

浅海海底单参数快速反演模型研究

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)

摘要: 根据大量观测数据中小掠射角下反射损失随掠射角近似线性增长的规律, 提出以反射损失随掠射角的变化率 F_{dB} 为反演单参数。利用海底密度等基本参数拟合出单参数 F_{dB} , 证实单参数假设合理且能反映海底性质。利用简正波理论推导了单参数对浅海平均声场结构的控制公式, 确定各个过渡距离和最佳反演尺度。利用接收声信号距离和信号延时的关系, 获得了波形衰减规律, 为反演声信号中提取底质信息提供了依据。获得的结果证实了单参数反演是可行的, 并为下一步的反演研究提供了支持。

关键词: 单参数; 反演; 平均场强; 过渡距离

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-02-00152-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.007

Single parameter rapid inversion model of shallow water

QU Ke, HU Chang-qing, ZHAO Mei

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

Abstract: According to a large number of observations that bottom loss increases linearly with the grazing angle under the condition of small grazing angle, the bottom loss gradient F_{dB} is proposed for single parameter inversion, and F_{dB} can be fitted out from basic sediment parameters. The average sound intensity described by F_{dB} is derived with the normal mode approach. Four propagation regions are divided and the appropriate distance for inversion is determined. By using the relationship between distance and signal delay at receiver, the rules of the wave attenuation is obtained. The results of this paper can inverse F_{dB} from acoustic signal, which lay the foundation for further single parameter inversion research.

Key words: single parameter; inversion; average sound intensity; transition distance

0 引言

人们通常通过建立地声模型来研究海底性质, 而在建立地声模型基础上的水声反演是获得大范围海底参数最方便、经济、高效的手段。

从理论上讲, 对于地声模型的建立: 一方面, 海底沉积环境复杂和区域环境相差明显, 实际的海底不可能由任何单一的地声模型来确定。过于精细的模型往往在某种类型海底下与实验符合较好, 其他环境下就不适用了。一般化的简单模型一定程度上能简化沉积物本身的复杂性和区域的特殊性, 具有较好的普适性; 另一方面, 根据获取海底信息的目的, 海底参数反演需要用尽可能简单的等效模型反演出等效海底参数用于预报海洋中的声场^[1]。由此可见, 简单的地声反演模型的重要性不亚于复杂模型。

从实际应用来讲, 理解和评估海底的声传播,

至少需要用到沉积层的密度、声速和声衰减系数等参数, 某些复杂的模型还需要弹性系数以及分层信息等。为获取这些物理量, 以匹配场^[2]为代表的一系列反演办法都是多维地声模型上的多参数反演。这种多维反演过程可看作是对多维参数的求解, 不仅加大了海上测量的复杂程度, 信号处理比较复杂, 而且各个参数的敏感性常常令操作者在效率和稳健性上进退维谷。绝大多数多维反演都需要整合测量数据和事后处理, 难以在日常海上作业中得到即时实用。

大量数据表明, 浅海多种类型海底小掠射角(下文所述掠射角都是很小的情况)反射损失随角度近似线性增长。本文从实用性出发, 在此基础上对多参数进行拟合, 提出用小掠射角下反射损失随角度变化率 F_{dB} (dB/rad)来提取海底信息, 构建单参数反演模型。通过下面对该反演模型的研究, 证明单参数反演模型不仅可以有效进行传播损失的预测, 同时也为实现单个水听器、信号处理简单、反演结果稳健以及能满足海上作业实时实现要求的一维单参数反演打下基础。

收稿日期: 2011-07-01; 修回日期: 2011-09-21

作者简介: 屈科(1984—), 男, 四川成都人, 博士研究生, 研究方向为水声技术。

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

1 单参数模型

1.1 单参数模型定义

图 1 为三种典型沉积的反射损失曲线。可见, 有吸收海底反射损失在小掠射角时随角度近似线性增加, 经过一个剧变区后接近常数。文献[3]中提出了“三参数模型”, 在海底反射临界角 φ_c 以下与单参数模型类同, 超过 φ_c 反射损失为常数 V_0 。简单看来三参数模型较单参数模型全面, 但是三个参数 Q 、 φ_c 、 V_0 不是相互独立的, 不能同时随便假设, 而且超过临界角的反射声波衰减非常快, 一定距离后对浅海声场的影响可以忽略, 所以单参数模型在方便快速反演的同时能较好地描述声场。

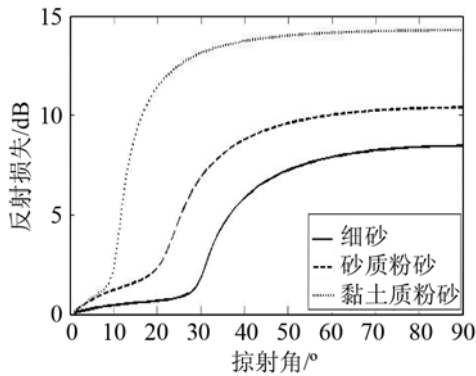


图 1 三种典型沉积的反射损失

Fig.1 Bottom losses of three kinds of typical seafloor

定义单参数 F_{dB} 与海底反射损失 BL 及掠射角 φ 关系为

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

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

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

两种表达的关系是

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

1.2 单参数模型拟合

平面波在界面上的反射系数, 无论海底是单层还是多层介质, 早有专著定论^[3,4]。假设海底是均匀的高速液态介质, 从海底声阻抗出发, 用海底参数密度 ρ_1 、声速 c_1 、衰减系数 α 来构建单参数 F_{dB} :

$$V = \frac{Z_1 - Z}{Z_1 + Z} \quad (4)$$

其中: V 为反射系数, Z_1 和 Z 分别为海底和海水的声阻抗。

实际上, 特别是低频情况, 海水的吸收往往可以忽略, 但是海底的吸收却大很多。在数学上, 海

底吸收的效应可以表达为

$$Z_1 = \rho_1 c_1 (1 + j\beta) \csc \varphi \quad (5)$$

其中, ρ_1 和 c_1 为海底密度与声速; β 为损耗因子; φ 为海底掠射角。损耗因子 β 与海底衰减系数 α (分贝/波长)的关系是

$$\beta = \frac{\alpha}{40\pi \log_{10} e} \quad (6)$$

引入单参数 F_{dB} 为海底反射损失随角度的梯度:

$$F_{dB}\varphi = 10 \log_{10} |V|^2 = 40(\log_{10} e) \times \left(\frac{c}{c_1}\right)^2 \frac{\rho_1}{\rho} \frac{\beta\varphi}{\left(1 - \left(\frac{c}{c_1}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (7)$$

两边同时约去掠射角 φ 即可将 ρ_1 、 c_1 、 α 拟合为反射损失变化率 F_{dB} 。

Hamilton^[5]把沉积层海底分为九类(第九类为低速海底, 反射机制与高速海底不同), 表 1 给出了 1 kHz 下相应的 F_{dB} , 可以发现不同类型沉积 F_{dB} 的取值约有数倍的变化, 证明反射损失变化率对于海底性质的变化是很敏感的(这里取 Hamilton 分类结果, 衰减系数是利用 $\alpha = Kf$ 推导获得)。

表 1 8 种沉积物参数
Table 1 Eight sediment parameters

沉积类型	$c_1/$ (m·s ⁻¹)	$\rho_1/$ (g·cm ⁻³)	孔隙 率 n	$\alpha/$ (dB/λ)	$F_{dB}/$ (dB/λ)
砂	1836	2.034	38.6%	0.8708	2.1245
细砂	1759	1.962	44.5%	0.8879	3.1466
极细砂	1709	1.878	48.5%	1.0411	4.9847
粉砂质砂	1658	1.783	54.2%	1.1155	8.0519
砂质粉砂	1644	1.769	54.7%	1.0659	8.9346
粉砂	1615	1.740	56.2%	0.9286	11.330
砂-粉砂-黏土	1582	1.575	66.3%	0.1854	3.8333
黏土质粉砂	1546	1.489	71.6%	0.1475	10.219

2 单参数模型表示声场

场强在空间具有复杂的干涉图样, 严格地计算干涉结构较为困难, 人们在实际应用中常常关心“平均”的场。因此计算中采取平滑平均理论, 在能量守恒约束下对水平和垂直方向进行能量平滑分配。为方便计算, 采用等声速水平液态海底模型。

2.1 单参数对浅海声场的确定

此计算中根据简正波理论, 声源声强为 I_0 , 波长为 λ , 在距离为 r 处, 海水声速 c , 海深 H 的均匀浅海“平滑平均”场强 I 可以表示为^[3]:

$$I = \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \sum_l \exp(-2\beta_l r) \quad (8)$$

式(8)中, β_l 对应 l 号简正波的衰减系数。与反射系数 V 和跨度 S_l 关系为

$$\beta_l = -\frac{\ln|V|}{S_l} \quad (9)$$

从图 1 可知, 超过临界角的简正波迅速衰减, 临界角内的简正波是声场的主要贡献者。

掠射角与简正波号数 l 的关系可由频散方程得:

$$\varphi_l = \frac{l\lambda}{2H} \quad (10)$$

由于临界角的关系, 简正波的数目应该是有限的 N 个。

S_l 对应 l 号简正波的跨度:

$$S_l = \frac{4H^2}{l\lambda} \quad (11)$$

联立式(8)、(9)、(10)、(11), 得到均匀浅海中平均声场的表达式为

$$I = \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \sum_{l=1}^N \exp\left(-\frac{l^2 \lambda^2 r F}{8H^3}\right) \quad (12)$$

在满足条件

$$\frac{\lambda^2 r F}{8H^3} \ll 1 \quad (13)$$

下对多号简正波用求积代替求和:

$$I = \int_0^N \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \exp\left(-\frac{l^2 \lambda^2 r F}{8H^3}\right) dl \quad (14)$$

根据 Weston^[6] 的结论, 有效简正波数目为

$$N = \frac{2H}{\lambda} \quad (15)$$

引入高斯误差函数

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (16)$$

可以写成积分形式, 代入误差函数, 表示成

$$I = \sqrt{\frac{2\pi}{F H r^3}} I_0 \text{erf}\left(\sqrt{\frac{F r}{2H}}\right) \quad (17)$$

图 2 为 2001 年中美联合考察实验结果, 实测海底参数为: 沉积密度 1.88 g/cm³, 沉积声速 1692 m/s, 200 Hz 的 1/3 倍频程内平均声衰减系数 0.13 dB/λ。海水深度为 105m, 海水密度为 1.025 g/cm³,

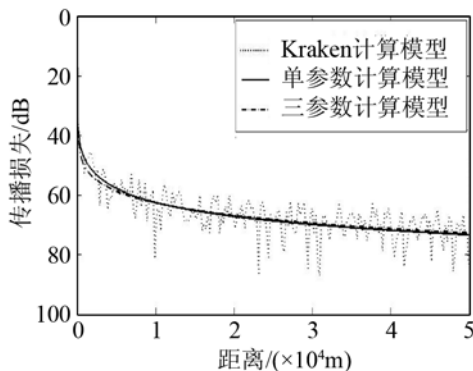


图 2 三种计算模型的仿真(单参数、三参数和 Kraken)

Fig.2 Simulations for three computation models (single parameter, three parameter and Kraken)

平均声速 1519 m/s。计算单参数 F_{dB} 为 0.7157 dB/rad。计算机仿真发现, 单参数模型与三参数模型表示的声场相差无几, 表明单参数模型可以完整地描述各个距离的声场。利用 Kraken 计算模型和单参数模型计算传播损失符合很好, 进一步说明用单参数描述声场是可行准确的。

2.2 单参数反演尺度的确定

根据 Weston^[6] 的理论, 浅海衰减依次服从 4 种规律, 分别是: 球面扩展(r^{-2})、柱面扩展(r^{-1})、“二分之三方”多号简正波干涉区($r^{-3/2}$)、柱面扩展附加衰减的单号简正波区域($r^{-1}e^{-Fr}$)。

分别对应的过渡距离是 r_1 、 r_2 、 r_3 。

误差函数的性质为

$$\text{erf}(x) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{\pi}} x & x \ll 1 \\ 1 & x \gg 1 \end{cases} \quad (18)$$

在 r 很小时, 是球面扩展, 由式(17)、(18), 得

$$\frac{2}{Hr} = r^{-2} \quad (19)$$

所以 $r_1 = H/2$, 声强球面衰减 $I = I_0/r^2$, 此区域与海底性质无关, 不适宜做反演。

柱面扩展和多号简正波干涉区的界限不明显, 可以把误差函数式(18)自变量为 1 取做中间界限, 即 $r_2 = 2H/F$ 。小于 r_2 的柱衰减区域声强为 $I = 2I_0/Hr$, 也与海底性质无关, 且当 F 较大时, r_1 可能会大于 r_2 , 此时柱面扩展区域不存在。大于 r_2 为“二分之三方”多号简正波干涉区, 声强为

$$I = \sqrt{2\pi/F H r^3} I_0 \quad (20)$$

此区域虽然包含了海底信息 F , 但是由于各号简正波掠射角度各异, 具有复杂的干涉结构, 不适合作为快速反演作业区域。

柱面扩展附加衰减的单号简正波区域($r^{-1}e^{-Fr}$), 即衰减只剩下一号简正波的区域, 其掠射角可以用式(15)确定, 取 $l=1$, 声强为

$$I = \frac{\lambda I_0}{H^2 r} \exp\left(-\frac{\lambda^2 r F}{8H^3}\right) \quad (21)$$

式(21)包含了单参数且掠射角唯一并可由式(10)确定, 因此认为超过 r_3 处于单号简正波区域的反演是可行的, 大于 r_3 的反演尺度才是合理的。

对于过渡距离 r_3 , 文献[3]中由本文式(8)中的

$$2|\beta_2 - \beta_1| \cdot r \ll 1 \quad (22)$$

推出较为粗糙的过渡距离:

$$r_3 = \frac{8H^3}{3F\lambda^2} \quad (23)$$

这里给出另外一种推导: 由每次反射损失为 $\exp(-F\varphi)$ 以及反射次数 $n=r\varphi/2H$ 发现, 在一定距离

下, 声强随角度高斯分布 $\exp(-Fr\varphi^2/2H)$ 。可以发现按照 $r_3=8H^3/3F\lambda^2$ 的办法计算, 第二号筒正弦衰减了 73.7%, 第一号衰减了 28.4%。根据高斯分布的“3 σ ”法则, 当 $r=9H^3/F\lambda^2$ 时, 二号筒正弦衰减了 98.9%。第一号衰减了 67.5%, 可见

$$r_3 = \frac{9H^3}{F\lambda^2} \quad (24)$$

第二号筒正弦波对反演准确性影响较小。

表 2 给出了单参数与三参数模型过渡距离的对比。通过比较可见, 三参数模型过渡距离以临界角 ϕ_c 、超过临界角的反射率 V_0 、低于临界角的反射率 Q 等多个待反演未知量表示, 难以确定出反演的区域; 而单参数模型只需假设一个量 F , 即能确定反演尺度, 这也从另一个侧面说明单参数模型虽不及三参数模型全面, 但更加适用于快速反演应用。

表 2 单参数和三参数模型的过渡距离对比

Table 2 Comparison of transition distance between single and three parameter models

过渡距离	三参数模型	单参数模型
r_1	$\frac{H}{\sin \phi_c (-\ln V_0)}$	$\frac{H}{2}$
r_2	$\frac{H}{\sin \phi_c (-\ln V_c)}$	$\frac{2H}{F}$
r_3	$\frac{4H^3}{3Q\lambda^2}$	$\frac{9H^3}{F\lambda^2}$

3 单参数反演模型反演可行性分析

单参数反演是为了获得以单参数表征的海底底质信息, 因此利用接收器所得波形, 借助单参数模型表达式应当能获取海底反射损失变化率 F 。图 3 为前文所述实验的数据拟合曲线。

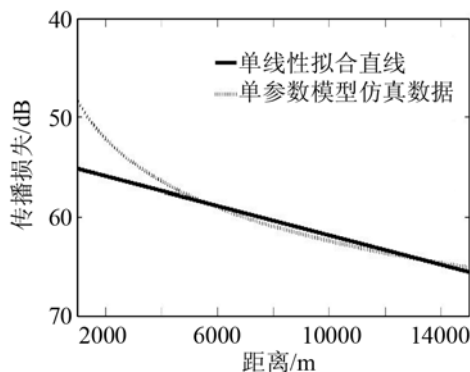


图 3 实验数据拟合

Fig.3 Experimental data fitting

图 3 中实线为前文所述实验数据在单号筒正弦波区域($r^{-1}e^{-Fr}$ 近似线性衰减)内利用 3 个实验点数据拟合出的传播损失直线, 由 r 处场强表达式(21), 借

助拟合获得距离 r 与传播损失关系逆推出单参数是可行的。同时也证明了单参数反演的两个优点: 一方面, 式(21)中包含的反演待测物理量只有海深以及海水声速, 证明了单参数反演所需测量物理量少; 另一方面, 借由曲线拟合, 反演过程利用的是声强的衰减比例, 而非声强的绝对幅值, 这证明了单参数反演可以通过单个不需校准的水听器即可实现, 是对测量要求较低的反演方法。

同时声波的传播时间 t 为

$$ct = r \sec \varphi \approx r + r\varphi^2/2c \quad (25)$$

直达波在 t 时刻到达后的脉冲时延 τ 为

$$\tau = t - r/c \approx r\varphi^2/2c \quad (26)$$

可见, 在反演中距离 r 与接收波形时延 τ 可以相互转化, 设计时域与空间域方法均是可行的。

综上, 在单参数模型基础上设计相应反演方法是可行的。

4 总结

本文选用海底反射损失随掠射角的变化率 F_{dB} 作为研究对象, 对单参数反演中的诸多基本问题进行了研究。首先用海底密度、声速、衰减系数构造了单参数, 证明反射损失变化率 F_{dB} 确实能体现海底的基本性质。通过简正弦理论推导出单参数对海底平均场强的控制公式, 确定了几个过渡距离和反演尺度, 为单参数进行海底声场预报提供了依据。最后, 获得距离 r 与接收波形时延 τ 的关系, 利用该表达式可以从接受到的声波中提取出单参数 F_{dB} , 为单参数反演方法的设计提供了思路。结果说明: 该单参数模型符合快速反演方便快捷的要求, 而且能较准确地进行声场分析, 为下一步进行单参数反演研究和应用提供了有用的理论依据。

参 考 文 献

- [1] Chapman M F. What are we inverting for? in Inversion problems in underwater acoustics[M]. New York: Springer, 2011, 1-5.
- [2] 杨坤德. 水声阵列信号的匹配场处理[M]. 西安: 西北大学出版社, 2008, 2-5.
YANG Kunde. Matched field process acoustic array signal[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 2008. 2-5
- [3] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981, 175-261.
WANG Dezhaoh, SHANG Erchang. Underwater acoustics[M]. Beijing: Science Press, 1981. 175-261.
- [4] (苏)布列霍夫斯基. 分层介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 10-16.
- [5] Brekhovskikh. Waves in layered media[M]. Beijing: Science Press, 1984. 175-261.
- [6] Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the sea floor[J]. J Acoust Soc Am, 1980, 68(5): 1313-1340.
- [7] Weston D E. Intensity-range relation in oceanographic acoustics [J]. Journal of Sound and Vibration, 1971, 18(2): 271-287.