控制, 浅海声道中绝大部分的能量都被海底这一有损界面消耗了, 从能量衰减逆推海底反射损失单参数符合声学原理, 而下面将从反演结果反映海底性质的实际效果上验证该方法的有效性。

3 利用反演单参数预报传播损失

在水下声场计算中, 海底反射性质最重要的应用即预报传播损失。

假设海深 H 不变, 波长 λ 的均匀浅海平滑平均场强 I 可以表示为^[10]:

$$I = \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \sum_{l=1}^N \exp\left(-\frac{l^2 \lambda^2 r F}{8H^3}\right). \quad (7)$$

带入有效简正波数 $N = 2H/\lambda$, 即可以计算距离 r 处, 声源场强 I_0 的传播损失。

通过单参数反演结果的传播损失预报值与实际观测值及其他反演方法结果^[4]比较, 不仅可以证明单参数反演结果可以有效预报传播损失, 而且可以进一步验证该方法的合理性。(以下计算中, 单参数取前文反演结果, 实验中测得海深 105 m、靠近海底处的海水声速 1519 m/s、海水密度 1.025 g/cm³)。

100 Hz 传播损失如图 3 所示。以此为对实验

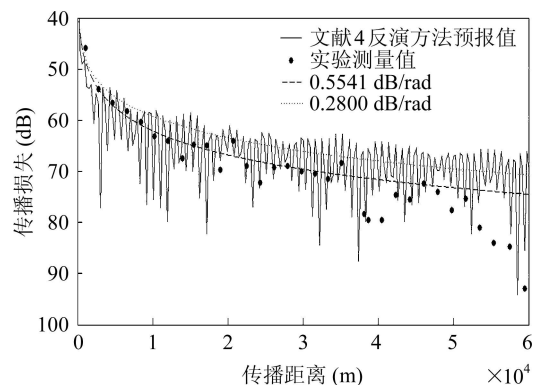


图 3 100 Hz 传播损失预报与观测值

结果主要从以下几点分析:

(1) 单参数反演结果 (0.5541 dB/rad) 与文献 4 的反演方法同样能如实反映海底的真实情况: 前 30.5 km 海底基本水平, 预测值与观测值符合较好。随着 30.5 km 以后海深变化, 不符合水平海底假设, 预测值与观测值有偏差。这也从反面印证了单参数反演能较准确反映海底性质。

(2) 考虑最初的球面和柱面扩展区域, 开始的几公里的预测值实际为曲线拟合的结果, 所以与比较的方法有一定偏差; 而实际上层海水声速略高于海底处 (图 2), 海水声速梯度会引起略微的向下折射, 这加大了海底对声场的衰减作用, 导致远距离的传播损失观测值比预报值普遍偏大, 偏差与理论预计相符。

(3) 为了检查传播损失对反演结果的敏感性, 取反演结果的二分之一 (0.2800 dB/rad) 进行了传播损失的预测。结果表明: 不准确的反演结果不能够准确的预报, 与观测值基本不符。因此正确反演海底反射损失随掠射角的变化率 F_{db} 对于传播损失的预报至关重要。

(4) 各个频率的传播损失理论值与实验值比较如图 4, 水平海底区域符合非常好, 证明利用单参数反演来预报传播损失准确有效, 表明反演结果能正确表征海底性质。

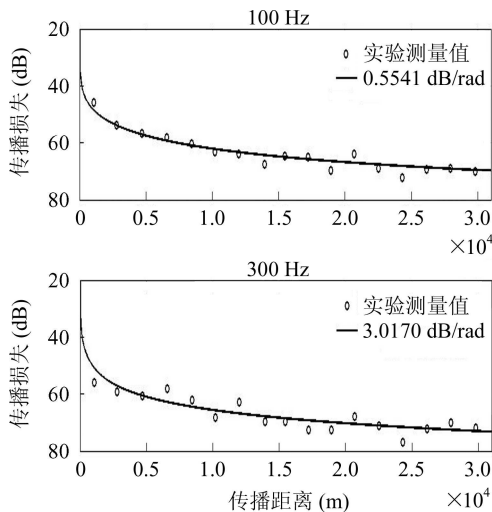


图 4 100 Hz 和 300 Hz 传播损失预报与观测值的比较

4 利用单参数估计海底沉积性质

文献 12 指出单层海底假设下反演声速值存在随频率的增加而减小的现象, 而各个参数间存在耦合关系, 因此很难有效地确定基本声参数的平均值。但是, 随着远距离传播基底的作用减弱, 文献 3 和 4 这类基于单层海底模型的反演方法获得的等效结果仍

然是有实用意义的。本节将单参数估计海底沉积结果与之比较。证明反演简单的同时, 反演结果准确反映了海底沉积物的物理性质。

单参数描述海底时, 第 l 号简正波本征声线以掠射角 φ_l 接触海底, 海底反射损失系数 E 由式 (2):

$$E = \exp(-F\varphi_l). \quad (8)$$

在距离为 r 处, 声线与海底接触次数 n :

$$n = \frac{r\varphi_l}{2H}. \quad (9)$$

考虑主要传播损失是海底反射损失, 在距离为 r 处的传播损失系数 E_r 可以写作:

$$E_r = \exp\left(-\frac{Fr}{2H}\varphi_l^2\right). \quad (10)$$

由于有单参数模型在小于临界角 φ_c 时成立, 大于临界角的声线都迅速衰减。因此定义一个转化距离 r_0 :

$$r_0 = \frac{2H}{F\varphi_c^2}. \quad (11)$$

在大于 r_0 的距离为指数衰减 (用分贝表示为线性衰减), 而小于 r_0 的距离为大于临界角的衰减, 比指数衰减更快。通过观察试验点的衰减规律, 可以直观判断 r_0 的取值, 由式 (11) 估算出临界角。利用临界角与海水声速 c 的关系:

$$\cos\varphi_c = \frac{c}{c_1}. \quad (12)$$

获得海底声速 c_1 , 然后由 Hamilton 经验公式^[13]:

$$\frac{c_1}{c} = 1.631 - 1.78n_p + 1.2n_p^2, \quad (13)$$

$$\rho_1 = 2.6 - 1.6n_p. \quad (14)$$

借助孔隙率 n_p 即可获得沉积密度 ρ_1 。代入式 (4) 即可获得声衰减系数的估计值。

图 5 利用 100 Hz 实验数据拟合直线估计海底声参数。图 5 中曲线为利用单参数预报的传播损失, 直线为利用线性衰减区内与预报值符合较好的几个实

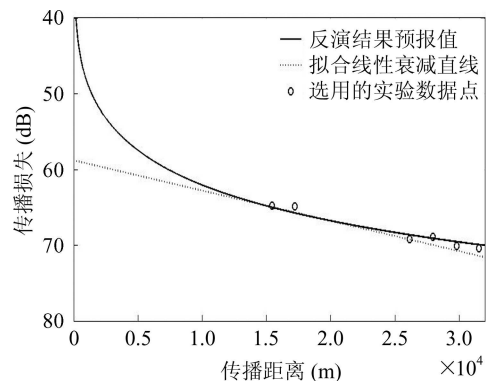


图 5 利用单参数估计基本声参数

验点数据拟合出的线性衰减直线。可以直观得出 r_0 处于 13.5 km 附近, 由式 (11) 求得临界角约 20.15° , 利用式 (12) 关系得沉积声速 1618 m/s。再利用 Hamilton 经验公式得到密度约 1.82 g/cm^3 。

表 2 为在同一实验进行的两种多维反演方法^[3-4]与单参数反演估计值对比。结果表明单参数反演能在较简单的反演过程下获得比较可信的结果。根据式 (13) 计算孔隙率约 0.48, 对应沉积类型为细沙质沙, 与图 1 中 M 点附近海底采样结果一致。

表 2 几种反演方法结果比较

	声速 (m/s)	密度 (g/cm^3)
文献 3 结果	1612	1.86
文献 4 结果	1607	1.82
单参数反演	1618	1.82

根据式 (4) 计算 100 Hz 及 300 Hz 声衰减系数为 0.002 dB/m 和 0.045 dB/m, 与文献 4 中反演的 0.005 dB/m 及 0.032 dB/m 稍有误差。但是考虑到声衰减系数在反演中敏感性较低, 并无绝对可信的参考量; 而且单参数结果在传播损失预报中较为准确。因此可以认为所得声衰减系数仍然是较为准确的量。

5 结论

本文在构建浅海海底单参数 F_{db} dB/rad 的基础上, 提出一种利用传播损失进行海底声学性质反演的方法。在预报传播损失的同时, 本方法的另一项应用是估计海底声速, 并结合密度声速关系, 进一步推导海底密度及声衰减系数。研究结果表明:

(1) 以反射损失对掠射角斜率进行单参数反演有效降低了反演的复杂性, 反演方法要求的实验条件简单, 只需要测量海深; 使用单个水听器测量即可: 在获得单个待求解参数过程中, 避免了大计算量的多维寻优过程。

(2) 单参数反演规避反演结果多值性、多维寻优效率与准确度难以兼得等一系列多维反演需要考虑的问题。

(3) 传播损失预测及海底性质估计与实验结果符合良好, 在反演简单的同时能够获得多维反演一样有效可靠的结果。

(4) 本文提出的单参数方法采取了一定的近似,

例如拟合参数时省略了高阶小量以及没有考虑反射相位关系。但是从反演实际效果来看, 是一种有意义的尝试, 同时表明了对拟合单参数反演的思路是可行的。

值得指出, 尽管单参数反演在水平不变的软质高速海底情况下能快捷地获得相对可靠结果, 但是仍然存在待研究的地方。如何将该方法推广到倾斜海底及复杂海水声速梯度情况; 硬质高剪切速度底质是否有效; 当海面及海底散射效果不可忽略时如何处理等问题是下一步研究的方向。

参 考 文 献

- 1 杨坤德. 水声阵列信号的匹配场处理. 西安: 西北工业大学出版社, 2008: 17—27
- 2 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
- 3 Li Zhenglin *et al.* Geoacoustic inversion by matched-field processing combined with vertical reflection coefficients and vertical correlation. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2004; **29**(4): 973—979
- 4 Peng Zhaohui *et al.* Seabed acoustic parameters from dispersion analysis and transmission loss in the East China Sea. *IEEE J. Ocean Eng.*, 2004; **29**(4): 1038—1045
- 5 Yang K D *et al.* Multistep match-field inversion for broadband data from ASIAEX2001. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2004; **29**(4): 964—972
- 6 Storn R, Price K. Differential evolution – a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report TR-95-012, ICSI, 1995
- 7 Weston D E. Intensity-range relation in oceanographic acoustics. *Journal of Sound and Vibration*, 1971; **18**(2): 271—287
- 8 吴金荣, 马力, 郭圣明. 基于地声模型的浅海混响地声反演研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010; **31**(7): 856—862
- 9 屈科, 赵梅, 胡长青. 浅海海底特性及单参数反演研究. 声学技术, 2011; **30**(3): 100—102
- 10 屈科, 胡长青, 赵梅. 浅海海底单参数快速反演模型研究. 声学技术, 2012; **31**(2): 1—4
- 11 Chapman D M F. “What are we inverting for”, in *Inverse Problems in Underwater Acoustics*, New York: Springer, 2001: 1—14
- 12 高伟, 王宁, 王好忠. 2005 黄海实验混响垂直相关统计反演海底参数. 声学学报. 2008; **33**(2): 109—115
- 13 Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1980; **68**(5): 1312—1340