

深海海洋环境噪声垂直相关性研究

王璟琰^{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 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 海洋环境噪声场是海洋中的固有声场, 其空间结构特性是影响水声系统的重要因素之一。在风成海洋环境噪声波数积分模型的基础上, 对深海噪声场的垂直相关性进行了研究。通过数值仿真讨论了深海环境下, 海底声速、衰减系数、海面噪声源深度及接收器深度对均匀分布于海面附近的噪声源的垂直相关性的影响。仿真结果表明: 噪声场的垂直相关随海底声速、衰减系数和接收器的绝对深度的变化较小; 高频噪声的垂直相关性对噪声源的深度较敏感, 低频噪声的垂直相关性受噪声源深度的影响几乎可以忽略。在此基础上, 分析了某次海试噪声数据, 并结合数值计算结果对实验测得噪声数据的垂直相关性进行了合理的解释。

关键词: 海洋环境噪声; 深海; 垂直相关性

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-02-0109-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.02.005

Research on the vertical correlation of ambient noise in deep sea

WANG Jing-yan^{1,2}, LI Feng-hua¹

(1. National Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ambient noise is the resident acoustic field in the ocean, and the spatial property of the noise field is a dominant factor which affects the performance of the underwater system. In this paper, the vertical correlation of ambient noise in deep water is studied based on the wind-generated noise model using the wavenumber integral representation. The vertical correlation under different environment parameters, such as the sound speed and the attenuation of the seabed, and the depth of the sources and the receivers, is simulated numerically. The simulation results show that the sound speed and the attenuation of the seabed and the receiver depth have little impact on the vertical correlation; and the vertical correlation is sensitive to the source depth at high frequency, however, it is slightly influenced at low frequency. The experimental data were analyzed and the results are explained reasonably comparing with the simulations.

Key words: ambient noise; deep sea; vertical correlation

0 引言

海洋环境噪声是水声信道的背景干扰场, 携带大量有关海洋环境的信息, 是进行海洋环境参数反演的有用信号。在海洋环境噪声场特性中, 垂直相关特性能够反映噪声场的空间结构, 且仅依赖噪声场的传播条件, 是一个相对稳定的物理量。Cron 和 Sherman 在 1962 年提出了无限大海面噪声源在均匀半空间海洋环境下的噪声模型^[1]; Kuperman 和 Ingenito 推导了分层介质中海洋环境噪声相关系数的简正波表达式^[2]; 在此基础上, Buckingham 等得

出了考虑海水衰减时噪声相关函数的解析形式, 并应用噪声的垂直相关获取海底声学参数^[3-4]。我国学者对浅海噪声的垂直相关特性做了大量的研究工作, 如殷宝友等分析了浅海环境下海底反射特性与噪声垂直相关的关系, 并将其用于海底参数反演^[5]; 李丙辉等通过数值仿真研究了环境参数对浅海风成噪声空间结构的影响^[6]; 何利等深入分析了浅海海域不同时间段噪声的频谱特性和垂直相关特性, 应用改进的噪声模型有效解释了高频噪声场的垂直相关特性^[7]。

本文基于噪声垂直相关函数的波数积分表达式, 通过数值仿真, 研究了深海环境下海底参数、海面噪声源深度及接收器深度对垂直相关性的影响; 分析了某次海试的噪声数据, 并结合数值计算结果对实验噪声数据的垂直相关性进行了合理的解释。

收稿日期: 2015-01-25; 修回日期: 2015-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11125420)

作者简介: 王璟琰(1988—), 女, 陕西商洛人, 博士研究生, 研究方向为水声物理。

通讯作者: 李风华, E-mail: lfh@mail.ioa.ac.cn。

1 噪声场垂直相关函数的计算

假定海面噪声源均匀分布于海面附近某一平面上,如图 1 所示,空间两个水听器的噪声互谱密度函数可以表示为如下形式^[8]:

$$C_{\omega}(R, z_1, z_2) = \langle p(\mathbf{r}_1, z_1) p^*(\mathbf{r}_2, z_2) \rangle = \iint d^2\mathbf{r}' d^2\mathbf{r}'' \langle S(\mathbf{r}') S^*(\mathbf{r}'') \rangle \times g(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}', z_1, z_1) g^*(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}'', z_2, z_2) \quad (1)$$

式中: S 为噪声源谱强度; \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 和 z_1 、 z_2 分别表示两接收器的水平位置和深度; \mathbf{r}' 和 \mathbf{r}'' 分别表示不同声源的水平位置; z' 表示声源深度。 $R = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$, $*$ 表示复共轭。 $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z_1, z')$ 是空间格林函数, 表示位于 (\mathbf{r}', z') 处的单位强度点源在位于 (\mathbf{r}_1, z_1) 的接收器处的响应, $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z_1, z')$ 满足 Helmholtz 方程及边界条件:

$$(\nabla^2 + k^2)g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z, z') = -\delta^2(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\delta(z - z') \quad (2)$$

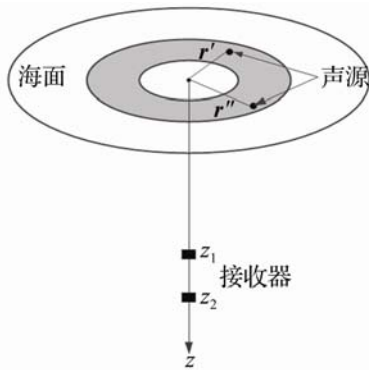


图 1 海面分布噪声问题的几何表示
Fig.1 The geometry for the surface-distributed noise problem

假设分布于海面附近的噪声源的相关函数 $q^2 N(s) \equiv \langle S(\mathbf{r}') S^*(\mathbf{r}'') \rangle$ 在空间上只与声源间隔 $s \equiv \mathbf{r}' - \mathbf{r}''$ 有关, 其中 q 为噪声源强度, 对于不相干噪声源, 其相关函数可表示为

$$N(s) = \frac{2\delta(s)}{k^2(z')s} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 考虑接收器垂直分布时 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2$, 可得互谱密度函数的波数积分形式:

$$C_{\omega}(0, z_1, z_2) = \frac{8\pi^2 q^2}{k^2 z'} \int_0^{\infty} g(k_r, z_1, z') g^*(k_r, z_2, z') k_r dk_r \quad (4)$$

其中: $g(k_r, z, z')$ 为波数域的格林函数, 其与空间格林函数 $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z, z')$ 的对应关系为

$$g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', z, z') = \frac{1}{2\pi} \int g(k_r, z, z') \exp[ik \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}')] d^2k \quad (5)$$

将 $C_{\omega}(0, z_1, z_2)$ 归一化后得到噪声场垂直相关系数:

$$C_{12}(\omega) = \frac{C_{\omega}(0, z_1, z_2)}{\sqrt{C_{\omega}(0, z_1, z_1) C_{\omega}(0, z_2, z_2)}} \quad (6)$$

式(6)中的各项由公式(4)直接数值计算得到。

2 垂直相关与海洋环境参数的关系

由公式(4)可以看出, 噪声垂直相关函数与声源深度和海洋环境参数等因素有关。

本节基于噪声垂直相关的波数积分表达式, 通过数值仿真, 研究了海底参数、海面噪声源深度和接收器深度对噪声垂直相关性的影响。本文数值仿真环境为深海环境, 水文条件为中国南海典型深海声速剖面, 存在着非完全深海声道(即海底处的海水声速小于海面处的海水声速), 海深为 3235 m, 接收器深度为 30 m, 间隔为 0.5 m。参考水文环境参数如下: 噪声源深度 0.1 m, 海底密度为 1.5 g/cm³, 海底声速和衰减分别为 1584 m/s 和 0.2 dB/λ。在研究某一参数对垂直相关的影响时, 其他参数设为参考值。

2.1 海底各参数对垂直相关的影响

图 2 和图 3 分别给出了海底声速为 1520、1584 和 1640 m/s 时, 300 Hz 和 1000 Hz 的垂直相关系数随阵元间距的变化和在该海底声速条件下距参考阵元间距 2 m 和 14 m 的垂直相关系数随频率的变化(接收器位于海深 994~1024 m, 参考阵元深度为 994 m)。其余参数取参考值。

图 2 和图 3 表明, 约 ± 60 m 的声速变化对低频的垂直相关略有影响, 但影响不大, 对高频垂直相关几乎没有影响; 当垂直间距较小时, 海底声速对

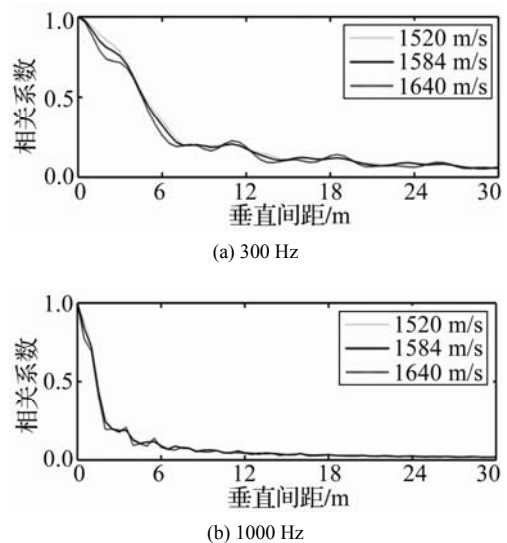


图 2 不同海底声速下垂直相关随间距的变化
Fig.2 Vertical correlation versus element spacing for different seabed sound speeds

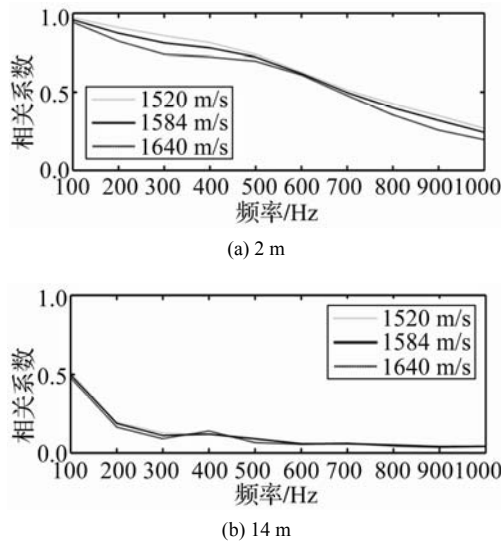


图 3 不同海底声速下垂直相关随频率的变化
Fig.3 Vertical correlation versus frequency for different seabed sound speeds

垂直相关有影响，随着间距增大，该影响可被忽略。

图 4 和图 5 分别给出海底衰减系数为 0.2 dB/λ 和 0.8 dB/λ 时，300 Hz 和 1000 Hz 的垂直相关系数随阵元间距的变化和在该海底声速条件下距参考阵元 2 m 和 14 m 的垂直相关系数随频率的变化(接收器位置和参考阵元深度同上)。其余参数取参考值。结果表明，海底衰减系数对垂直相关的影响很小，可以忽略。

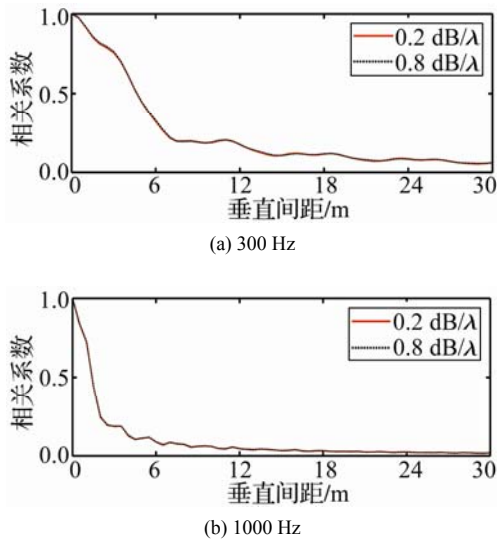


图 4 不同海底衰减下垂直相关随间距的变化
Fig.4 Vertical correlation versus element spacing for different seabed attenuations

本部分仿真结果说明，在深海水文环境中，由于水深较深及水文条件的因素，海面噪声源激发的噪声受海底作用较小，因而海底参数的变化对垂直相关的计算影响不明显，这与浅海情况不同。

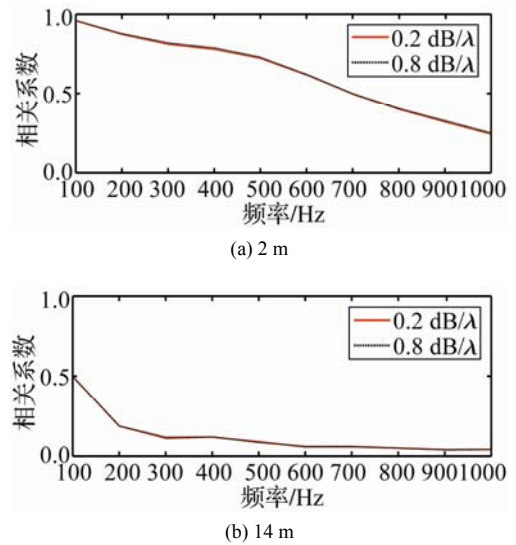


图 5 不同海底衰减下垂直相关随间距的变化
Fig.5 Vertical correlation versus frequency for different seabed attenuations

2.2 噪声源深度对垂直相关的影响

海面风成噪声源的深度与海面附近风速有关，一般在数十厘米的量级。当声源深度小于四分之一波长时，噪声源呈现偶极子辐射特性，随着声源深度增加，偶极子特性逐渐转变为两个相位相反的单极子。图 6 和图 7 分别给出了参考阵元深度为 994 m 时，噪声声源深度为 0.1、0.5 m 和 1 m 时不同频率和不同间距的垂直相关系数。由图 6 和图 7 可看出，不同声源深度导致的垂直相关差异随着间距增大而减小；随着声源深度增大及频率的增高，噪声源的偶极子特性减弱，垂直相关性随频率变化趋于平缓。表现为噪声场的垂直相关性在低频时受噪声源深度影响不大，在高频时受噪声源的影响较大。

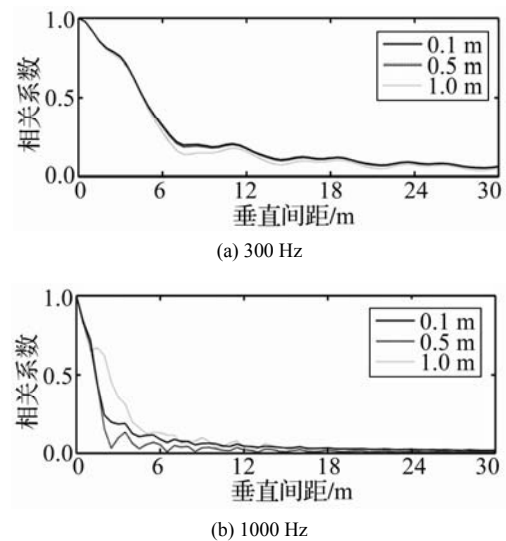


图 6 不同噪声源深度下垂直相关随间距的变化
Fig.6 Vertical correlation versus element spacing for different source depths

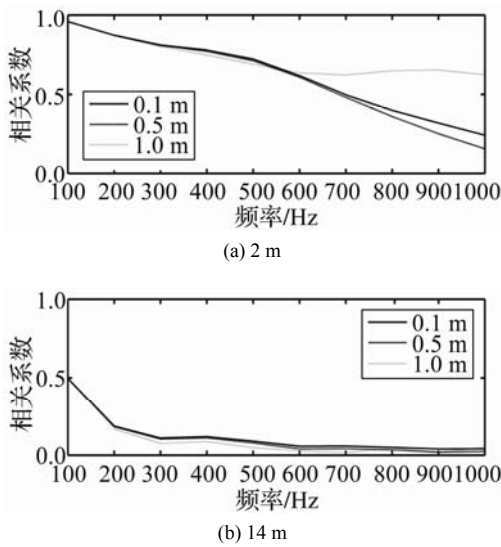


图 7 不同噪声源深度下垂直相关随频率的变化
Fig.7 Vertical correlation versus frequency for different source depths

2.3 接收器间距和深度对垂直相关的影响

图 8 给出了参考阵元深度为 994 m 时，垂直间距分别为 0.5、2 和 4 m 处的垂直相关系数。显然，接收器垂直间距越大，其垂直相关性越弱；频率越高，垂直相关系数越低。图 9 为接收器位于不同深

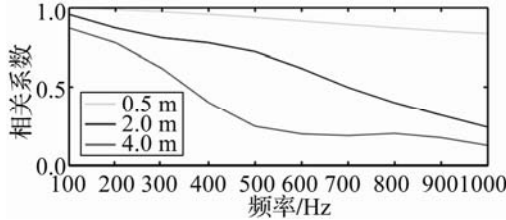


图 8 不同间距的垂直相关随频率的变化
Fig.8 Vertical correlation versus frequency for different element spacing

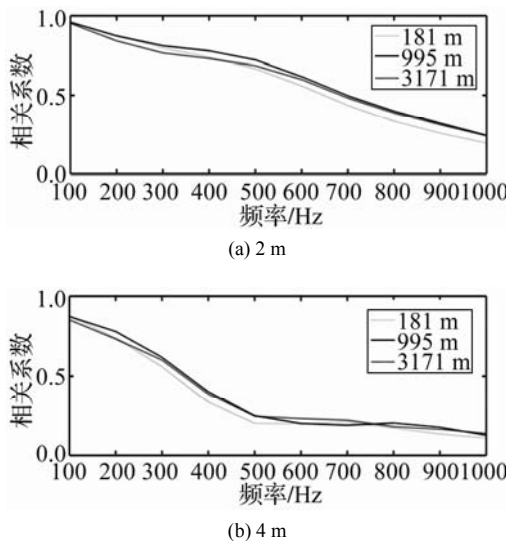


图 9 不同深度的垂直相关随频率的变化
Fig.9 Vertical correlation versus frequency for different receiver depths

度时的垂直相关性，其中接收器的绝对深度分别为 180、182、994、996、3170、3172 m；图 9 (a)中接收器间距为 2 m，图 9 (b)中为 4 m。图 9 的计算结果表明，在本文仿真的深海环境下，接收器的绝对深度对垂直相关性有影响，但是影响较小。

3 噪声实验分析

3.1 实验介绍

实验海区海深为 3235 m，声速剖面如图 10 所示。实验布放等间距垂直分布的 8 个水听器于 994~1008 m 之间，位于声道轴附近，阵元间距为 2 m，其中从浅到深第 6 个阵元信号异常，分析时剔除该通道。测量期间海况良好，风速在 3~6 m/s 范围内，选取时间段内接收船附近船只很少，且关闭了接收船的发动机，因此收集的噪声数据主要为海面风成噪声。接收器的采样频率为 8000 Hz，分析时截取 10 s 的噪声数据，做 8192 点的 FFT，每 20 段做一次平均。

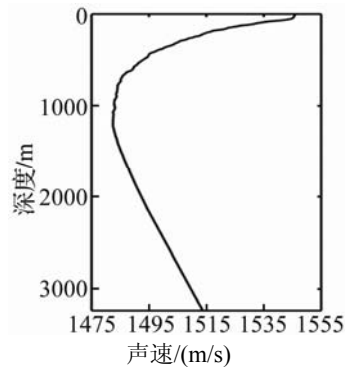


图 10 接收器处海水声速剖面
Fig.10 The sound speed profile at the receiver

3.2 实验结果分析

应用式(4)和(6)计算了 600 Hz 和 1000 Hz 的垂直相关系数随垂直间距的变化关系，并与实验结果进行比较，如图 11 所示。图 12 给出了间隔 6 m 和 8 m 的垂直相关系数随频率的变化曲线。理论计算时选取的参数如下：声源深度 0.1 m，海底声速 1584 m/s，衰减系数 0.2 dB/λ，海底密度 1.5 g/cm³，海水声速剖面和接收器位置与实验相同。

图中实验结果与理论计算结果在高频时较一致，在低频时偏差较大；且实验值均小于理论计算值。这可能是由于实验时接收器位于声道轴附近，来自远距离的其他噪声源与本地风成噪声叠加作用，使得低频噪声的成分更复杂，从而降低了低频风成噪声的相关性；而高频噪声则还是以本地的风

成噪声为主，因而与理论计算结果较符合。

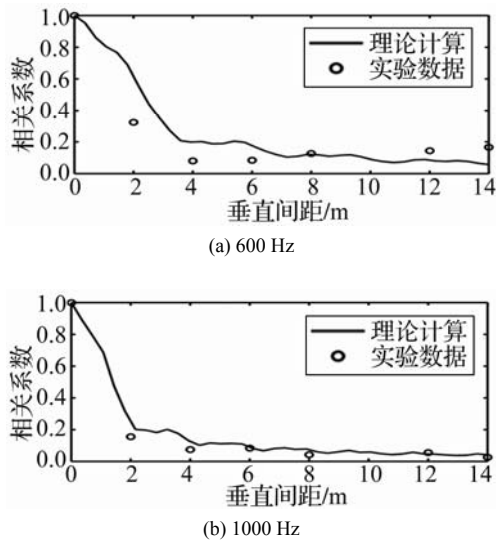


图 11 理论计算与实验数据的比较 (随间距变化)
Fig.11 The comparison of theoretical results and experimental data(versus element spacing)

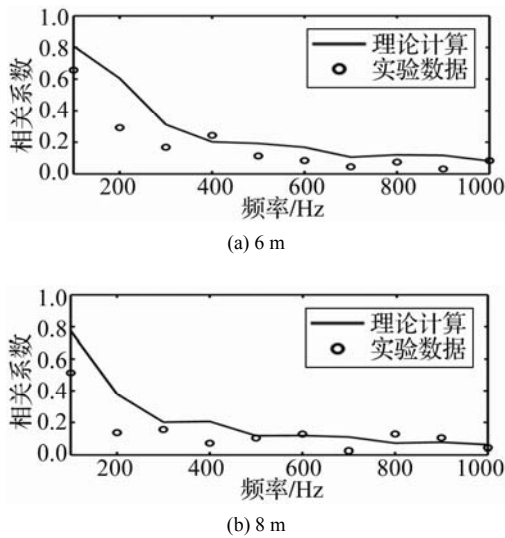


图 12 理论计算与实验数据的比较 (随频率变化)
Fig.12 The comparison between theoretical results and experimental data (with the change of frequency)

4 结 论

基于风成海洋环境噪声的波数积分模型，数值仿真了深海环境下的垂直相关函数，讨论了海底参数、声源深度和接收器深度对噪声垂直相关性的影响。计算结果表明，对于深海环境，海底参数和接收器深度对垂直相关性影响不大；噪声源深度对高频噪声的垂直相关性影响较显著，对低频的垂直相关性影响不大。分析了某海域实测噪声数据的垂直相关性，并结合理论计算结果对实验结果进行了合理的解释。

参 考 文 献

- [1] CRON B F, SHERMAN C H. Spatial correlation functions for various noise models [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1962, 34(11): 1732-1736.
- [2] KUPERMAN W A, INGENITO F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 67(6): 1988-1996.
- [3] BUCKINGHAM M J. Theory of the directionality and spatial coherence of wind-driven ambient noise in a deep ocean with attenuation [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2013, 134(2): 950-958.
- [4] BUCKINGHAM M J, JONES S A S. A new shallow-ocean technique for determine the critical angle of the seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1987, 81(4):938-946.
- [5] 殷宝友, 尚尔昌, 马力, 等. 浅海环境噪声垂直相关提取海底反射参数[J]. 中国科学, 2011, 41(6): 741-748.
YIN Baoyou, SHANG Erchang, MA Li, et al. Extracting bottom reflection parameters from the vertical correlation of ambient noise in shallow water [J]. Sci China Ser G-Phys Mech Astron, 2011, 41(6): 741-748.
- [6] 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: 43-53.
LI Binghui. Study on the spatial structure of wind-generated ambient noise and the inversion of bottom parameters in shallow water[D]. Qiugao: Ocean University of China, 2004: 43-53.
- [7] HE L, Li Z L, PENG Z H. Ambient noise near the sea-route[J]. Sci China Ser G-Phys Mech Astron, 2009, 52(1): 40-45.
- [8] JENSEN F B, KUPERMAN W A, Porter M B, et al. Computational Ocean Acoustics. [M]. 2nd, New York: AIP Press, 2001. 489-519.