由矢量水听器阵列反演浅海地声参数

彭汉书[1,2], 李风华[1]
(1. 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; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 基于矢量水听器能够比传统的声压水听器提供更多的声场信息,文章提供了一种利用矢量水听器阵列(AVS)进行浅海地声参数反演的方法。首先,对声场矢量的传播规律进行了研究;其次,利用矢量匹配场(MFP)方法进行了海底声速的反演;最后利用声压和质点垂直振速的传播损失差反演了海底吸收。基于矢量水听器的海底参数反演方法主要具有下述优点:一是利用矢量匹配场反演海底声速能够有效减小参数估计误差;二是利用声场矢量传播损失差进行海底吸收反演能够排除信号源级起伏对反演的干扰。实验结果表明,基于矢量水听器阵列的海底参数反演能够很好的进行声场传播预报工作。

关键词: 矢量水听器;地声参数反演;匹配场(MFP)
中图法分类号: O427.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2008)-02-0163-05

Geoacoustic inversion from vector hydrophone array in shallow water

PENG Han-shu[1,2], LI Feng-hua[1]
(1. National Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: A geoacoustic inversion scheme, which is by virtue of -a vector hydrophone array, has been proposed based on the fact that the vector hydrophone can provide more acoustic field information than the traditional pressure hydrophone. The transmission losses of particle velocities is discussed. The sediment sound speed is acquired by a matched-field processing(MFP) procedure, which is the combined optimization of the pressure field and vertical velocity field. And the bottom attenuation can be estimated from the difference between transmission loss of the the vertical velocity and that of the pressure. The inversion method based on vector hydrophone array mainly has two advantages: one is that the MFP method based on the vector field can decrease the uncertain estimation of the sediment sound speed; the-another is that the inverted sediment attenuation is independent of source level. The validity of the inverted parameters have been examined by-comparing-numerical results and experimental data.

Key words: vector hydrophone; geoacoustic inversion; matched-field processing (MFP)

1 引 言

地声参数反演是指利用测量到的声场信息来估计海底声速、海底密度和海底吸收等参数,这些参数大多不能通过海底取样直接来获得,所以近些年来人们对于地声参数反演研究给予了极大关注[1-9]。随着制作工艺以及信号处理技术的不断进步,矢量水听器在水声领域的应用研究已经取得了大量成果,然而利用矢量水听器进行海底参数反演的相关工作却极为少见。由于矢量水听器在进行声场声压测量的同时还同步直接或间接地进行了质点振速的测量,利用其提供的更多的声场信息进行地声参数反演势必能取得比较理想的效果。

收稿日期: 2007-3-23; **修回日期**: 2007-8-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(10574136)
作者简介: 彭汉书(1979-),男,山东郓城人,博士研究生,研究方向为水声物理和水声信号处理。
通讯作者: 李风华, E-mail: lfh@mail.ioa.ac.cn

本文利用矢量水听器阵列进行了地声参数的反演研究。首先，对声场矢量的传播规律进行了研究；其次，利用矢量匹配场方法进行了海底声速的反演；最后利用声压和质点垂直振速的传播损失差进行了海底吸收的反演。实验结果表明，基于矢量水听器的浅海地声参数反演工作能够很好的进行浅海声场预报工作。

2 浅海声场矢量传播理论

根据简正波理论[10]，声场中简谐点源激发的声压、水平振速和垂直振速分别表示为：

$$p(r,z)=\frac{i}{\rho\sqrt{8\pi r}}e^{i\pi/4}\sum_l \psi_l(z_s)\psi_l(z)\cdot \frac{1}{\sqrt{v_l}}e^{-i\mu_l r}e^{-\beta_l r} \tag{1}$$

$$v_r(r,z)=\frac{i}{\rho^2\omega\sqrt{8\pi r}}e^{i\pi/4}\sum_l \psi_l(z_s)\psi_l(z)\cdot \sqrt{v_l}\,e^{-i\mu_l r}e^{-\beta_l r} \tag{2}$$

$$v_z(r,z)=\frac{1}{\rho^2\omega\sqrt{8\pi r}}e^{i\pi/4}\sum_l \psi_l(z_s)\psi'_l(z)\cdot \frac{1}{\sqrt{v_l}}e^{-i\mu_l r}e^{-\beta_l r} \tag{3}$$

其中，$v_l=\mu_l+i\beta_l$ 表示简正波的复本征值，本征值实部 μ_l 表示水平波数，本征值虚部 β_l 表示简正波衰减，$\psi_l(z_s)$ 表示本征函数，$\psi'_l(z)=(\partial/\partial z)\psi_l(z)$ 是其在 z 方向的导数。

声场中声压、水平振速和垂直振速的传播损失分别定义如下：

$$TL_p=-20\lg\left|\frac{p(r,z)}{p_0(r=1)}\right| \tag{4}$$

$$TL_{V_r}=-20\lg\left|\frac{V_r(r,z)}{V_{r0}(r=1)}\right| \tag{5}$$

$$TL_{V_z}=-20\lg\left|\frac{V_z(r,z)}{V_{r0}(r=1)}\right| \tag{6}$$

其中，参考声压 $p_0(r)=\frac{e^{ik_0 r}}{4\pi r}$，参考质点振速 $V_{r0}(r)=\frac{k_0}{\rho\omega}\frac{e^{-ik_0 r}}{4\pi r}$，$TL_p$、$TL_{V_r}$ 和 TL_{V_z} 分别表示声场中声压、水平振速和垂直振速的传播损失。

根据简正波理论，在相同传播条件下，声场中的高号简正波因其掠射角较大，故对质点垂直振速的贡献较大而对质点水平振速的贡献较小；同理，低号简正波因其掠射角较小，故对质点水平振速贡献较大而对质点垂直振速贡献较小。因此，在质点垂直振速中将包含较大比例的高号简正波信息，而高号简正波在远程传播过程中受海底作用明显，故质点垂直振速的衰减要比声压和水平振速的衰减大，而质点水平振速的衰减和声压的衰减相似。

3 浅海声场矢量传播试验

2006 年 9 月在黄海进行的浅海声场传播实验中采用矢量水听器进行了信号接收。4 个矢量水听器在垂直方向形成了一个阵列，从上到下其深度依次为 4.13m、9.17m、19.38m 和 29.42m。实验布置如图 1 所示。实验海区的声速分布如图 2 所示。

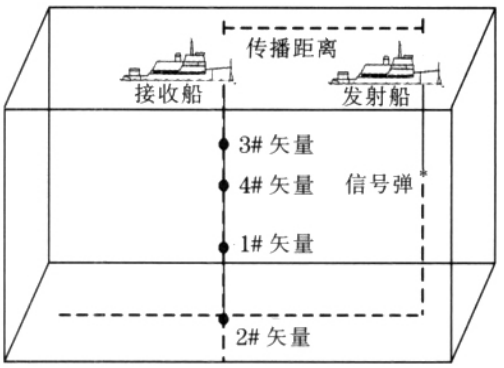

图 1 实验模型
Fig.1 Experiment model

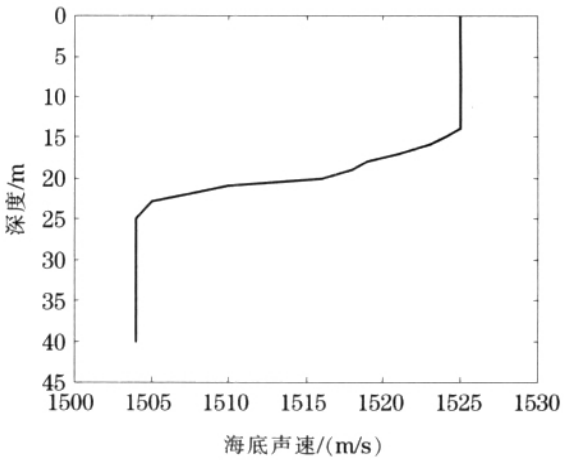

图 2 声速剖面
Fig.2 Sound speed profile

试验期间发射船进行了传播投弹，在 30km 内共投掷了 20 枚信号弹，声源爆炸深度为海底。图 3 给出了深度 29.42m 处的 2 号矢量水听器在 18km 处接收到的信号波形，信号中心频率 400Hz、1/3 倍频程带宽。其中声压信号为水听器记录的原始信号，而振速信号则是对矢量水听器接收到的加速度信号进行积分后的结果。

根据矢量阵列接收到的信号进行传播损失计

算，图 4 给出了中心频率 400Hz 时深度为 29.42m 的矢量水听器接收到的各信号弹的矢量传播损失，其中‘+’、‘▽’和‘o’分别表示质点水平振速、质点垂直振速和声压的传播损失，同时给出了相应的数值仿真计算结果。从图可以看出对于矢量声场，水平振速具有和声压相同的传播规律而垂直振速则比二者衰减的更为迅速。这说明质点垂直振速在浅海远程传播条件下受海底作用明显，本文将利用垂直振速和声压间的传播损失差进行海底吸收的反演。

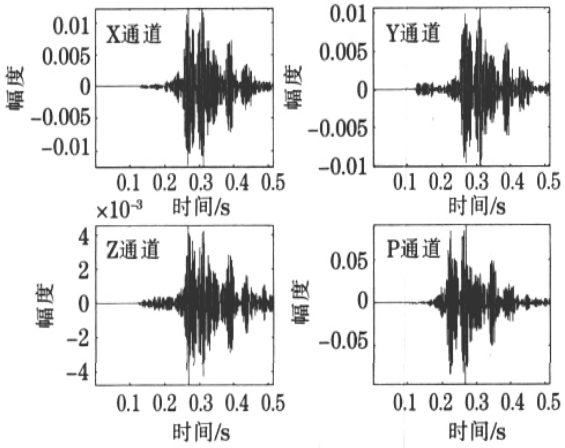

图 3　矢量实验信号

Fig.3　Vector experimental signal

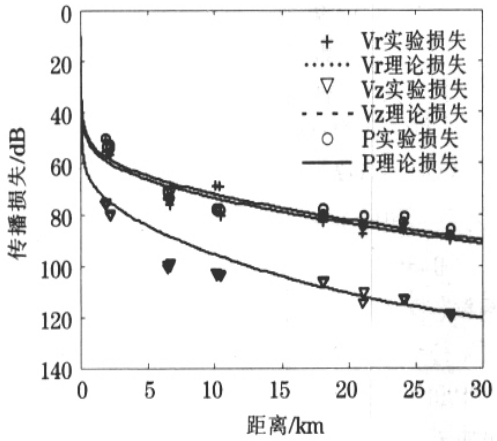

图 4　矢量传播损失

Fig.4　Vector transmission loss

4　利用声场矢量反演浅海地声参数

本文采用的是单层均匀海底模型，包括海底声速、海底密度和海底吸收等参数。同时，根据 2002 年临近海区的同底质采样试验可以得到海底密度 [5]ρ_b= 1.78g/m³，本文将重点进行海底声速和海底吸收的反演。考虑到不同的反演方法对不同声学参数的灵敏度有很大差异，本文将结合不同的反演方法进行反演。

由于目标函数对于海底声速有着较高的灵敏度，匹配场反演近些年来已得到了广泛的应用。然而大量的研究工作都采用声压场匹配，而海底声速对于声压匹配场并非特别敏感，所以容易带来较大的估计误差。由于矢量水听器能够提供更多的声场信息，所以本文将采用声矢量场匹配进行海底声速反演。还有，相关研究表明海深的测量误差将对反演结果产生较大的影响[1]，本文同时进行了海深的反演。基于声压匹配的代价函数 $E_p(c_b, h_b)$ 和基于质点垂直振速匹配的代价函数 $E_{v_z}(c_b, h_b)$ 分别表示为：

$$E_p(c_b, h_b) = \frac{1}{M_f}\sum_{j=1}^{M_f}\left\{\frac{\left|\sum_{i=1}^{N} p_i^e(f_j)^* p_i^c(f_j, c_b, h_b)\right|^2}{\left[\sum_{i=1}^{N}|p_i^e(f_j)|^2\right]\left[\sum_{i=1}^{N}|p_i^c(f_j, c_b, h_b)|^2\right]}\right\} \quad (7)$$

$$E_{v_z}(c_b, h_b) = \frac{1}{M_f}\sum_{j=1}^{M_f}\left\{\frac{\left|\sum_{i=1}^{N} v_{zi}^e(f_j)^* v_{zi}^c(f_j, c_b, h_b)\right|^2}{\left[\sum_{i=1}^{N}|v_{zi}^e(f_j)|^2\right]\left[\sum_{i=1}^{N}|v_{zi}^c(f_j, c_b, h_b)|^2\right]}\right\} \quad (8)$$

其中，$p_i^e(f_j)$ 和 $v_{zi}^e(f_j)$ 分别表示第 i 号矢量水听器在实验过程中接收到的声压信号和质点垂直振速信号，* 表示共轭，$p_i^c(f_j, c_b, h_b)$ 和 $v_{zi}^c(f_j, c_b, h_b)$ 是其在海底声速与海深分别取 c_b 和 h_b 时所对应的理论估计值，N 表示反演所用到的矢量水听器个数，M_f 表示计算频率的个数。前面已经提到，声压和水平振速将提供较多声场水平方向的信息而垂直振速则包含更多声场垂直方向的信息，因此将声压场和质点垂直振速场加以综合考虑将更接近于真实场。本文定义最终的代价函数 $E(c_b, h_b)$ 如公式(9)所示。不难看出，这一代价函数是对声压场和质点垂直振速场的联合匹配，我们称之为矢量场匹配。

$$E(c_b, h_b) = \sqrt{E_p(c_b, h_b)\cdot E_{v_z}(c_b, h_b)} \quad (9)$$

为了更好的说明利用矢量场进行海底声速反演的优势，本文首先通过数值仿真算例对声压场匹配结果和矢量场匹配结果进行了比较，如图 4 和图 5所示。其中，海底声速和海深的实际值分别为 1 580m/s 和 40m，计算频段为 200Hz~300Hz，海水声速垂直分布如图 2 所示。图 5 和图 6 的横坐标表示的是海底声速的取值范围，纵坐标则表示的是海深的取值范围，如果将目标函数取值在 0.9 到 1.0 之间定义为参数估计区域，那么可以得到利用声压场匹配进行海底声速反演的估计误差范围为±30m/s（图 5），而利用矢量场反演时相应的误差范围则为±10m/s（图 6），由二者比较可以看出利用匹配矢量场进行

反演所得到的结果的误差范围得以较大减少。

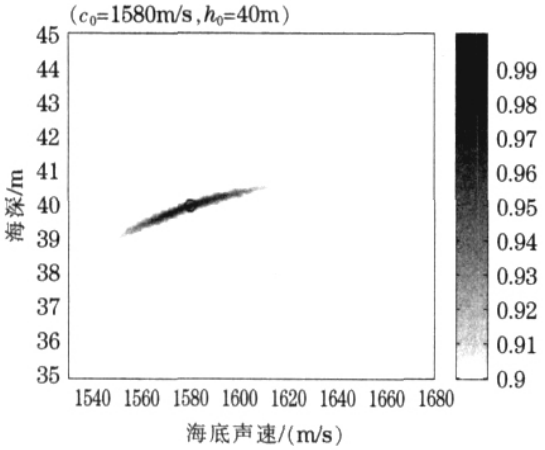

图 5 利用声压场 MFP 仿真结果

Fig.5 Simulative MFP by pressure field

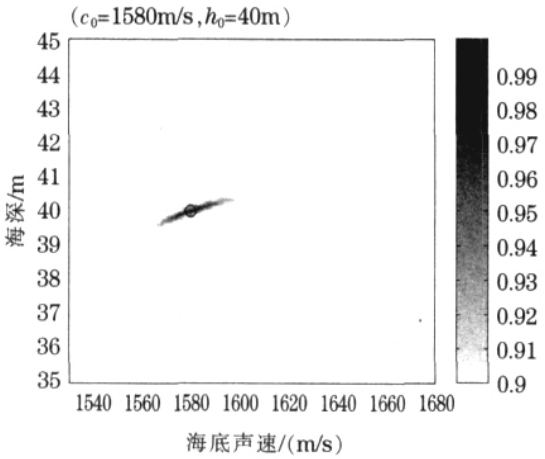

图 6 利用矢量场 MFP 仿真结果

Fig.6 Simulative MFP by vector field

进而将声压场匹配和矢量匹配反演方法分别用于本次试验，结果如图 7 和图 8 所示。同样如果将参数估计区域选定为目标函数峰值以下 0.05 以内，显然，通过矢量场进行匹配场反演将会大大降低参数估计范围，从而减小了估计误差。于是从图 7 我们得到本次反演的最终结果为 c_b=1582m/s、h_b=40.2m.

海底密度、海底声速得到以后，本文下面的工作将是进行海底吸收的反演。质点垂直振速在远程传播过程受海底作用明显，衰减较快，利用质点垂直振速和声压的传播损失差($\Delta TL=TL_{V_z}-TL_P$)能够很好的反演海底吸收。由于这种反演方法所需要的仅仅是同一试验信号垂直振速通道和声压通道的传播损失差值，而并不需要提供信号源级信息，从而避免了因爆炸信号的源级起伏所带来的反演误差(这一点在试验中往往不可避免)。代价函数定义如下：

$$\varepsilon(\alpha_b)=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{Nr}[\Delta TL^c(\alpha_b)-\overline{\Delta TL^e}]^2\right)/(Nr-1)} \quad (10)$$

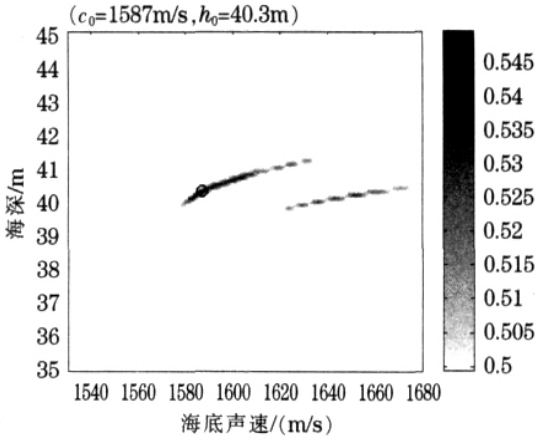

图 7 利用声压场 MFP 试验结果

Fig.7 Experimental MFP by pressure field

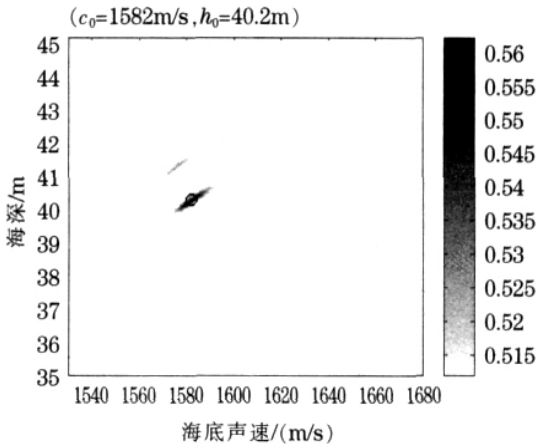

图 8 利用矢量场 MFP 试验结果

Fig.8 Experimental MFP by vector field

其中，ΔTL^e 和 ΔTL^c 分别表示 ΔTL 的实验值和理论值，$\overline{\Delta TL^e}$ 是相同距离处的信号平均结果。

图 9 给出了中心频率为 400Hz 时所选取的代价函数 ε 随海底衰减系数 α_b 变化的规律，在最小的处可以得到海底衰减系数 α_b=0.058dB/m。最终可得到在 100Hz~1000Hz 频段内的海底衰减系数的反演结果如图 10 所示。对结果进行曲线拟合将得到下式：

$$\alpha=0.479f^{0.81} \quad (dB/\lambda)$$

或 $$\alpha=0.303f^{1.81} \quad (dB/m) \quad (11)$$

其中，频率的单位是 kHz。拟合曲线和试验结果比较吻合，由此可见在 100Hz~1000Hz 频段内海底吸收和频率呈现非线性关系，这与很多相关文献的结论是一致的[1,5-7]。实际上，等效海底吸收在较低频段内是经常呈现非线性关系的。

5 反演结果验证

根据利用矢量水听器反演所得到的海底参数进行了试验传播距离上的数值仿真，并与本次试验由

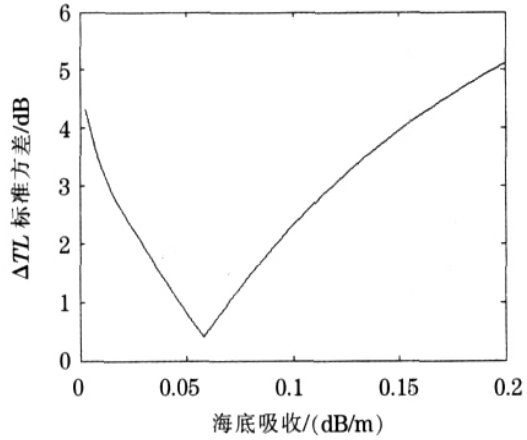

图 9　ΔTL的标准偏差随α_b的变化

Fig.9　Standard deviation of ΔTL as a function of α_b

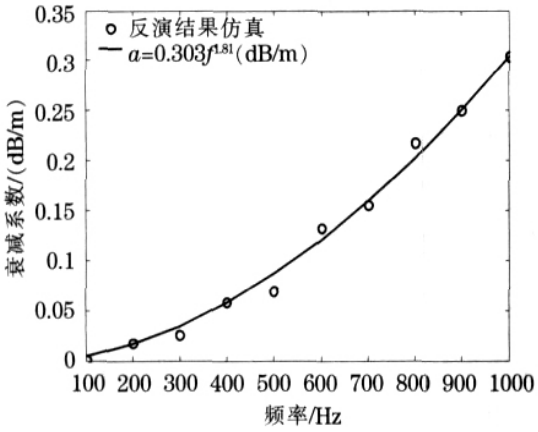

图 10　海底衰减系数随频率的变化

Fig.10　Inverted attenuation as a function of frequency

普通声压水听器组成的垂直阵接收到的数据进行了比较。图 11 给出了中心频率 400Hz、1/3 倍频程带宽内的结果，参照图 2 所示的声速垂直分布剖面，选取深度为 3.07m(跃层上方)和深度为 32.7m(跃层下方)处的普通声压水听器所接收到的实验数据处理结果与根据反演结果所得到的数值仿真结果进行了比较，可以看出二者基本吻合，因此利用矢量水听器反演得到的结果是有效的，可以利用矢量水听器进行浅海声场预报工作。

6　结　论

本文利用一次秋季浅海矢量水听器阵列接收到的水声数据，首先通过矢量场匹配反演出了海底声速，同时利用质点垂直振速和声压的传播损失差反演出了海底衰减系数。给出了 100Hz~1000Hz 频率范围内试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α_b=0.303f$^{1.81}$dB/m。最后给出由反演出的海底参数计算得到的传播损失与试验的声传播损失数据的比较，在 30km 范围内理论结果与实验结果符合较好，说明反演结果是可靠的。

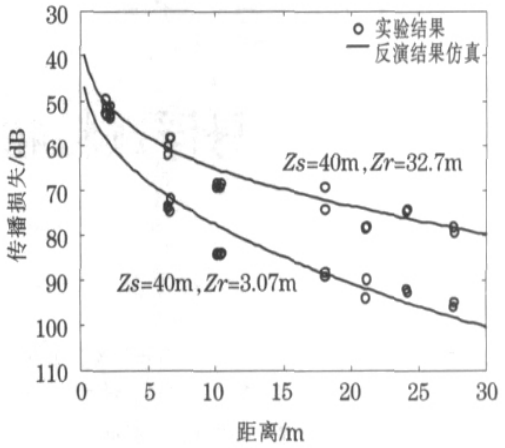

图 11　传播损失验证

Fig.11　Comparison of transmission loss

基于矢量水听器的海底参数反演方法主要具有下述优点：一是利用矢量匹配场反演海底声速能够有效减小参数估计误差；二是利用声场矢量传播损失差进行海底吸收反演能够排除信号源级起伏对反演的干扰。实验结果表明，基于矢量水听器的浅海地声参数反演工作能够很好的进行浅海声场预报工作。

参　考　文　献

[1] 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[J]. 声学学报，2000，25(4)：297-302.
LI Fenghua，ZHANG Renhe. Bottom sound speed and attenuation inverted by using pulsed waveform and transmission loss[J]. Acta Acustica，2000，25(4)：297-302.

[2] LIU J J，LI Fenghua，PENG Z H. Stochastic inversion of seabottom scattering coefficients from shallow-water reverberation[J]. Chin. Phys. Lett，2003，20：2188-2191.

[3] ZHANG Renhe，LI Fenghua，LUO W Y. Effects of source position and frequency on geoacoustic inversion[J]. J. Comp. Acoustic，1998，6：245-255.

[4] Taroudakis M I，Makrakis G N. Inverse problems in underwater acoustics[M]. New York：Springer，2001.

[5] LI Z L，ZHANG R H. A broadband geoacoustic inversion scheme[J]. Chin. Phys. Lett，2004，21(6)：1100-1103.

[6] LI Z L，YAN J，LI Fenghua. Inversion for the sea bottom acoustic parameters by using the group time delays and amplitude of normal mode[J]. Chinese Journal of Acoustics，2001，22(2)：176-183.

[7] ZHOU J X，ZHANG X Z，Rogers P H. Effect of frequency dependence of sea-bottom attenuation on the optimum frequency for acoustic propagation in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am，1987，82(1)：287-292.

[8] Rajan S D，Lynch J F，Frisk G V. Perturbative inversion methods for obtaining bottom geoacoustic parameters in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am，1987，82(3)：998-1017.

[9] Potty G R，Miller J H，Lynch J F. Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am，2000，108(3)：973-986.

[10] Oleg E G，YANG D S. On the certain semi-analytical models of low-frequency acoustic fields in terms of scalar-vector description[J]. Chinese Journal of Acoustics，2004，23(1)：58-70.