

海面噪声垂直相干特性反演地声参数

殷宝友^{1,2}, 林建恒¹, 马力²

(中国科学院声学研究所北海研究站, 山东青岛 266023; 2. 中国科学院水声环境特性重点实验室, 北京 100190)

摘要: 声学反演是快速、低成本获取浅海局部地声参数的有效方法之一, 其中, 利用海面噪声的垂直相干函数反演海底参数, 只需要两个垂直排列的水听器, 不需要专门的发射声源, 隐蔽性好, 有较高的军事应用价值。通过已有的海面噪声场模型, 分析了海底声速、密度及衰减系数对噪声垂直相干函数的敏感度, 并利用中国某海区的海洋环境噪声试验数据, 结合差异进化全局寻优算法, 反演了该海域的地声参数, 与同海区的爆炸声传播试验反演结果相比, 二者基本吻合, 最后利用快速吉布斯采样方法评价了反演结果的有效性。结果表明: 海洋环境噪声场的垂直相干函数是稳健的, 用来反演一般精度下的地声参数, 试验实施容易, 具有一定的优势。

关键词: 海面噪声; 垂直相干函数; 差异进化算法; 匹配场反演; 快速吉布斯采样

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-01-0046-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.01.008

A geo-acoustic inversion method using vertical coherence of sea surface noise

YIN Bao-you^{1,2}, LIN Jian-heng¹, MA Li²

(1. Qingdao Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266023, Shandong, China;

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Acoustic inversion is a fast and inexpensive method to obtain local geo-acoustic parameters in shallow water. Especially, the noise vertical coherence estimates are so convenient to be accomplished by using a simple two-hydrophone array without any transmitting sources. And it could be provided to military application because of its covertness. In this paper, a simple model of sea surface noise is used, and the sensitivity index of geo-acoustic parameters (such as sound speed, density and attenuation) to noise vertical coherence is introduced. Furthermore, the ambient sea noise inversion has been applied to experimental data obtained in shallow water in China, combining with the differential evolution global optimization method. It is shown that the geo-acoustic parameters estimated by the noise vertical coherence and the explosive signals coincide well to some extent. A Fast Gibbs Sampler (FGS) approach is used to test the validity of this inversion method in the end. One benefit of stable ambient noise inversion technique is that it provides a simple alternative to more convenient procedure used in estimating the seabed parameters.

Key words: sea surface noise; vertical coherence; differential evolution; matched field inversion; fast Gibbs sampler

1 引言

浅海中的海底声速、密度及衰减系数等地声参数, 在声场预报、匹配场定位等应用中十分重要。海底参数的直接获取比较困难, 海底钻孔、取样等方法只能得到局部海底特性, 费时费力。工程应用中, 常用水声反演的方法获取必需的海底参数, 包括声传播、混响及噪声反演。利用声传播及混响反演, 不仅需要接收阵, 还需要专门的发射声源, 试

验条件和设备要求相对都比较复杂。而海洋环境噪声作为海洋中的固有背景声场, 受到海面和海底的限制, 会携带海面、海底等环境因素的信息, 研究表明^[1]: 在浅海, 噪声场的空间特性强烈依赖于海底的地声属性, 可以用来反演海底参数。特别是, 噪声场的垂直相干特性比较稳定, 随海况变化较小, 试验上获取简单, 只需要一对垂直布放的水听器, 不需要发射声源, 具有很好的隐蔽性, 有利于军事作战中快速、稳定地获得海底参数。

Carbone 给出海面噪声场垂直相干函数的简正波表达式^[2], 并用其估计了低损失海底的纵波和横波声速, 没有对反演结果的可靠性进行统计分析; 骆文于利用 2001 年 6 月中美联合考察东中国海得到的噪声数据, 由噪声宽带垂直相干反演了海底声

收稿日期: 2010-01-02; 修回日期: 2010-03-01

基金项目: 国防科技预研项目(51303030606 和 51303060507)资助

作者简介: 殷宝友(1983-), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 研究方向为水声物理。

通讯作者: 殷宝友, E-mail: yinbaoyou@hotmail.com

速、密度和吸收系数^[3], 文中指出假设海底吸收系数与频率无关是导致误差的一个原因。李丙辉通过数值模拟, 在理想环境条件和存在低频干扰两种情况下, 利用噪声场的垂直相干, 对海底地声参数进行了反演^[4]。

本文基于与距离无关的海洋环境噪声模型, 分析了声速剖面对噪声场垂直相干函数的影响, 给出不同海底情况下的垂直相干函数曲线, 为了定量分析海底参数的敏感度, 引入敏感度因子。并简单介绍了在中国某浅海区进行的噪声试验。给出噪声反演结果, 并与同海区的爆炸声反演结果^[5]及典型的地声模型^[6]进行比较。引入后验概率密度方法, 用统计方法描述了反演算法及反演结果的有效性^[7,8]。

2 噪声场垂直相干理论

假设海洋环境水平分层, 并方位对称, 海面噪声源满足时空泊松分布, 位于海面之下深度为 z_s 的无限大平面上, 如图 1 所示, 垂直排列的两个接收点之间的噪声互谱密度为^[2]:

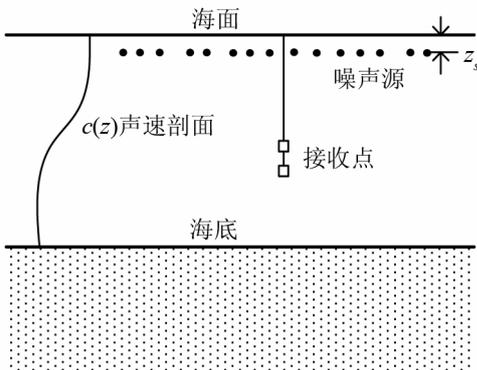


图 1 海面分布噪声源分布的几何表示
Fig.1 Geometry for surface-distributed noises

$$S_{mn}(\omega) = 4\pi v Q^2 \int_0^\infty r G(r, \omega, z_{rm}) G^*(r, \omega, z_{rn}) dr \quad (1)$$

其中, G 为格林函数, $*$ 表示复共轭, z_{rm} 和 z_{rn} 表示第 m 和第 n 个接收点的深度 ($m, n=1, 2$)。两接收点的噪声垂直相干 (C_{theo}) 是互谱密度的归一化形式, 见式(2)。

$$C_{theo}(\omega) = \frac{S_{12}(\omega)}{\sqrt{S_{11}(\omega)S_{22}(\omega)}} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 垂直相干函数是一个复函数。数值计算结果表明, 海底声学参数的变化主要影响垂直相干函数的实部^[9], 因此, 只考虑其实部, 并记为:

$$\Gamma_i(\omega) = \text{Re}(C_{theo}) \quad (3)$$

图 2 给出了在海深为 50m、海底为液态半无限

空间(声速 1650m/s、密度 1.9g/cm³、衰减 0.8dB/λ)时, 四种不同声速剖面海洋环境下, 两接收点深度分别为 25m、26m 的噪声垂直相干函数。图中垂直相干函数的线型和声速剖面一一对应。以等声速情况为参照, 负梯度声速剖面使得声线向下弯曲, 加剧了声线和海底的相互作用, 从而造成了垂直相干性的降低, 而且负梯度越强, 垂直相干函数向下弯曲程度越大。但总的来看, 声速剖面对垂直相干函数的影响较小, 而且对于负梯度声速剖面情况, 垂直相干函数的趋势基本一致。

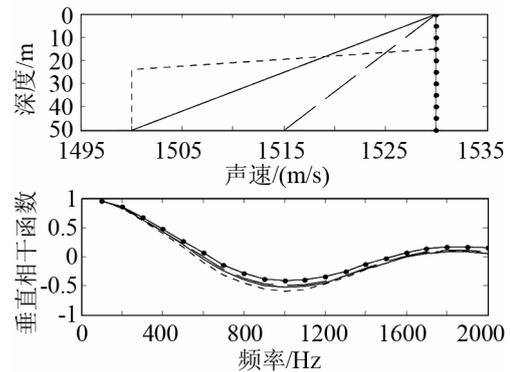


图 2 声速剖面对垂直相干函数的影响
Fig.2 Effects of SSP on vertical coherence

图 3 给出了不同类型海底^[10]对应的垂直相干函数, 可以看出, 对于不同的海底类型, 垂直相干函数变化非常明显, 由此可见海底参数是影响垂直相干函数的主要因素之一。因此, 可以用来反演海底参数。

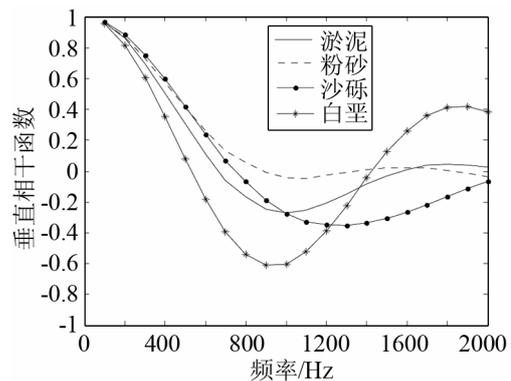


图 3 典型海底的垂直相干函数
Fig.3 vertical coherence functions for different seabed

为了定量分析声速、密度及衰减的敏感度, 引入敏感度因子 SI :

$$SI(x_i) = \frac{1}{F} \sum_{n=1}^N |1 - \Gamma_i(\omega_n, x_i) / \Gamma_i(\omega_n, x_0)| \quad (4)$$

其中, x_{max} 和 x_{min} 分别表示第 i 个模型参数搜索区间的上下边界, N 为频率点数, Γ_i 是一个设定的参考参数向量, 对应垂直相干函数的实部, F 是

归一化因子。对于不同的海底参数，敏感度因子如图 4 所示。当敏感度曲线下降至一定高度，参数的搜索空间越小，表示该参数越敏感。从图 4 可看出，海底纵波声速的敏感度最高，密度和衰减的敏感度相对较低。

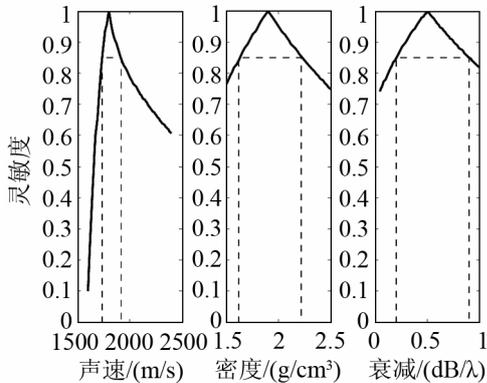


图 4 海底参数(声速、密度、衰减)的敏感度曲线

Fig.4 Sensitivity curves for seabed parameters (sound speed, density and attenuation)

3 浅海噪声试验

在某浅海试验中，海水深度约 37m，声速剖面如图 5 示，呈现典型的负梯度。采集噪声数据时，风速约 2.8m/s。由于试验期间是禁渔期，船只较少，可以将采集的噪声近似看成海面风关噪声。浅层剖面仪显示试验地点的海底无明显分层，为了提高反演的速度，将海底看作液态半无限空间。

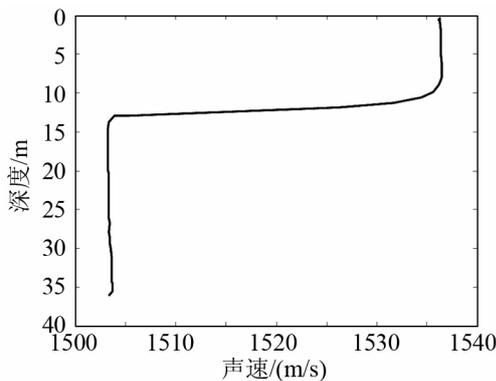


图 5 试验海区声速剖面

Fig.5 Sound speed profile during the experiments

试验布放了自动记录式的水听器垂直阵列用于采集噪声数据，只选取其中两个间距为 1m 的通道研究噪声场的垂直相干特性，阵元距离海面的深度为 27m、28m。将两个通道接收到的噪声信号 $x(t)$ 分为 M 段并作 FFT 变换，得到互谱密度 $\hat{S}_{ij}(f)$ 为：

$$\hat{S}_{ij}(f) = \sum_{m=1}^M X_i(f, \Delta T_m) X_j^*(f, \Delta T_m) / M \quad (5)$$

其中， ΔT_m 为时间长度， $i, j=1, 2$ 分别为接收

点的标号， f 为频率。垂直相干测量值的实部则表示为：

$$\Gamma_m(f) = \text{Re} \left(\hat{S}_{12}(f) / \sqrt{\hat{S}_{11}(f) \hat{S}_{22}(f)} \right) \quad (6)$$

为了减小噪声源随机性对计算结果的影响，对几个时间段的噪声垂直相干函数取平均，每段噪声均为 90s 左右，如图 6 中虚线给出了在相近时间段多次测量的结果，实线为平均值。可以看出，垂直相干函数实部在低频时接近 1，随着频率升高，呈现震荡趋势，其相干性越来越弱，在高频处趋近于 0。在 0~3kHz 之间，垂直相干有 3 个零点。

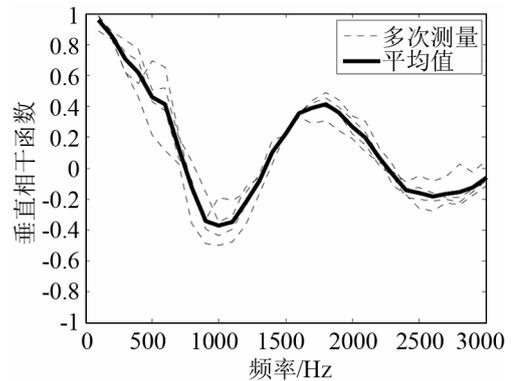


图 6 多次测量的垂直相干函数及其均值

Fig.6 Measured values for vertical coherence of ambient noise and its mean value

4 地声参数反演

利用噪声的垂直相干函数反演海底参数，就是将模型计算的垂直相干函数(Γ_t)和实验测量得到的(Γ_m)垂直相干函数进行匹配，从而得到最佳地声参数，代价函数为：

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\Gamma_t(\omega_n) - \Gamma_m(\omega_n)]^2} \quad (7)$$

其中， N 为频率点数。

本文采用差异进化全局寻优算法(DE)，该方法可以同时进行多个群体的搜索，在一般精度下反演地声参数，有较好的收敛性，计算过程中控制变量少，实现简单^[11]。初始参数向量不需要设定，一般采用统一的概率分布来随机选择，并尽可能覆盖整个参数空间。在某个群体的第 G 代，包含有 N 个 D 维的参数向量： $x_{i,G}(i=0, 1, 2, \dots, N-1)$ ， N 在优化过程中不变。DE 算法产生新参数向量的方法是，群体中两个参数向量的差与第三个向量加权，并进行适当的交叉操作。

对第 G 代的任意一个向量 $x_{i,G}(i=0, 1, 2, \dots, N-1)$ ，扰动向量由下式产生：

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F(x_{r_2,G} - x_{r_3,G}) \quad (8)$$

式(8)中,下标 r_1, r_2, r_3 是 $[0, N-1]$ 之间的整数,互不相同,而且与当前的向量序号 i 不同, F 是 $[0, 1]$ 之间的加权系数,控制着序号 r_2 和 r_3 的两个向量差别的放大量。

为了使扰动向量在参数空间内具有更广泛的代表性,引入交叉过程得到群体的下一代:

$$u_{i,G+1} = [u_{0i,G+1} \quad u_{1i,G+1} \quad \cdots \quad u_{(D-1)i,G+1}] \quad (9)$$

式中,每个向量由式(10)构成:

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}; & j=[n, n+1, \dots, n+L-1] \\ x_{ji,G}; & j \in [0, D-1] \end{cases} \quad (10)$$

其中, n 是在 $[0, D-1]$ 之间随机选择的整数, L 代表了参数交换的数量,由交叉概率控制。

执行完加权、交叉操作之后,比较新向量 $u_{i,G+1}$ 和预定向量 $x_{i,G}$ 的目标函数,如果新向量有更低的目标函数,则用新向量代替预定向量,否则,保留预定向量。对群体中当前一代的所有个体都进行上述操作,产生了群体下一代,反复循环,最后达到最优。

利用图 6 所示的噪声数据,由于高频段数据可以提高反演精度,但在此频段模型计算速度较慢,综合考虑计算精度和速度两方面,本文选取了 100Hz~2kHz 段数据进行反演。反演参数的范围、反演结果及同海区的爆炸声反演结果如表 1 所示。爆炸声反演结果和本文反演结果相近,除了衰减系数的相对误差较大之外,声速和密度的相对误差均在 10% 以下。

表 1 待反演参数的搜索范围和反演结果
Table 1 Ranges for inverted parameters and geo-acoustic inversion results

	声速/(m/s)	密度/(g/cm ³)	衰减/(dB/λ)
参数范围	1580~1750	1.5~2.0	0.05~1.0
本文反演结果	1641.6	1.7491	0.5560
爆炸声反演结果	1600.9	1.79	0.29

海图显示该处海底为泥沙质,Hamilton 给出典型的泥沙质海底的声速为 1575~1650m/s,密度为 1.7~1.9g/cm³,衰减为 0.5~0.8dB/λ^[6]。可以看出,声速、密度及衰减的反演值在 Hamilton 给定的范围内。与爆炸声反演结果相比,衰减相差较大,声速和密度的值相近。

反演得到的海底参数代入模型计算得到的垂直相干函数(实线:—)与试验测量值(虚线:⋯)对比如图 7 所示。可以看出,在低频时,试验值和反演值吻合得较好,随着频率的升高,两者差值明显增大。究其原因,主要是由于高频时不断增大的界面散射造成的,另外,模型计算中选用的声源深度位于一个无限大平面内,在高频时可能与实际参数有

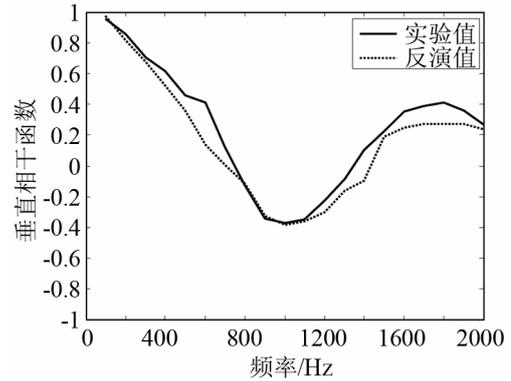


图 7 试验测量的垂直相干函数和反演结果

Fig.7 Comparison between measured and inversion results
偏差。

5 反演结果的评价

下面采用后验概率分析的方法对反演结果在搜索空间中的分布进行统计。由贝叶斯定理可知,后验概率密度表示为:

$$P(m|d) \propto L(d|m)P(m) \quad (11)$$

其中, m 和 d 分别为模型参数向量和测量数据向量, $P(m|d)$ 为 m 在给定 d 的条件概率密度, $L(d|m)$ 为似然函数, $P(m)$ 是先验的假设具有均匀分布的概率密度。

一般很难获得似然函数的准确形式,假设随机数据误差为高斯分布,则似然函数可以表示为:

$$L(d|m) \propto \exp[-E(m)] \quad (12)$$

其中, E 为试验数据向量和计算模型之间的误差函数。

这样,就可以得到归一化的后验概率密度:

$$P(m|d) = \frac{\exp[-E(m,d)]P(m)}{\int \exp[-E(m',d)]P(m')dm'} \quad (13)$$

从而,可以计算边缘概率密度、均值和方差,其一般形式为:

$$I = \int A(m')P(m'|d)dm' \quad (14)$$

式中的积分可以采用快速吉布斯采样(FGS)方法计算。

匹配场反演中,接收阵的数据向量可表示为:

$$d = m + n \quad (15)$$

其中 m 为通过模型计算声场矢量, d 为数据量, n 为误差项(包括测量误差和理论误差),假设 n 为零均值高斯白噪声,可得到:

$$E(m) = -\frac{[d-m]^T [d-m]}{2\hat{\sigma}^2} \quad (16)$$

$\hat{\sigma}^2$ 为方差,代入式(13)、(14)即可计算后验概率密度。

图8为声速、密度和衰减的边缘概率分布图,实线表示待反演参数的边缘概率密度函数,虚线对应反演值,相比较而言,声速具有较好的一致性,能收敛于反演结果,而密度和衰减系数则比较分散,而且有些点偏离于反演值,特别是密度值,在 $1.55\sim 1.95\text{g/cm}^3$ 的范围内,后验概率密度值比较平坦。通过对海底参数反演结果的后验概率分布分析,可以看出它与前面提到的各参数的灵敏度基本吻合,密度和衰减的敏感度明显低于声速。

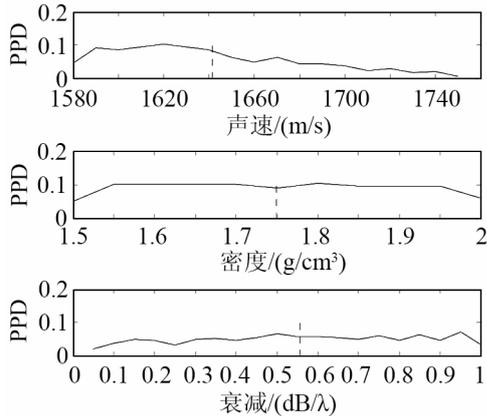


图8 反演参数的边缘概率密度分布

Fig.8 Marginal probability distributions for estimated parameters

6 结论

本文基于水平分层浅海海面噪声场模型,计算了噪声场中两接收点的垂直相干函数,并引入敏感度因子,定量分析了海底参数对垂直相干函数的敏感度,得到结论:海底声速对垂直相干函数的敏感度最高,密度及衰减系数次之。

利用中国某浅海的环境噪声试验数据,结合差异进化算法全局寻优,反演得到该海区的声速、密度和衰减,并与 Hamilton 经典海底参数值及该海区的爆炸声反演结果相比,结果基本吻合,与爆炸声反演结果相比,声速的反演误差较小。由于密度和衰减的敏感度不高,反演结果误差相对较大,需要进一步提高这两个参数的敏感度。

考虑到在复杂的海洋环境中,环境参数存在很多不确定性,本文用后验概率分析方法,对反演结果进行了有效性评估。结果表明:声速具有较好的一致性。本文初步探讨表明:不同声速分布对垂直

相干函数影响,与海底参数对垂直相干函数的影响相比较小,在反演过程中不起主要作用。其它因素如海面噪声源分布、海面不平整性等对反演精度的影响有待今后进一步研究。

总的来说,利用海洋环境噪声垂直相干特性反演海底声学参数,只需两个水听器,不需要专门的发射声源,实施容易,安全隐蔽,具有一定的优势。

参考文献

- [1] Deane G B, Buckingham M J. Vertical Coherence of Ambient Noise in Shallow Water Overlying a Fluid Seabed[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1997, **102**(6): 3413-3424.
- [2] Carbone N M, Deane G B, Michael J. Buckingham. Estimating the Compressional and Shear Wave Speeds of a Shallow Water Seabed from the Vertical Coherence of Ambient Noise in the Water Column[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, **103**(2): 801-813.
- [3] 骆文于. 海洋环境噪声场分析及声场数值预报系统[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2002.
LUO Wenyu. Analysis of ambient noise field and numerical sound field prediction system[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. 2002.
- [4] 李丙辉. 浅海风成海洋环境噪声场空间结构及海底参数反演研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
LI Binghui. Studies on the spatial structure of wind-generated ambient noise and the inversion of bottom parameters in shallow water[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [5] 鹿力成, 马力. 浅海海底反演实验研究[J]. 声学技术, 2008, **27**(5 Pt.2): 56-57.
LU Licheng, MA Li. Geoacoustic Inversions from Experiment Data in Shallow Water[J]. Technical Acoustics. 2008, **27**(5 Pt.2): 56-57.
- [6] Hamilton E L. Geoacoustic Modeling of the Sea Floor[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, **68**(5): 1313-1340.
- [7] Dosso S E. Quantifying uncertainty in Geoacoustic Inversion. I. A fast Gibbs sampler approach[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2002, **111**(1, Pt.1): 129-142.
- [8] Dosso S E. Quantifying uncertainty in Geoacoustic Inversion. II. Application to Broadband, Shallow-water Data[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2002, **111**(1 Pt.1): 143-159.
- [9] 殷宝友, 林建恒, 衣雪娟, 等. 海底参数对海洋环境噪声垂直相干的敏感性[J]. 声学技术, 2009, **28**(5 Pt.2): 84-86.
YIN Baoyou, LIN Jianheng, YI Xuejuan, et al. Sensitivity of geoacoustic parameters to vertical coherence of ocean ambient noise[J]. Technical Acoustics, 2009, **28**(5 Pt.2): 84-86.
- [10] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H. Computational Ocean Acoustics[M]. New York: Springer-Verlag, 2000: 37-38.
- [11] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous space[R]. Technical Report TR-95-012, ICSI, 1995.