

由脉冲波形与传播损失反演海底声速与衰减系数^{*}

李风华 张仁和

(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)

1999 年 6 月 28 日收到

1999 年 9 月 14 日定稿

摘要 根据黄海中部一次浅海声学实验获得的脉冲波形和传播损失数据进行海底声速和衰减系数的反演。本文在反演过程中: (1) 考虑了海水深度的测量误差对反演结果的影响, 并提出了一种消除该影响的方法。 (2) 反演得到的该海区海底衰减与频率呈非线性关系。 (3) 本文讨论了非均匀海底模型对海底反演结果的影响。

PACS 数: 43.30

Bottom sound speed and attenuation inverted by using pulsed waveform and transmission loss

LI Fenghua ZHANG Renhe

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

Received Jun. 28, 1999

Revised Sept. 14, 1999

Abstract The bottom sound speed and attenuation were inverted by using the pulsed waveform and transmission loss. In the process of the inversion, (1) the effect of the depth of water on the inversion results were discussed and a method for determining the depth of water was given out, (2) the inverted attenuation has nonlinear frequency relationship, (3) the effect of inhomogeneous bottom on the inverted results was discussed.

引言

地声反演是浅海声学中最具挑战的课题之一。地声反演之所以受到持续的重视至少有几个原因: (1) 海底参数很难直接测量, 而这些参数对浅海声传播有重要影响。 (2) 海底衰减随频率的变化规律是目前比较有争议的问题, 需要更多的实验数据来进行分析研究。 (3) 现有的很多反演方法应用于数值模拟时取得很好结果, 但用于处理实验数据时却不很成功, 尤其是对较高频率的实验数据。

一般而言, 地声反演是一个多维问题, 有些海底参量对特定的声信号影响很微弱, 而这些微弱的影响很容易被海洋中的不确定性所掩盖, 所以代价

函数^[1-4]的选取是地声反演的一个重要研究方向。

自从 Collins 等人在地声反演中应用模拟退火算法以来, 诸如模拟退火和遗传算法等全局搜索算法^[8-11]的应用也成为一个重要研究方面。

1996 年 8 年, 中美两国水声学家在远黄海进行了一次联合浅海声学实验。该次实验获得了大量稳定和可靠的实验数据。本文在均匀海底模型的基础上, 根据实验获得的脉冲信号及传播损失数据分别反演实验海区等效的海底声速与衰减。理论与实验结果表明: (1) 用近场脉冲波形反演海底声速时, 海水深度对反演结果有较大的影响。在本文提出的修正海深测量误差的方法的基础上, 反演所得的海底声速与根据海底取样推算的结果接近。 (2) 由传播损失数据估计得到的实验海区海底衰减 (dB/m) 与频

* 本项研究得到国家自然科学基金 (No.19734050) 与美国 ONR 资助

率呈非线性关系。(3) 本文最后还讨论了复杂海底模型对反演结果的影响, 讨论表明, 在均匀海底模型的基础上得到的等效海底参数能较好地预报声场。

1 由脉冲波形反演海底声速

脉冲波形的传播可以用简正波表示为:

$$p(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) \sqrt{\frac{8\pi}{r}} e^{i\pi/4} \sum_l \Phi(z_s, \mu_l) \Phi(z_r, \mu_l) \cdot \sqrt{\mu_l} e^{i\mu_l r - \beta_l r} e^{i\omega t} d\omega, \quad (1)$$

其中 $S(\omega)$ 为声源信号谱, Φ 为本征函数, μ_l 和 β_l 分别为简正波的水平波数与衰减系数。对于近场脉冲波形, 当 $\beta_l r \ll 1$ 时, 可以将 (1) 式中 $\beta_l \approx 0$ 。根据波束位移射线简正波理论, 简正波的水平波数 μ_l 满足^[13]:

$$2 \int_{\zeta}^H \sqrt{k^2(z) - \mu_l^2} dz + \varphi_s(\mu_l) + \varphi_b(\mu_l) = 2l\pi, \quad (2)$$

其中 $\varphi_s(\mu_l)$ 和 $\varphi_b(\mu_l)$ 分别为海面与海底的反射相位, H 为实验海区的平均海水深度。如果声速分布及海水深度 H 已知, 根据 (1) 式和 (2) 式, 我们就可以利用近场脉冲波形确定该海区的海底反射相位, 进而确定海底声速。但是由于潮汐等因素引起平均海深的变化, 需要实时和准确地测定海深。下面我们将讨论海深的测量误差对反演结果的影响以及对该误差进行修正的方法。

设实验海区的平均海深为 H , 而测深仪得到的海深为 H_1 , 则海深的修正值为:

$$\Delta \equiv H - H_1. \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (2) 式, 可近似得到:

$$2 \int_{\zeta}^{H_1} \sqrt{k^2(z) - \mu_l^2} dz + \varphi_s(\mu_l) + \varphi_b(\mu_l) + 2k(H)\Delta \sin(\theta_l) = 2l\pi, \quad (4)$$

其中 $\theta_l = \arccos(\mu_l/k(H))$ 。 $\varphi_b(\mu_l) + 2k(H)\Delta \sin(\theta_l)$ 定义为等效的海底反射相位, 如图 1 所示。

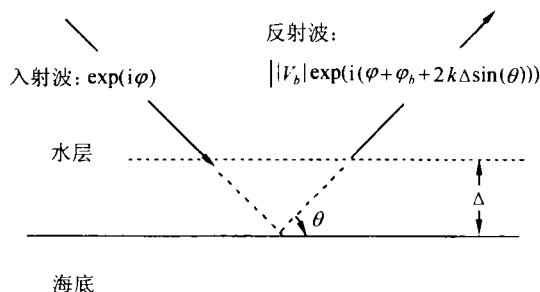


图 1 海底等效反射相位示意图

对均匀海底, 在小掠射角的条件下, 海底反射相位近似有^[12]:

$$\varphi_b(\mu_l) \approx \frac{2\rho_b}{\sqrt{1 - (c(H)/c_b)^2}} \sin(\theta_l) - \pi, \quad (5)$$

c_b 是海底声速, $c(H)$ 是海水与海底界面处海水的声速, θ_l 定义如上文。因此等效海底反射相位可近似为:

$$\varphi_b(\mu_l) + 2\Delta k(H) \sin(\theta_l) \approx A \sin(\theta_l) - \pi, \quad (6)$$

其中:

$$A = 2k(H) \times \Delta + \frac{2\rho_b}{\sqrt{1 - (c(H)/c_b)^2}}. \quad (7)$$

将 (6) 式代入 (4) 式得:

$$2 \int_{\zeta}^{H_1} \sqrt{k^2(z) - \mu_l^2} dz + \varphi_s(\mu_l) + A \sin(\theta_l) - \pi = 2l\pi. \quad (8)$$

从式 (7) 与 (8) 式看出, 海深的测量误差会对本征值的计算有影响, 因而也会影响海底参数的反演结果。为了消除测量误差对反演结果的影响, 我们采取如下的反演步骤:

(1) 计算数值模拟的与实验测量的脉冲波形的波形相关:

$$C(A) = \left[\sum_n^N \frac{\left| \int_0^T p_n(t, A) f_n(t) dt \right|}{\sqrt{\int_0^T p_n^2(t, A) dt \int_0^T f_n^2(t) dt}} \right] / N. \quad (9)$$

由 $C(A)$ 的最大值确定 (8) 式中的 A 值。其中 (9) 式中的 $p_n(t)$ 和 $f_n(t)$ 分别为第 n 个接收器所对应的数值与实测的波形, N 为共使用接收器数目。

(2) 根据 (7) 式, 在均匀海底模型的假设下, A 是频率的线性函数, 其斜率为 $4\pi\Delta/c(H)$ 。由多个频率信号反演得到的 A 可以得到 A 对频率的斜率, 进而确定海深的修正值 Δ , 并获得实验海区的实际平均海水深度 H 。

(3) 将 A 与 Δ 代入 (7) 式, 确定海底声速。

图 2 给出了在 '96 中美远黄海浅海声学实验中实测的海水声速剖面。实验中使用深度为 48 m、50 m 和 52 m 的三个水听器接收信号, 声源为在 50 m 深度爆炸的信号弹, 声源与接收器的距离为 2620 m。图 3 给出了一组实测信号的前 20 ms 波形, 其频带为 850 ~ 1150 Hz。测深仪得到的海深 $H_1 = 76$ m, 底质取样得到的密度为 1.85 g/cm³。

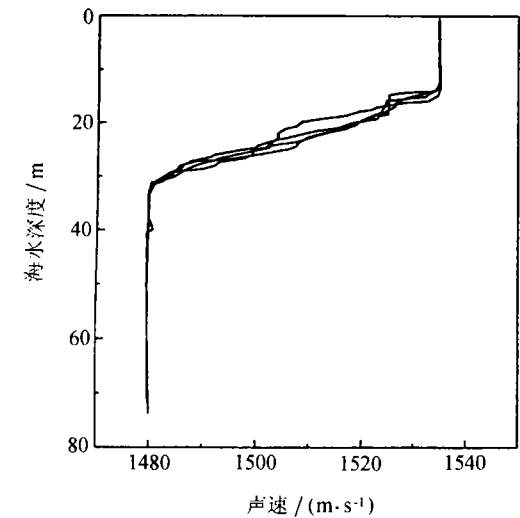


图 2 实验测量的声速剖面

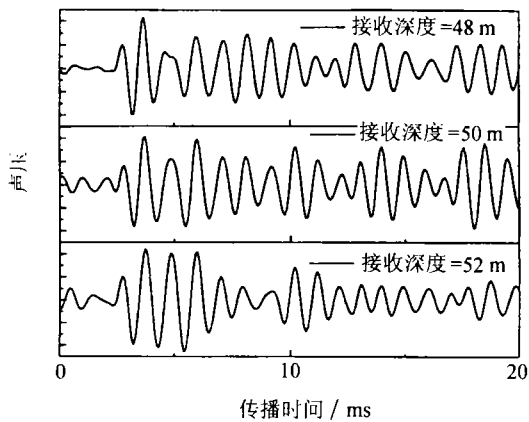


图 3 实测信号的前 20 ms 波形，频带为 850 ~ 1150 Hz

图 4 给出根据反演步骤 1 获得的不同频率的 A 值，其中同一频率上不同点表示用不同的信号弹的反演结果。

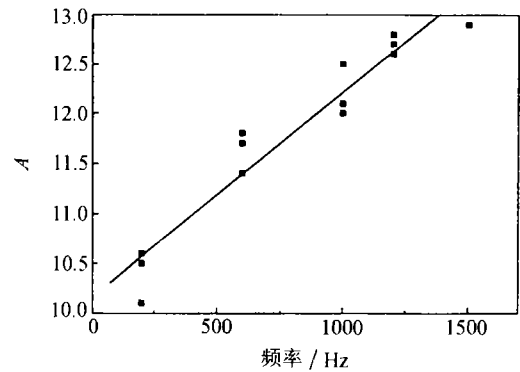


图 4 实验脉冲波形反演获得的不同频率的 A

图 4 中斜率由 H_1 与 H 的差 Δ 引起的，根据反演步骤 2，由这个斜率确定海深的修正值为 $\Delta = 0.2$ m，因此实验海区实际平均水深为 $H = 76.2$ m。应当指

出，若不考虑 0.2 m 的海深修正，则海底声速的反演结果对频率不稳定，并在 1000 Hz 时可引起 30m/s 的误差。

将图 4 中的 A 及上面确定的 Δ 代入 (7) 式，就可以确定海底声速。表 1 列出了海底声速的估计结果，其中海底声速的平均值为 1587 m/s，均方根误差为 6m/s。在该区域的海底采样结果为平均颗粒直径与中值粒径分别为 0.0476 mm 与 5.43 ϕ ，该种海底对应的声速大约为 1600 m/s^[14]，与本文的海底反演结果比较接近。图 5 给出了一对实验测量与数值模拟的脉冲波形的比较，其波形相关为 0.88。

表 1 三发信号弹各频率的海底声速 (m/s) 的反演结果

	200 Hz	600 Hz	1000 Hz	1200 Hz	1500 Hz
信号弹 1	1589	1587	1589	1584	1593
信号弹 2	1587	1579	1593	1583	
信号弹 3	1601	1581	1581	1588	
平均声速	1587				
均方根误差	6				

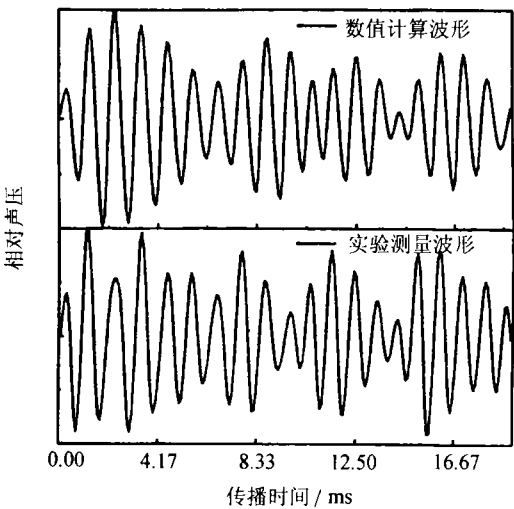


图 5 实验测量与数值模拟的脉冲波形的比较

2 由传播损失反演海底衰减

在已估计得到海底声速的条件下，再根据传播损失来反演海底衰减。定义实测与数值模拟的传播损失之差为 $\Delta TL(r) = TL_{\text{数值}}(r) - TL_{\text{实测}}(r)$ ，令 $\overline{\Delta TL}$ 为不同距离上 $\Delta TL(r_i)$ 的平均值，定义 $\Delta TL(r)$ 的

标准偏差为:

$$E(\alpha) = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (\Delta TL(r_i) - \overline{\Delta TL})^2 / (N - 1) \right]}, \quad (10)$$

调节海底衰减 α 的数值, 使标准偏差 $E(\alpha)$ 最小时, 该数值就作为海底衰减的估计值。

实验中, 在 5 个距离 (2.62 km、3.93 km、5.77 km、9.55 km 和 12.86 km) 上进行了定点投弹实验, 每个距离上投 5 枚信号弹。图 6 给出频率为 1000 Hz 时代价函数随海底衰减的变化关系, 其中声源与接收器分别位于 50 m 与 8 m。从图 6 可以看出, 对应频率 1000 Hz, 当海底衰减为 0.43 dB/λ 时 $E(\alpha)$ 最小。

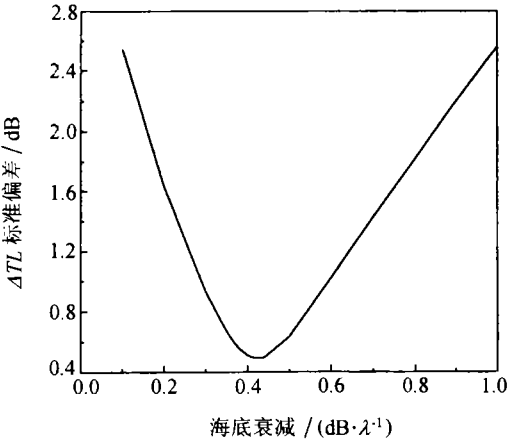


图 6 频率为 1000 Hz 时代价函数 $E(\alpha)$ 随海底衰减的变化关系

图 7 给出了根据不同频率实验信号反演所得的不同频率所对应的海底衰减。从图可以归纳得出本文反演所得的海底衰减随频率关系可表示为:

$$\alpha = 0.45 f^{0.93} \text{ dB}/\lambda, \text{ 或者 } \alpha = 0.28 f^{1.93} \text{ dB}/\text{m}, \quad (11)$$

(频率单位为 kHz)。

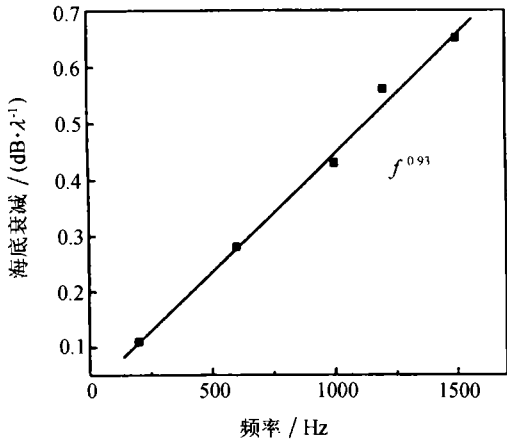


图 7 反演所得的海底衰减与频率的关系

图 8 与 9 分别给出了不同频率与不同收发深度对应的传播损失实验值与计算值的比较。图中黑方块是经过 1/3oct 平均的实验传播损失结果, 曲线是根据上面反演所得的海底声速与衰减计算的经过 1/3oct 平均的传播损失曲线。在图 8 中 600 Hz、1000 Hz、1200 Hz 和 1500 Hz 的传播损失结果分别向下平移了 10 dB、20 dB、30 dB 和 40dB。从图看出, 理论与实验数据符合的比较好。

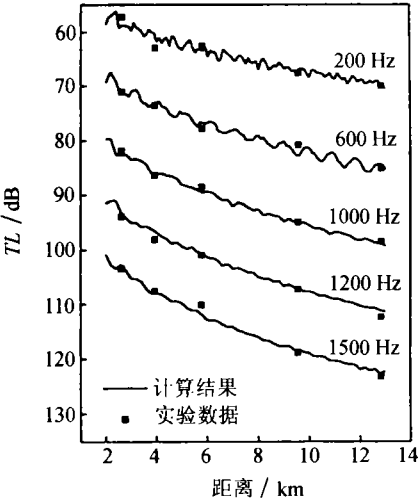


图 8 不同频率对应的实验与计算的传播损失的比较
声源深度 50 m, 接收器深度 8 m。

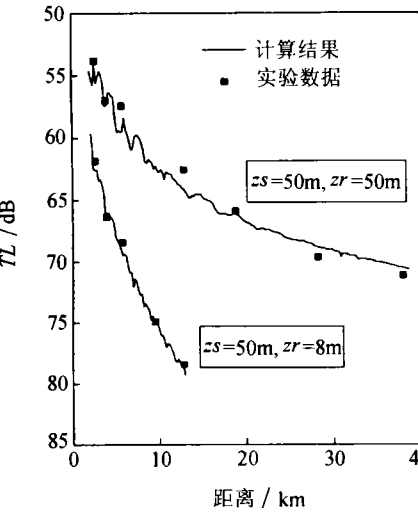


图 9 不同收发深度对应的实验与计算的传播损失的比较
频率为 1000 Hz

图 10 给出了本文反演所得的海底衰减与 Hamilton 等作者^[14-17] 的结论的比较。Hamilton^[14] 等人在大量的实验数据的基础上, 得出了在 10^{-2} Hz 至 10^6 Hz 频率范围内海底衰减 (单位: dB/m) 随频率呈一次方关系。但是有一些作者^[15-17] 在 10^1 Hz 至 10^3 Hz 频率范围内获得的海底衰减支持 Stoll 的非线性模型。本文的数据与 Stoll 的结论比较一致。

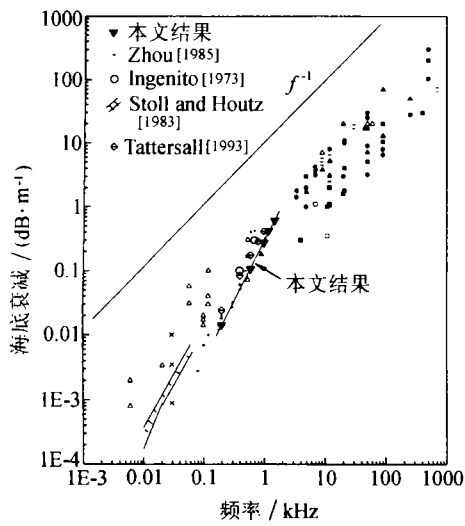


图 10 海底衰减与 Hamilton 等作者的结论的比较

3 海底模型对反演结果的影响

任何海底参数的反演方法都要以一定的海底模型为基础，模型的好坏取决于是否能解释所关心的物理现象，并非模型越复杂越好，也不是反演参数越多越好。应当是反演那些对所关心的物理现象影响最敏感的参数。

图 11 给出了两种常见的海底模型：(a) 即是本文使用的均匀海底模型，(b) 是目前使用比较广泛的两层海底模型。虽然均匀海底模型比两层海底模型简单，但是理论^[18,19]证明：当对声场有主要贡献的简正波海底掠射角小于海底特征角 α_c 时，均匀海底模型与两层海底模型等效。海底特征角 α_c 定义为：

$$\alpha_c = \arccos \left(\frac{c_0}{c_1} \sqrt{1 + \left(-\frac{3c_1}{2\omega} \chi \right)^{2/3}} \right), \quad (12)$$

其中 c_0 和 c_1 分别为海水与海底声速， ω 为角频率， $\chi = (k^2(z) - k_1^2)/(k_1^2 z)$ 。

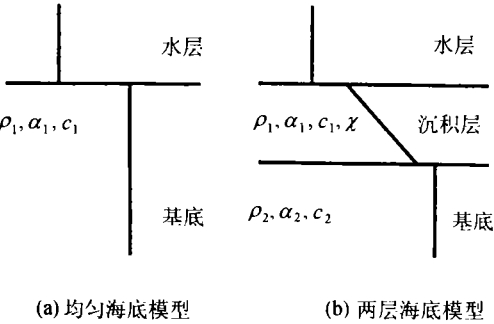


图 11 两种常见的海底模型

表 2 给出了由公式 (12) 计算的两层海底模型 (b) 在不同频率的海底特征角 α_c ，其中 $\chi = -0.0063 \text{ m}^{-1}$ ，

c_0 与 c_1 分别取为 1480 m/s(海水声速的实测结果)，1587 m/s(表层海底声速的反演结果)。

表 2 不同频率与梯度对应的海底特征角
(c_1 为 1587 m/s, c_0 为 1480 m/s)

频率	200 Hz	600 Hz	1 kHz	1.2 kHz	1.5 kHz
$\alpha_c(\text{度})$, ($\chi = -0.0063 \text{ m}^{-1}$)	16.95	19.23	19.81	19.96	20.13

* $\chi = -0.0063 \text{ m}^{-1}$ 时，沉积层声速梯度大约相应于 5 s^{-1} 。
(文献上大多数沉积层表层声速的平均梯度小于 5 s^{-1} ^[14])

当声源与接收器皆位于温跃层下时，由接收的脉冲信号长度估计声波的最大掠射角为 $\arccos(1 - t/(r/c))$ ，其中 r 是声源与接收器之间的距离， c 是海水声速， t 是信号长度。因此，按 $t = 20 \text{ ms}$ 计算可得到在第 2 节中所有信号的最大的掠射角约为 8.6 度。

当声源或接收器位于温跃层上时，声场的有效掠射角近似为 $\arccos(c(H)/c(0))$ ，在本次实验中约为 16 度。

从表 2 可以看出：如果波数平方梯度大于 -0.0063 m^{-1} (或者说，声速梯度小于 5 s^{-1})，对本文所分析信号的频率范围，均匀海底与两层海底模型对声场的影响是等效的。

4 讨论与结论

本文利用 ‘96 中美远黄海浅海声学实验所获得的脉冲波形及传播损失对海底参数进行了反演，反演结果稳定，图 5、图 8 和图 9 表明：基于均匀海底模型的反演得到的该实验海区等效的海底参数能很好的应用于脉冲波形与传播损失的数值预报。同时，反演结果也显示：

(1) 近场脉冲波形可以用来反演海底声速。在均匀海底模型的基础上，本文提出了对海深进行修正的方法。反演所得的海底声速与海底取样的颗粒直径参数推算的海底声速相近。

(2) 本文利用海底损失反演所得的该实验地区的衰减 (dB/m) 与频率呈非线性关系，这个结果与 Stoll 的理论比较接近。

(3) 本文同时讨论了非均匀海底对反演结果可能的影响。分析表明，在本实验区域，均匀海底模型能很好地解释所讨论频率范围的脉冲波形与传播衰减规律。

参 考 文 献

- 1 Shaw P R, Orcutt J A. Waveform inversion of seismic refraction data and application to young pacific crust. *Geophys.J.R. Astron. Soc.*, 1985; **82**: 375—414
- 2 Carbone N M, Deane G B, Buckingham M J. Estimating the compressional and shear wave speeds of a shallow water seabed from the vetical coherence of ambient noise in the water column. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998; **103**(2): 801—813
- 3 Yang T C, Yates T. Improving the sensitivity of full-field geoacoustic inversion for estimating bottom sound speed. Full field inversion methods in ocean and seismo-acoustics, Diachok O eds., Kluwer Academic Publishers.
- 4 Clinton Siedenbureg, Norm Lehtomaki, Juan Arvelo. Iterative full-field inversion using simulated annealing.
- 5 Jesus S M. A sensitivity study for full-field inversion of geoacoustic data with a towed array in shallow water. Full filed inversion methods in ocean and seismo-Acoustics, Kluwer Academic publishers, 1995: 109—114
- 6 Basu A, Frazer L N. Rapid determination of the critical temperature in simulated annealing inversion. *Science*, 1990; **249**: 1409—1412
- 7 Sen M K, Stoffa P L. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing. *Geophysics*, 1991; **56**: 1624—1638
- 8 Lindsay C E, Chapman N R. Matched field inversion for geoacoustic modal parameter using adaptive simulating annealing. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1993; **18**: 224—231
- 9 Collins M D, Kuperman W A. Nonlinear inversion for ocean-bottom properties. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992; **92**: 2770—2783
- 10 Cary W, Chapman C H. Automatic 1-D inversion of marine seismic refraction data. *Geophys. J.*, 1988; **93**: 527—546
- 11 Rajan S D. Determination of geoacoustic parameters of the ocean bottom—data requirements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992; **92**: 2126—2140
- 12 布列霍夫斯基著, 杨训仁译. 分层介质中的波. 北京: 科学出版社, 1980
- 13 R.Zhang. The normal mode sound field in shallow water having negative gradient. *Acta Acoustica*, 1965; **2**: 24—28
- 14 Hamilton E L. Geoacoustic modeling of the seafloor. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1980; **68**: 1313—1340
- 15 ZHOU Jixun, ZHNAG Xuezhao, Rogers P H, Jacek Jarzynski. Geoacoustic parameters in a stratified sea bottom from shallow water acoustic propagation. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1987; **82**(6): 2068—2074
- 16 Stoll R D, Houtz R E. Attenuation measurement with sonobuoys. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1983; **73**: 163—172
- 17 Tattersall J M, Chizhik D, Cole B F *et al.* The effect of frequency-dependent bottom reflectivity on transmission loss in shallow water over a sandy bottom. preceeding in 125th Meeting of the Acoustical Society of America, 1993
- 18 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, 1997; **27**: 241—251
- 19 ZHANG Renhe, LI Fenghua, LUO Wenyu. Effects of source position and frequency on geoacoustic inversion. *J. Computational Acoustics*, 1998; **6**: 245—257