

由简正波群延时及幅度反演海底参数^{*}

李 整 林 鄢 锦 李 风 华 郭 良 浩

(中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100080)

2001 年 4 月 20 日收到

2001 年 6 月 19 日定稿

摘要 由简正波过滤技术得到 1 号与 2 号简正波群延时及幅度。通过匹配简正波群延时差来反演海底的声速、密度等参数, 衰减系数由简正波的幅度反演得到。遗传算法用来在参数域内搜索待反演的参数。在 200 ~ 500 Hz 频率范围内海底衰减系数随频率的变化关系为 $\alpha = 0.29f^{1.91}$ dB/m (f 的单位为 kHz)。最后给出由反演出的参数计算得到的传播损失与实验的声传播损失数据的比较, 结果符合的较好。

PACS 数: 43.30

Inversion for the sea bottom acoustic parameters by using
the group time delays and amplitude of normal mode

LI Zhenglin YAN Jin LI Fenghua GUO Lianghao

(National Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

Received Apr. 20, 2001

Revised Jun. 19, 2001

Abstract The group time delays and amplitudes of the normal mode are derived using the normal mode filter. The sea bottom sound speed, density and attenuation are inversely deduced by matching the group time delays and the amplitude of the normal mode. A genetic algorithm (GA) is used for optimization search in the parameter space. The inverted attenuation has the nonlinear frequency relationship $\alpha = 0.29f^{1.91}$ dB/m (the unit of frequency is kHz) in the frequency range 200 ~ 500 Hz. The theoretical transmission loss calculated using the deduced parameters matches the experiment data very well.

引言

浅海环境中, 海底底质的声学特性如: 海底的密度、声速、衰减等参数对声传播有着重要影响, 进一步影响声场准确预报、声呐工作的声呐作用距离估算及声源的定位等。而海底的声学参数 (特别是衰减) 很难直接测量, 利用声波信息大范围的探测及反演

海底特性, 具有海底取样测量 (局部) 所无法比拟的优点。所以, 海底反演问题近年来成为水声界的一个热点问题^[1-6]。

海底参数的反演实际上是一个多维的最优化问题, 它包括以下 4 部分内容: (1) 适当的海洋环境模型, (2) 准确的声场计算模型, 用来计算正问题, (3) 代价函数, (4) 一套搜索算法在待反演参数域中快速地找到一组参数使得代价函数达到极值。模拟

* 国家自然科学基金资助项目 (19734050)

退火 (SA) 和遗传算法 (GA) 等全局搜索算法在海底反演方面都得到广泛应用^[4,7]。

本文对一次冬季实验的垂直阵接收信号进行简正波过滤得到第 1 号简正波与第 2 号简正波的时延及第 1 号简正波群速度在两个不同频率下的延迟。利用简正波的色散特性, 通过匹配简正波时延来反演海底的声速、密度等参数, 衰减系数由第 1 号简正波的幅度随距离变化的斜率反演得到。用遗传算法在参数域内搜索待反演的参数。最后, 给出由反演出的参数计算得到的传播损失与实验的声传播损失数据的比较。

1 理论分析

1.1 简正波的群速度和衰减系数的理论表示^[2]

在浅海中, 同一频率不同号简正波的群速度不同。对同一号简正波, 群速度随频率是变化的。这种色散特性结合简正波的幅度可用来反演海底声速和衰减。由简正波理论, 位于深度 z_0 处一简谐点声源激发声场的速度势函数可表示为:

$$\psi(r, z) = \sqrt{\frac{2\pi}{r}} e^{-i(\pi/4)} \sum_n \frac{U_n(z_0) U_n(z)}{k_n^{1/2} N_n} e^{i\mu_n r}, \quad (1)$$

其中 U_n 为简正波 n 阶模态的本征函数, $\mu_n = k_n + i\beta_n$, k_n 为简正波的水平波数, β_n 为简正波的衰减系数:

$$\beta_n = \frac{\omega}{k_n N_n} \int_0^\infty \frac{\rho(z) \alpha(z)}{c(z)} |U_n(z)|^2 dz, \quad (2)$$

N_n 为归一化系数:

$$N_n = \int_0^\infty \rho(z) |U_n(z)|^2 dz, \quad (3)$$

第 n 号简正波的群速度 $V_g^{(n)}$ 的倒数可表示为:

$$\frac{1}{V_g^{(n)}} = \frac{\omega}{k_n N_n} \int_0^\infty \frac{\rho(z)}{c^2(z)} |U_n(z)|^2 dz, \quad (4)$$

一般简正波的群速度很难直接从实验得出, 但简正波的群速度随频率是变化的, 在距离 r 处两个不同频率下的第 1 号简正波的到达时间差为:

$$dT(f) = \left[\frac{1}{V_g^{(1)}(f)} - \frac{1}{V_g^{(1)}(f_H)} \right] r = K_t(f)r, \quad (5)$$

其中 dT 与 r 成正比, 对给定的 - 对频率 f 和 f_H ($f_H > f$), K_t 为常数。同一频率下第 2 号简正波与第 1 号简正波的到达时间差:

$$dT_{21} = \left[\frac{1}{V_g^{(2)}(f)} - \frac{1}{V_g^{(1)}(f)} \right] r = K_{21}r, \quad (6)$$

$K_t^{(e)}$ 和 $K_{21}^{(e)}$ 对海底声速等参数很敏感^[1,2]。如果实验得到 $K_t^{(e)}$ 和 $K_{21}^{(e)}$, 通过调整海底声速 $c(z)$ 和密度 $\rho(z)$, 由 (5) 式和 (6) 式计算得到理论的 $K_t^{(c)}$ 和 $K_{21}^{(c)}$, 使得 $|K_t^{(c)} - K_t^{(e)}|$ 和 $|K_{21}^{(c)} - K_{21}^{(e)}|$ 分别达到最小, 便可反演出海底的声速和密度。第 n 号简正波的幅度 (经过柱面扩展校正后用 dB 表示) 随距离变化应该是一条直线, 其斜率为:

$$K_A = -20 \log_{10}(e) \beta_n, \quad (7)$$

确定出海底密度和声速后, 计算 β_n 的 (2) 式中只有海底衰减系数 α 是未知的。所以通过 K_A 可反演海底衰减参数。

1.2 简正波过滤

由简正波理论, 水听器接收到的声波信号 $p_h(t)$ 可表示为许多垂直方向的简正波的叠加:

$$p_h(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) U_n(z_h), \quad (8)$$

其中 $A_n(t)$ 为简正波系数, z_h 为水听器的深度。简正波本征函数 U_n 满足正交归一化条件:

$$\int_0^\infty \rho(z) U_m(z) U_n(z) dz = \delta_{mn}, \quad (9)$$

给定 $p(z, t)$, $A_n(t)$ 可由算符 $\int_0^\infty (\cdot) \rho(z) U_n(z) dz$ 得到。实验时, 一般声压 $p(z, t)$ 只能是垂直阵在有限数目的深度处测量。所以, 计算简正波系数的积分运算可近似表示为:

$$A_n(t) \approx \sum_{h=1}^{N_h} p(z_h, t) \rho(z_h) U_n(z_h) \Delta z, \quad (10)$$

其中 Δz 为相邻两个水听器之间的间距。只要垂直阵的空间采样足够高, 如 (10) 式的窄带简正波过滤器能很好地滤出低号简正波系数。

2 实验分析及参数反演

实验是在冬季等声速层(海水声速为 1507 m/s)环境下做的,海深约 40 m 左右。船挂 16 阵元垂直阵覆盖了大部分海深 4.4 m ~ 34.6 m,声源为 7 m 深度爆炸的信号弹(由发射船在走航时每 3 min 投一枚)。实验数据处理和海底参数反演的流程图如图 1 所示。图 2 为其中一枚手榴弹信号经简正波过滤后得到的第 1 号和第 2 号简正波时间序列及幅度包络,可以看出两号简正波到达时间的差异。

图 3 给出 4 个不同频率下第 1 号简正波与第 2 号简正波的到达时间差 dT_{21} 随距离的变化。据 (6) 式对实验点进行最小二乘拟合可得 K_{21} (单位 10^{-6} s/m) 在 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 600 Hz 时分别为 2.75, 1.64, 1.20, 0.78。图 4 为第 1 号简正波在两个频率时到达时间差 dT 随距离 r 的变化(本文使用参考频率 $f_H = f + 100$ Hz)。由 (5) 式拟合可得 K_t (单位 10^{-6} s/m) 在 200 Hz, 250 Hz, 300 Hz, 350 Hz 时分别为 0.717, 0.425, 0.343, 0.232。

得到了不同频率下实验的 $K_t^{(e)}(f_i)$ 和 $K_{21}^{(e)}(f_i)$ 后,定义代价函数:

$$\text{Cost}f(\Omega) =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\text{abs}[K_t^{(e)}(f_i) - K_t^{(c)}(f_i, \Omega)]}{\text{abs}[K_t^{(e)}(f_i)] + \text{abs}[K_t^{(c)}(f_i, \Omega)]} + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\text{abs}[K_{21}^{(e)}(f_i) - K_{21}^{(c)}(f_i, \Omega)]}{\text{abs}[K_{21}^{(e)}(f_i)] + \text{abs}[K_{21}^{(c)}(f_i, \Omega)]}, \quad (11)$$

其中 Ω 表示包含待反演的海深、海底声速、密度、沉积层厚度等参数。采用水平不变液态海底模型(如图 5): 海水层、沉积层和一无限大基底共 3 层。则 Ω 包括: 海深 H_1 、沉积层厚度 H_2 、密度 ρ_2 、声速 c_2 、基底的密度 ρ_3 和声速 c_3 等,共计 6 个参数。

使用遗传算法(GA)实现快速寻找一组海底参数 Ω_0 能使 (11) 式的代价函数 $\text{Cost}f$ 达到最小来反演海底参数。反演时 $K_t^{(c)}$ 和 $K_{21}^{(c)}$ 由简正波计算程序^[8] 计算,遗传算法计算时的总人口数为 120,共

遗传 85 代,且通过平行计算多次以确保收敛于同相同的最小值。最终反演结果如表 1(其中第一行为各个参数的取值范围)。

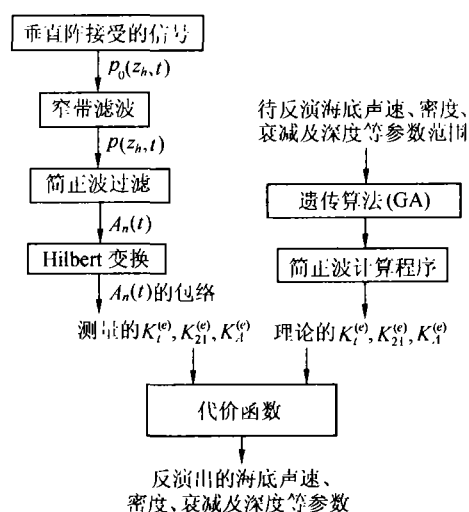


图 1 实验处理及参数反演流程图

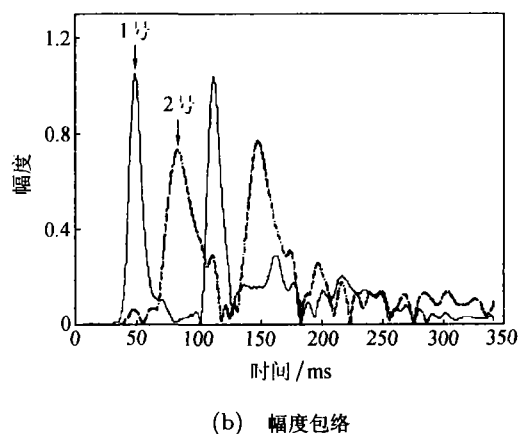
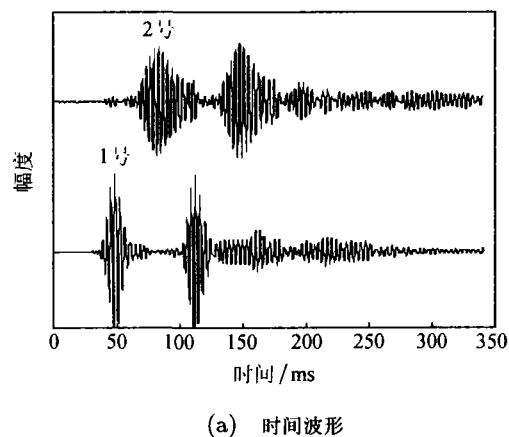


图 2 简正波过滤得到的第 1 号和第 2 号简正波
($r = 12$ m, $f_0 = 300$ Hz)

表 1 输入的海底参数范围及反演结果

参数名称	H_1/m	H_2/m	$\rho_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho_3/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
参数范围	38.0 ~ 42.0	1.0 ~ 20.0	1.5 ~ 1.9	1530 ~ 1640	1.7 ~ 2.3	1600 ~ 2200
反演结果	39.5	4.7	1.67	1576.5	1.98	1677.6

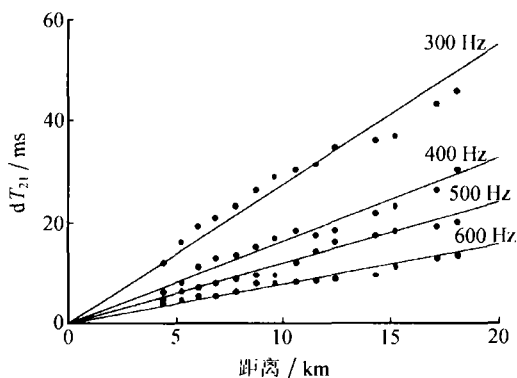
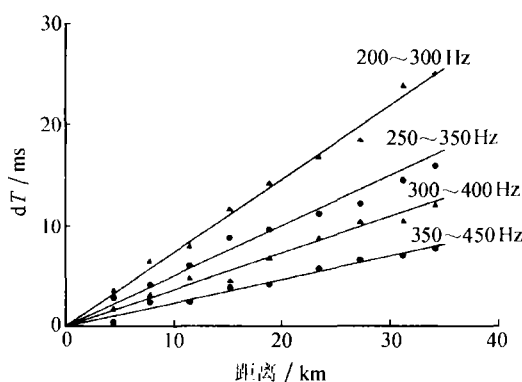
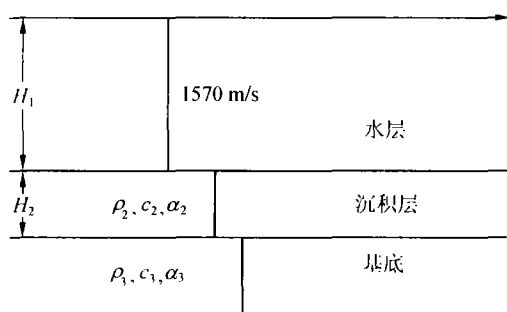
图 3 不同频率时 dT_{21} 随距离 r 的变化图 4 第 1 号简正波时差 dT 随 r 的变化

图 5 双层海底模型

同理, 不同距离下第 1 号简正波经柱面扩展校正后的结果见图 6。其中圆点为实验数据, 直线为线性拟合结果。拟合的斜率 $K_A^{(e)}$ 见表 2。把表 1 中反演出的海底声速、密度等参数带入 (2) 式, 结合 7 式可反演出海底衰减 (反演时令基底的衰减等于沉积层的衰减, 结果见表 2 及图 7)。对其进行指数拟

合可得海底衰减与频率 (单位为 kHz) 的关系为:

$$\alpha = 0.29f^{1.91} \text{ dB/m}. \quad (12)$$

此结果与文献 6 中的很接近。

表 2 斜率 $K_A^{(e)}$ 及反演出的海底衰减

频率	200 Hz	300 Hz	400 Hz	500 Hz
$K_A^{(e)} / (\text{dB}\cdot\text{km}^{-1})$	0.092	0.114	0.106	0.098
$\alpha / (\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$	0.0088	0.0288	0.0512	0.0770

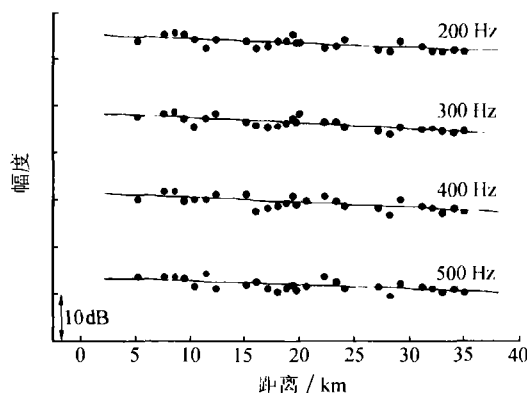
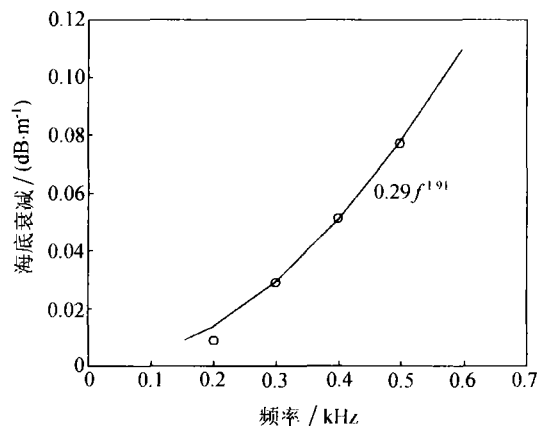
图 6 第 1 号简正波幅度随 r 的变化

图 7 反演出不同频率的海底衰减

图 8 为频率 $f_0 = 200 \text{ Hz}$ 时不同接收深度处的传播损失图, 其中 (a), (b), (c) 相应的深度分别为 34.6 m, 20.5 m, 8.5 m。图 9 为接收深度 $z_r = 20.5 \text{ m}$ 时不同频率下的传播损失。图 8 和图 9 中圆点表示实验数据是经过 100 Hz 带宽平均实验

传播损失结果, 实线为由反演出的海底参数计算的非相干传播损失理论曲线。可以看出, 在 60 km 范围内理论结果与大多数弹的实验结果符合的较好。

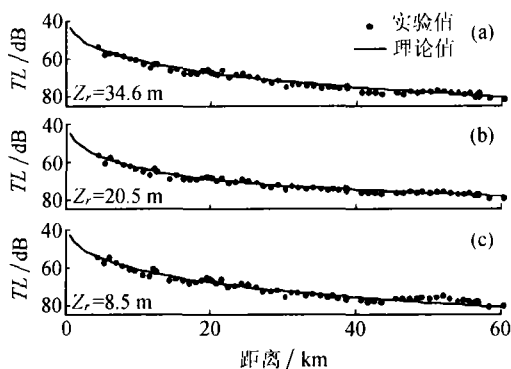


图 8 不同接收深度处的传播损失

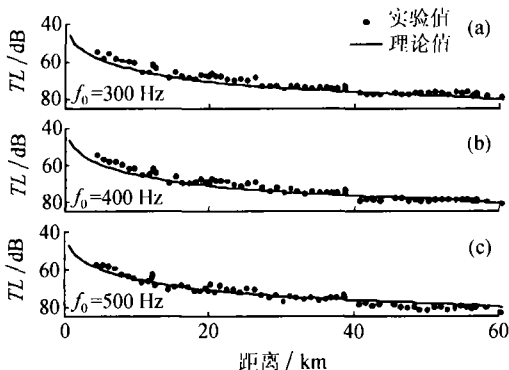


图 9 不同频率的传播损失

3 结论与讨论

本文利用一次冬季浅海远程水声数据, 通过匹配简正波群延时反演出海底的声速、密度等参数, 衰减系数由简正波的能量反演得到。给出 200 ~ 500 Hz 频率范围内实验海区的海底衰减系数, 得出海底衰减随频率的变化关系为 $\alpha = 0.29f^{1.91}$ dB/m。最后给出由反演出的参数计算得到的传播损失与实验的传播损失数据的比较, 在 60 km 范围内理论结果与实验结果符合的较好, 说明反演结果基本上是可

靠的。各号简正波的群速度在大于其截止频率的一段频率范围内随频率的变化较大; 当频率再高时, 群速度随频率变化很小。所以, 用匹配简正波群延时反演海底参数在频率较低时比较适用, 反演时还应综合考虑水文、海深等因素。

4 致谢

作者首先要感谢张仁和院士对本文的指导和帮助, 同时也感谢参加海上实验的全体工作人员, 是他们的辛勤劳动为本文提供大量稳定可靠的实验数据。

参 考 文 献

- 1 ZHANG Rehe, XIAO Jinquan, GONG Min. Analysis of individual modes in shallow water. *Chinese Journal of Acoustics*, 1984; **3**(3): 238—249
- 2 Zhou J X, Zhang X Z, Rogers P H. Geoacoustic parameters in a stratified sea bottom from shallow water acoustic propagation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1987; **82**(6): 2068—2074
- 3 GUO Lianghao, ZHNAG Rehe *et al.* Inversion for sea bottom acoustic parameters using measured modal group time delays. *Shallow-water acoustic (SWAC'97)*, Beijing: China Ocean Press, 1997: 179—184
- 4 Potty G R, Miller J H, Lynch J F, Smith K B. Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000; **108**(3): 973—986
- 5 李整林, 王耀俊, 高天赋, 马 力. 海底沉积物参数对浅海中低频声传播的影响. *声学学报*, 2000; **25**(3): 242—247
- 6 李风华, 张仁和. 由脉冲波形与传播损失反演海底声速与衰减系数. *声学学报*, 2000; **25**(4): 297—302
- 7 Collins M D, Kuperman W A. Nonlinear inversion for ocean-bottom properties. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992; **92**: 1770—2783
- 8 张仁和, 李风华. 浅海声传播的波束位移射线简正波理论. *中国科学, A 辑*, 1999; **29**(3): 241—251