

利用匹配场方法反演海底单参数

唐晓丹^{1,2}, 屈 科^{1,2}, 胡长青¹

(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)

摘要: 用海底反射损失对掠射角的斜率作为单个参数描述海底可以简化地声反演过程, 快速获得海底的地声性质。基于单参数模型及其相干声场的反射相位近似关系, 利用匹配场处理技术反演海底性质。通过 Hamilton 地声模型中的密度声速关系, 同时获得海底的密度和声速值。对 2001 年中美东海联合实验(ASIAEX 2001)实验数据进行了反演, 获得海底地声参数。最后利用反演结果进行传播损失预报及海底沉积物辨别, 其效果证实了基于单参数海底模型反演方法的有效性及其实用性。

关键词: 单参数; 反射相位; 匹配场反演

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-03-0208-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.03.007

Matched field geoacoustic inversion by applying the single parameter seafloor model

TANG Xiao-dan^{1,2}, QU Ke^{1,2}, HU Chang-qing¹

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

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

Abstract: Single parameter F_{dB} referred to as the slope of bottom loss versus grazing angle has been used in inversion procedure for rapid extraction of seafloor geoacoustic information. In this paper, matched field inversion is performed on the basis of the single parameter model and reflection phase angle approximation. The sound speed and seabed density are obtained from Hamilton geoacoustic model. Experimental data in East China Sea (ASIAEX 2001) are inverted. In the final step, the validity and usefulness are evaluated by the results from transmission loss prediction and sediment property characterization.

Key words: single parameter; reflection phase; matched field inversion

0 引 言

海底声参数的获取在浅海声场预报、声纳系统性能预报及定位应用等方面都有着重要意义。通过机械式采样获得海底环境参数, 代价昂贵且很难大面积实施, 而用声学方法反演获取的海底参数可以反映大距离尺度上的海底特征, 是一个方便、经济、高效的途径。因此, 海底声参数反演一直是国际水声学领域研究热点之一。其中匹配场处理技术得益于最大限度利用水声信道模型等技术优势, 成为了快速低成本获取局部海域环境参数的有效方法。由于在实际应用中有重要而广泛的前景, 不断有创造性的成果面世^[1]。

文献[2]提出了一种浅海单参数海底模型。这种模型将多个海底声学参数拟合为单个参数, 即将海底反射损失对掠射角的斜率 F_{dB} 作为唯一参数描述海底性质。文献[3]研究了利用单参数海底模型描述海底声场的办法, 将声场划分为 4 个不同的传播区域, 同时讨论了基于单参数海底模型进行地声反演的可行性。基于平滑平均理论, 文献[4]提出了利用传播损失反演单参数的方法。由于待反演参数只有一个, 这种方法具有海上测量简单、只需单个水听器以及反演结果稳健等优点。但是由于单参数模型只有反射模量的关系, 缺乏反射相位信息, 无法体现声场的相干特征, 因此无法利用匹配场技术来对 F_{dB} 进行反演。通过平面波入射液态半无限反射相位的近似关系, 本文提出了一种包含确定相位关系的单参数海底模型。基于这种改进可以利用 F_{dB} 对浅海声场的细结构进行计算, 这使基于单参数海底模型的匹配场反演成为了可能。

文中主要基于单参数海底模型及其反射相位近似, 采用匹配场的方法对海底单参数及声速进行

收稿日期: 2012-12-20; 修回日期: 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11174323)、中国科学院声学研究所青年人才领域前沿项目。

作者简介: 唐晓丹(1987—), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 研究方向为海洋声学。

通讯作者: 屈科, E-mail: quke09@mailsucas.ac.cn

反演,进而推导出海底密度等基本参数。通过检查传播损失预报值以及和其他反演方法的结果进行比较,验证了该方法的有效性。

1 浅海单参数模型理论

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,浅海声场主要由小掠射角下的反射声控制。而小掠射角下反射损失随掠射角近似线性增加,因此认为小掠射角下海底反射损失对掠射角 φ 的斜率 $F_{dB}(dB/rad)$ 为常数,每一次海底反射损失 BL 可以表示为^[2]

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

从物理机制考虑海底基本参数压缩波 c_1 、密度 ρ_1 以及衰减系数 $\alpha(dB/\lambda)$ 之间相互耦合的关系,通过合理的数学近似, F_{dB} 可以表示为

$$F_{dB} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{c}{c_1} \right)^2 \frac{\rho \alpha}{\rho_1 (1 - (\frac{c}{c_1})^2)^{3/2}} \quad (2)$$

其中, c 和 ρ 是海底附近的海水声速和密度。单参数也可以表示反射系数 V 的指数形式 F :

$$F = -\frac{2}{\varphi} \ln |V| = \frac{F_{dB}}{10} \ln 10 \quad (3)$$

通过在深度 H 和距离 r 上的平滑平均,可以用 F 表示声源声强 I_0 在距离 r 处的声强 I , 表达式为

$$I = \int_0^N \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \exp\left(-\frac{l^2 \lambda^2 r F}{8 H^3}\right) \quad (4)$$

其中, N 为有效简正波数。在单参数海底模型中,可近似认为反射相位 θ_F 随着掠射角从零到临界 φ_c 呈线性变化,变化范围是 $-\pi$ 到 0 。用数学式表达为

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

2 反演原理

基于单参数海底模型的匹配场反演中,以单参数 F_{dB} 和海底声速 $c(\varphi_c = c_w/c, c_w$ 为海水声速,代入式(5)可以表示相位关系)作为匹配物理量。在 N 个不同距离 r_i 上,拷贝场传播损失 $TL_m(r_i)$ 与实验测量传播损失 $TL(r_i)$ 之差的绝对值为 $\Delta TL(r_i)$, 在不同距离上的 $\Delta TL(r_i)$ 的平均值为 $\overline{\Delta TL}$, 定义 $\Delta TL(r)$ 的标准偏差作为代价函数:

$$E(F_{dB}, c) = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (\Delta TL(r_i) - \overline{\Delta TL})^2 \right] / (N-1)} \quad (6)$$

对于较低频率的二维海洋环境,式(6)中的拷贝场传播损失可以用简正波理论来计算。利用稍加修

改的 Kraken 计算模型^[5],输入单参数海底模型的模 F_{dB} 与相位变量 θ_F 这两个变量,来计算拷贝场的传播损失。

取 $N=11$,即选取 11 个距离上的点。通过穷举法搜索 F_{dB} 及 c 的值,使代价函数最小的值即为反演值。

3 反演实验

2001 年 5 月 27 日至 6 月 10 日,中美两国水声学家在东中国海域进行了一次浅海声学试验 (ASIAEX)。试验采用双船作业,接收船在图 1 中的 M 点抛锚,船下挂 32 个水听器的垂直阵。发射船沿图 1 中的圆圈和直线航行,同时投放 38g TNT 信号弹作为爆炸声源,标深为 50m,并记录投弹时发射船与接收船之间的距离,同时测量海深。反演选用垂直阵中 60.5m 处的水听器,所有数据都通过 1/3 倍频程平均处理。选取的反演航段为 M 点到 G 点,在 M 点到 G 点这 30km 之间,海深变化不大,可以近似恒定为 105m。

实验海区的声速分布图如图 2 所示,从图 2 看到,声速梯度有向下折射的趋势,随着声线与海底接触次数的增加,使得海底对声场的控制更强。海

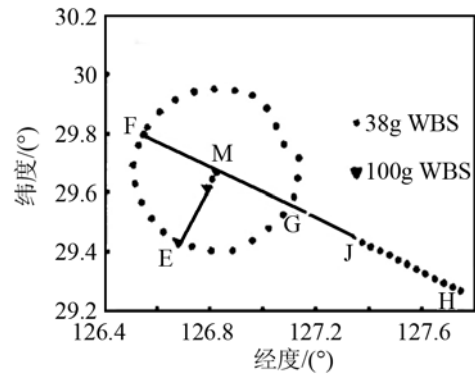


图1 试验海区及宽带爆炸声源投放点
Fig 1 Experimental area and the deployment positions of WBS

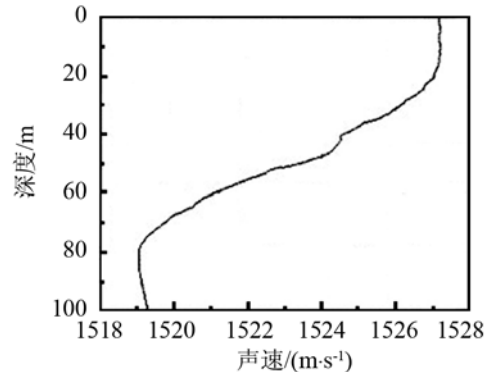


图2 声速剖面
Fig 2 Sound speed profile

底附近海水声速约为 $1519\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图 3 为 200Hz 匹配场反演结果。当反射损失斜率 $F_{\text{dB}}=1.80\text{ dB/rad}$ 及海底声速为 $1609\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 代价函数达到最小值。这与文献[4]中其他方法获得的 200Hz 反演结果 1.74 dB/rad 类似, 结果较为准确。图 4 为 500 Hz 时的反演结果, 其中 F_{dB} 为 8.34 dB/rad , 海底声速 $1616\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。值得注意的是, 在两个不同频率获得的声速值有一定的差距。这一方面可能是由于单层模型下单频独立反演本来存在的声速随频率变化的现象, 另一方面可能是由于选取的传播点不同, 而每个传播点仅仅是两枚爆炸声源的平均, 结果可能受到源级误差的影响。

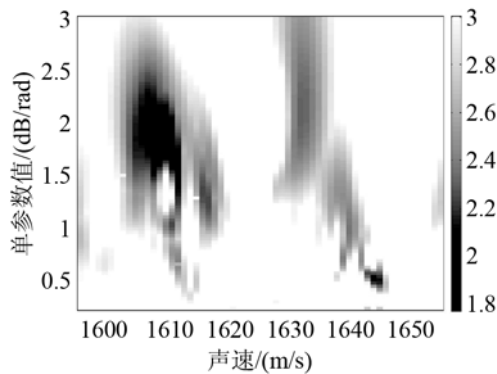


图 3 200Hz 代价函数随声速及 F_{dB} 的变化
Fig.3 Cost function versus c and F_{dB} at 200Hz

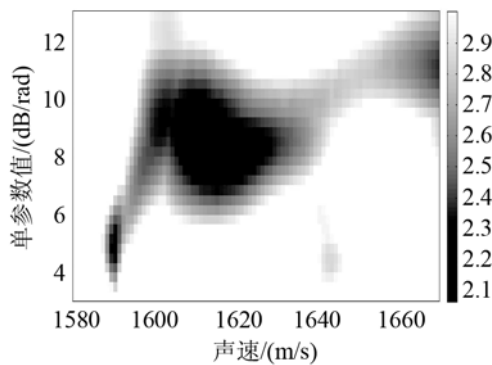


图 4 500Hz 代价函数随声速及 F_{dB} 的变化
Fig.4 Cost function versus c and F_{dB} at 500Hz

在获得声速后, 通过 Hamilton 密度声速公式^[6]:

$$\frac{c}{c_w}=1.631-1.78n_p+1.2n_p^2 \quad (7)$$

$$\rho_l=2.6-1.6n_p \quad (8)$$

即可获得海底声速 c 及密度 ρ_l 的值。与其他基于海底参数模型的反演结果比较(见表 1), 可见结果是可靠准确的。通过计算孔隙率 n_p 约为 0.48, 对应的沉积类型为细砂质砂, 与 M 点采样结果符合。

传播损失预报是有效检验反演结果的方法。利用公式(4)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

观测值比较, 不仅证明单参数反演结果有效预报传播损失, 而且进一步验证该方法的合理性。

表 1 不同反演方法结果比较
Table 1 Comparison of results of different inversion methods

反演方法	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
单参数匹配场反演	1.85	1609
文献[7]中方法	1.82	1606
文献[8]中方法	1.86	1612
文献[9]中方法	1.88	1692

各频率的传播损失预报值与实验值比较如图 5 所示。从图 5 可见, 200Hz 和 500Hz 单参数预报值与实验值都符合得很好, 误差在 $\pm 3\text{ dB}$ 左右, 表明反演结果能够正确表征海底性质。由于单参数模型只在小掠射角条件下才成立, 最初的几公里大掠射角的反射仍然影响到声场, 所以传播损失最初的预报值误差较大, 不具实际意义。

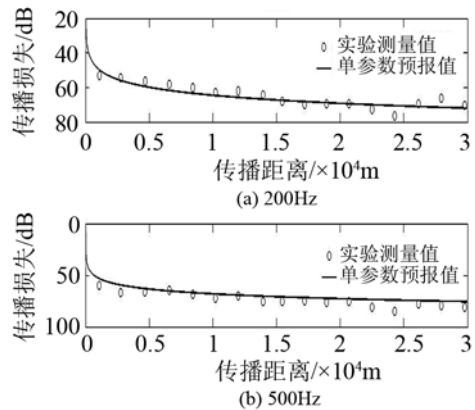


图 5 200Hz 和 500Hz 传播损失预报与测量值的比较
Fig.5 Comparison between predicted and measured values of transmission loss at 200Hz and 500Hz

下面对反演的参数进行敏感性分析。采用的方法是将其中一个参数固定在真值上, 在实际可允许范围内变化另一参数的值来观察代价函数。图 6 和图 7 分别给出了代价函数随反演参数(单参数 F_{dB} 和海底声速 c)的变化曲线。从图中可以看到, 代价函数在真值附近与其他位置有很大区别, 反演参数敏

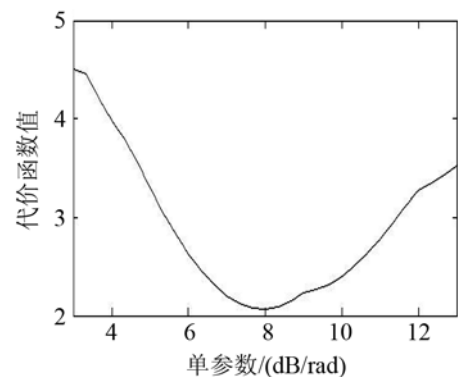


图 6 代价函数对单参数的变化
Fig.6 Cost function versus F_{dB}

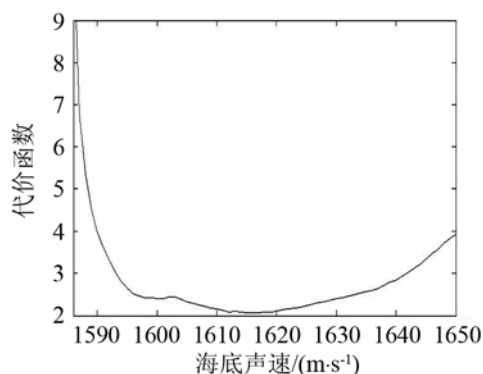


图7 代价函数对海底声速的变化

Fig.7 Cost function versus c

感性指数较高, 参数的变化能够引起匹配物理量较大变化, 也即代价函数的剧烈变化。

4 结论

本文基于单参数海底模型及其反射相位近似, 采用匹配场的方法对单参数和海底声速进行反演, 并结合密度声速关系, 进一步推导其它海底声参数。研究表明:

(1) 基于单参数模型的反射模量和反射相位近似, 通过匹配场技术对海底声参数进行反演的方法是可行的。

(2) 单参数匹配场反演方法的反演维数较小(位置参数只有两个), 寻优计算量较小, 由于单参数及海底声速对传播损失比较敏感, 反演结果较稳健, 所以基于 Hamilton 地声模型推导的密度结果较为可靠。

(3) 该反演方法要求的实验条件简单, 使用单个水听器, 只需要测量海深。

(4) 这种方法也存在一定限制: 最初几公里的传播损失预报值误差较大, 这是因为在这个位置大掠射角反射并未完全衰减; 同时由于单参数是基于小掠射角下的能量近似, 当海底较为粗糙以及具有很大剪切速度时, 能量很大部分被散射或者以剪切

波形式被截留在海底, 此时小掠射角下反射损失并非非线性增加。

本文主要是对基于单参数模型的匹配场处理应用进行探索, 在下一步的研究中通过选择频间非相干的宽带匹配器、改进寻优算法、引入领域位置约束等办法可以进一步提高反演效率, 使结果更准确可靠。

参考文献

- [1] 杨坤德. 水声阵列信号的匹配场处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008, 1-9.
YANG Kunde. Matched field process acoustic array signal [M]. Xi'an: Northwestern University Press, 2008. 1-9.
- [2] 屈科, 赵梅, 胡长青. 浅海海底特性及单参数反演研究[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 100-102.
QU Ke, ZHAO Mei, HU Changqing. Study on shallow water seabed characteristic and single parameter inversion[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(3): 100-102.
- [3] 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, 2011, 31(2): 152-155.
QU Ke, ZHAO Mei, HU Changqing. Single parameter rapid inversion model of shallow water[J]. Technical Acoustics, 2011, 31(2): 152-155.
- [4] QU Ke, HU Changqing, ZHAO Mei. Research on single-parameter inversion using transmission loss[C]// AIP conference proceeding, 2012, 1495: 473-480.
- [5] M B Porter. The KRAKEN normal mode program[Z]. SACLANT undersea research centre, 1995.
- [6] Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1980, 68(5): 1313-1340.
- [7] PENG Z H. Sea-bed acoustic parameters from dispersion analysis and transmission loss in the East China Sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1038-1045.
- [8] LI Z L et al. Geoacoustic inversion by match-field processing combined with vertical reflection coefficients and vertical correlation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 973-979.
- [9] 赵梅, 胡长青. 由爆炸声源及传播损失反演海底声学参数[J]. 声学技术, 2009, 28(2): 104-108.
ZHAO Mei, HU Changqing. Sea-bed acoustics parameters inversion by explosive sources and transmission loss[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(2): 104-108.