

浅海倾斜海底声场空间相关性研究

赵 梅, 胡长青

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 针对浅海倾斜海底海洋环境, 对声场的空间相关性进行了研究。利用抛物方程法, 对浅海声场的空间相关系数进行数值模拟, 并结合 2001 年东中国海中美联合实验数据, 分析了声场空间相关系数与海底倾斜角度、接收阵元与参考阵元的间隔、参考阵元深度及声源深度之间的关系。对于上坡海底, 浅海声场空间相关性随着海底倾斜角度、接收阵元与参考阵元间隔的变大而变弱, 且垂直相关系数随着接收阵元与参考阵元间隔的增大, 先衰减再出现起伏。

关键词: 倾斜海底; 空间相关; 抛物方程法

中图分类号: TB566

文献标识码:

文章编号: 1000-3630(2010)-04-0365-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.04.003

Study of the sound spatial correlation in shallow water with inclined seafloor

ZHAO Mei, HU Chang-qing

(Shanghai Acoustics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: The spatial correlation in shallow water with inclined seafloor is studied in this paper. The sound spatial correlation coefficients are calculated by numerical simulation based on the parabolic equation method. There are connections between the spatial correlation coefficients and some parameters, such as the inclined angle of seafloor, the range between the receiver and the reference hydrophone, and the depths of the reference hydrophone and the source. These connections are discussed with the results from the 2001 Asian Seas International experiment. For upslope bottom, the spatial correlations decrease with the increases of the inclined angle of seafloor and the hydrophone separation, and the sound field vertical correlation coefficients become fluctuant after decreasing as the range between the receiver and the reference hydrophone increasing.

Key words: inclined seafloor; spatial correlation; parabolic equation method

1 引言

声场的空间相关性一直是海洋声学中的重要研究内容, 具有十分重要的理论和实践意义。利用声场的空间相关性, 可对海底参数进行反演^[1,2], 对于声纳基阵的合理设计、性能预报具有工程应用价值^[3], 是获得良好的目标检测和识别性能的重要手段^[4]。

我国大陆架周围的大部分海域是浅海, 因此对浅海声场空间相关性的研究尤为重要。近年来, 我国对水平海底的浅海声场空间相关进行了大量研究, 但是在浅海倾斜海底环境下, 结合实验数据的理论研究^[5]还比较少。本文采用浅海倾斜海底模型, 利用抛物型方程理论 RAM 算法进行数值模拟, 分析了声场空间相关特性与海底倾斜角度、接收阵元

与参考阵元的间隔、参考阵元深度及声源深度之间的关系。本文还利用 2001 年东中国海域一次浅海声学实验得到的水声数据, 分析该海域声场垂直相关性, 并与理论值进行了比较。

2 空间相关声场理论

一般常用空间上分开的两个水听器同时接收到的信号波形之间的互相关系数, 来定量表示声场的空间相关性。

归一化空间相关系数可以表示为:

$$\rho_{12}(z, \Delta z) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N P_1(z, r, \omega_i) P_2^*(z + \Delta z, r, \omega_i) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |P_1(z, r, \omega_i)|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |P_2(z + \Delta z, r, \omega_i)|^2}} \quad (1)$$

$$\rho_{12}(r, \Delta r) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N P_1(z, r, \omega_i) P_2^*(z, r + \Delta r, \omega_i) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |P_1(z, r, \omega_i)|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |P_2(z, r + \Delta r, \omega_i)|^2}} \quad (2)$$

收稿日期: 2010-03-08; 修回日期: 2010-05-17

作者简介: 赵梅(1984), 女, 江苏泰兴人, 硕士, 研究实习员, 研究方向为海洋声学。

通讯作者: 赵梅, E-mail: zhaomei20022002@hotmail.com

其中， $\rho_{12}(z, \Delta z)$ 和 $\rho_{12}(r, \Delta r)$ 分别表示在垂直距离上相距 Δz 和在水平距离上相距 Δr 的两个水听器同时接收到的声压的互相关系数， N 为所需频段内频率点总个数， z 表示接收深度， r 表示接收阵元与声源之间的水平距离， ω 为角频率， P_1 和 P_2 分别表示两个水听器同时接收到的复声压信号谱，“*”表示共轭。

本文采用抛物型方程(PE)法^[6]对浅海声场进行数值计算，用分裂-步进法求解抛物型方程，只考虑向外传播的波，声压解可以用下式表示：

$$P(r, z) = H_0^{(1)}(k_0 r) \psi(r, z) \tag{3}$$

其中， $k_0 = \omega/c_0$ 为参考波数， $H_0^{(1)}$ 为一阶汉克尔函数。包络函数 $\psi(r, z)$ 由下式表示：

$$\begin{cases} \psi(r + \Delta r, z) = \exp(ik_0 \Delta l (\sqrt{1+X} - 1)) \psi(r, z) \\ X = k_0^{-2} (\rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 - k_0^2) \end{cases} \tag{4}$$

Δl 为步长，初始场选用 PE 自由初始场，即：

$$\sqrt{1+X} \cdot \psi(0, z) = -\frac{1}{2} \left(\frac{i}{k_0} \right) \delta(z - z_s) \tag{5}$$

z_s 为声源深度， $\psi(0, z)$ 为初始条件。

3 空间相关数值模拟

3.1 模拟海洋环境

采用半无限大均匀液态倾斜海底模型，海底从声源位置到接收点位置逐渐上坡，如图 1 所示。海底倾斜角度 $\alpha = 0^\circ, 0.2^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ$ ，海深 $H=100\text{m}$ ，频率范围为 $100\sim 200\text{Hz}$ 。数值仿真时，海水及海底的声速剖面、密度和声衰减由表 1 给出。

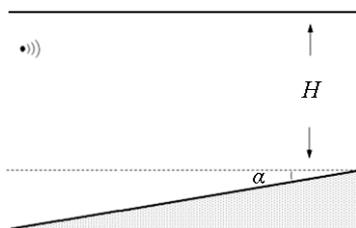


图 1 海洋环境模型
Fig.1 The ocean environment model

表 1 模拟海洋环境参数：海水及海底声速、密度和声衰减
Table 1 The simulate ocean environmental parameters: sound speed, density and attenuation of sea water and seafloor.

	声速/(m/s)	密度/(g/cm ³)	声衰减/(dB/λ)
水	1524	1.0	0
海底	1692	1.88	0.13

3.2 不同海底倾斜角度声场垂直相关系数

利用抛物型方程理论 RAM 程序计算得到频率范围为 $100\sim 200\text{Hz}$ 时的垂直相关系数，参考阵元深

度为 8m 、声源深度分别为 10m 和 90m 时，不同海底倾斜角度的声场垂直相关系数随接收阵元相距参考阵元间隔变化的曲线图，如图 2 所示。参考阵元深度为 86m 、声源深度分别为 10m 和 90m 时，不同海底倾斜角度的声场垂直相关系数随接收阵元相距参考阵元间隔变化的曲线图，如图 3 所示。数值模拟时接收阵与声源的水平间距为 30km 。

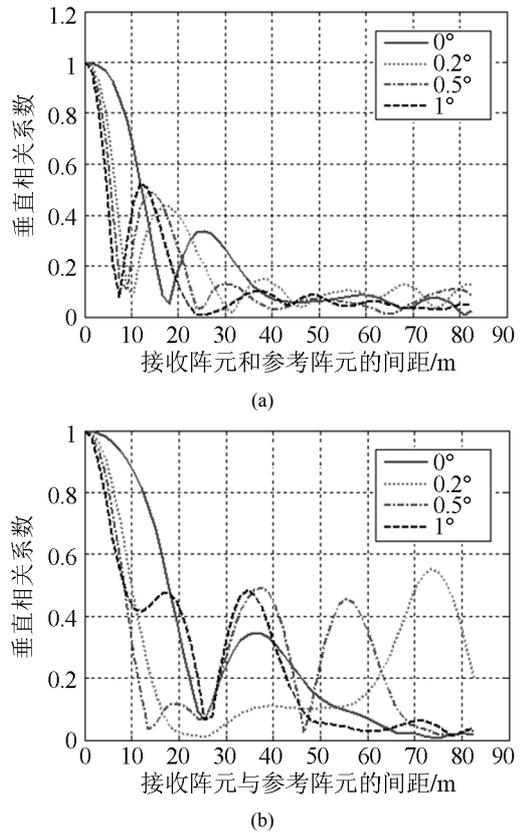


图 2 参考阵元深度为 8m ，声源深度分别为 10m (a)和 90m (b)，垂直相关系数曲线图

Fig.2 The variation curve of vertical correlation coefficients for reference hydrophone's depth of 8m and source depths of 10m (a) and 90m (b)

图 2、3 实线、点线、点划线和虚线分别代表当海底倾斜角度 α 等于 $0^\circ, 0.2^\circ, 0.5^\circ$ 和 1° 时的声场垂直相关系数随接收阵元与参考阵元间距的变化曲线。由图 2 和图 3 可以看出，当频率范围为 $100\sim 200\text{Hz}$ 时，声场垂直相关系数和海底倾斜角度、接收阵元与参考阵元间距密切相关，随着接收阵元和参考阵元的间距的增大先衰减再出现起伏，垂直相关性随着海底倾斜角度的增大而变弱。由图 2、3 还可以看出，参考阵元的选取对于垂直相关性也有着一定关系。

3.3 不同海底倾斜角度水平相关系数

利用抛物型方程理论 RAM 程序计算得到频率范围为 $100\sim 200\text{Hz}$ 时的水平相关系数，得到不同海

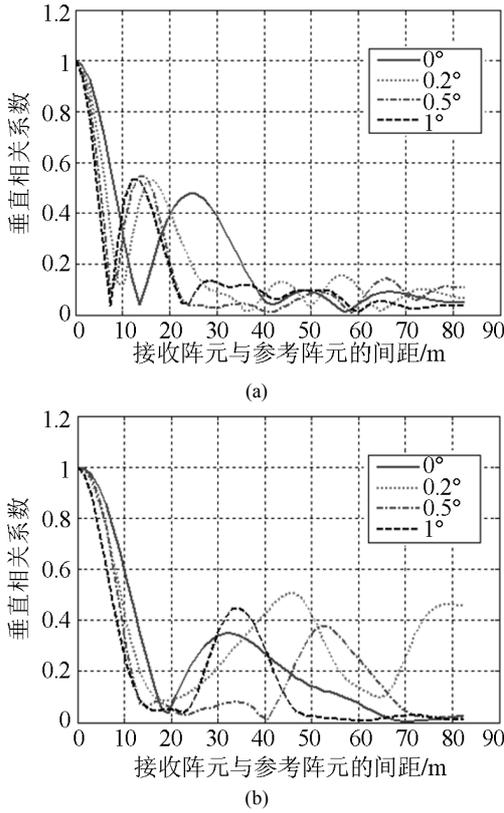


图3 参考阵元深度为 86m, 声源深度分别为 10m(a)和 90m(b): 垂直相关系数曲线图
 Fig.3 The variation curve of vertical correlation coefficients for reference hydrophone's depth of 86m and source depths of 10m(a) and 90m(b)

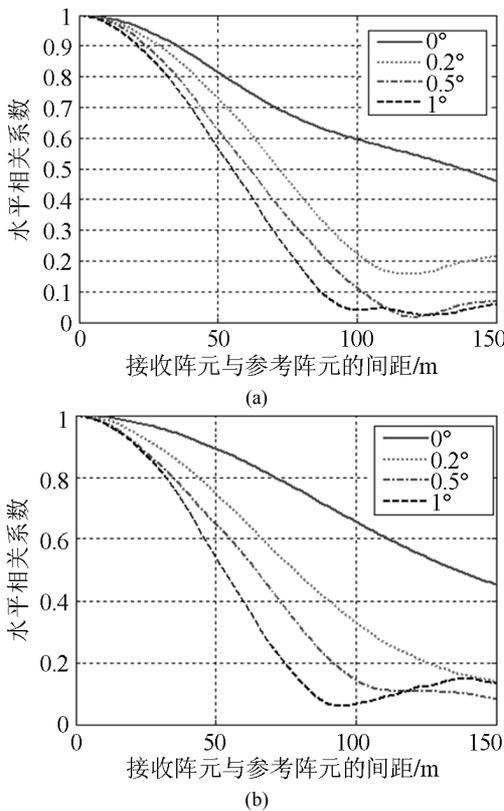


图4 接收阵距离声源 16km(a)和 28km(b)时的水平相关系数曲线图
 Fig.4 The variation curve of horizontal correlation coefficients for range of 16km(a) and 28km(b)

底倾斜角度的声场水平相关系数随接收阵元与参考阵元间距变化的曲线图, 如图 4 所示。数值模拟时接收阵距离声源 16km 和 28km, 水平水听器阵深度为 86km, 声源深度为 10m。

图 4 中实线、点线、点划线和虚线分别代表当海底倾斜角度 α 等于 0° , 0.2° , 0.5° 和 1° 时的声场水平相关系数随接收阵元与参考阵元间距的变化曲线。由图 4 可见, 当频率范围为 100~200Hz 时, 声场水平相关系数与海底倾斜角度、接收阵元与参考阵元间距均有密切关系, 随着海底倾斜角度和接收阵元与参考阵元间距的增大而变弱。

4 空间相关实验

4.1 实验介绍

2001 年 5~6 月, 中美两国水声学家在东中国海域进行了一次浅海声学实验(ASIAEX), 取得了大量的水声数据资料。中方实验设备布置如图 5 所示。实验海区及 M-G 航向海深变化见图 6。

实验采用双船作业, 实验二号船为发射船, 沿图 6 中的 M-G 航向行进过程中投放 50m 深度爆炸的 38g 信号弹, 并记录投弹时刻发射船与接收船之间的距离, 同时测量海深。实验三号船为接收船, 在图 6 中的 M 点附近抛锚, 船下挂 32 元垂直水听器阵接收声信号。垂直阵上 16 阵元间隔 2m, 下 16

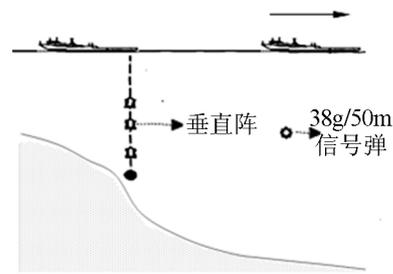


图 5 实验设备布置图

Fig.5 Equipment disposal in experiment

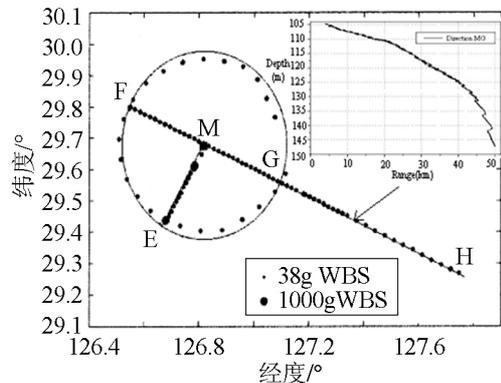


图 6 实验海区及 M-G 航向海深变化图

Fig.6 Experimental area and sea depth variation in M-G course

阵元间隔 4m, 覆盖了从 4.6m 到 90.5m 深的大部分海域。

4.2 实验海洋环境

实验海区海水密度为 1.0g/cm^3 , 海水声速剖面如图 7 所示, 忽略海水中声衰减。海底声速、密度和衰减系数由声场反演得^[7]: 在低频段 100~200Hz, 海底声速为 1607m/s , 密度为 1.8g/cm^3 , 衰减系数为 $0.2\text{dB}/\lambda$ 。

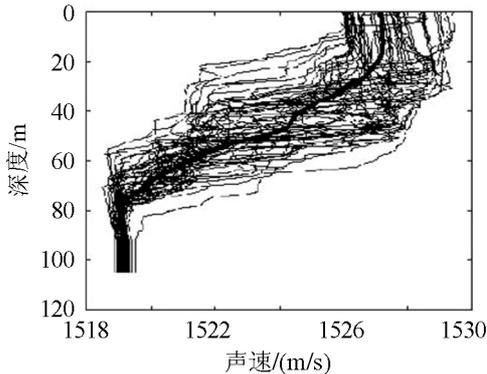


图 7 CTD 测得的声速剖面
Fig.7 Sound speed profile measured by CTD

4.3 实验结果及仿真

对实验三号船所挂垂直水听器阵接收到的声信号进行空间相关性分析, 参考阵元为 32 号水听器(深度 4.6m), 频率范围 100~200Hz, 并将实验海洋环境参数代入抛物型方程模型(RAM 程序)中进行仿真。

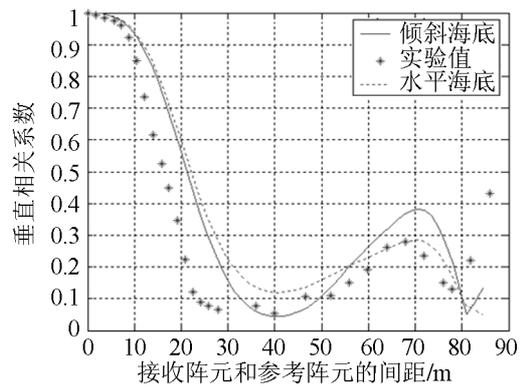
当垂直阵距离声源 14km、20.7km 和 31.5km 时, 声场垂直相关系数实验值以及仿真值随着接收阵元与参考阵元间距的变化关系, 如图 8 所示, 实线代表实际海深(倾斜海底)时的仿真值, 虚线代表当海深不变(水平)时的仿真值。由图 8 可以看出, 考虑实际倾斜海底的垂直相关系数仿真值与实验值的符合程度优于水平海底仿真值, 且垂直相关系数随着接收阵元距离参考阵元间隔的增大先衰减再出现起伏。

5 结论和总结

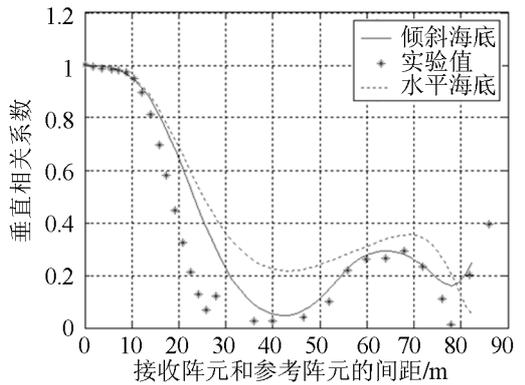
本文利用抛物型方程理论对声场的空间相关进行数值模拟, 结合实验数据, 对浅海倾斜上坡海底的声场空间相关性进行了研究, 得到 100~200Hz 频段内声场空间相关如下结论:

(1) 与海底的倾斜角度密切相关。当海底从声源位置到接收阵位置逐渐上坡时(如图 1 模型所示), 随着海底倾斜角度的变大空间相关性变弱。

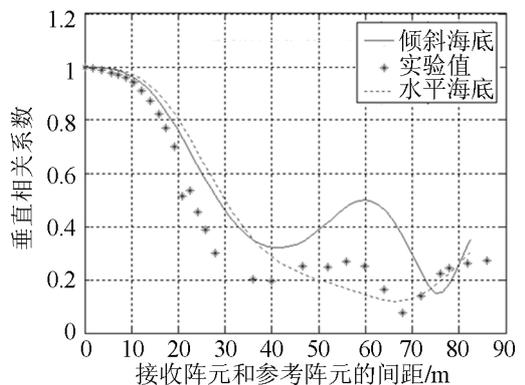
(2) 与接收阵元距离参考阵元间隔密切相关,



(a)



(b)



(c)

图 8 接收阵元距离声源分别为(a)14km、(b)20.7km 和(c)31.5km 时的垂直相关系数实验值与仿真值的比较

Fig.8 Comparison between experimental and calculated values of vertical correlation coefficients for the range of 14km(a), 20.7km(b) and 31.5km(c)

随着间隔的增大, 相关性越弱, 且垂直相关系数随着间隔的增大先衰减再出现起伏。

(3) 浅海倾斜海底声场垂直相关系数与参考阵元深度有一定关系。

(4) 对于声源深度也是敏感的。

海水的声速剖面也是影响声场空间相关特性的一个非常重要的因素, 但在本文中并未进行讨论, 在将来的工作中, 可以对浅海倾斜海底海洋环境下声场空间相关特性随声速剖面的变化规律作进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 李秀林, 李整林, 李风华, 彭朝晖. 浅海水平纵向相关与海底参数反演[J]. 自然科学进展, 2005, 15(1): 38-45.
LI Xiulin, LI Zhenglin, LI Fenghua, PENG Zhaohui. Horizontal-longitudinal correlations in shallow water and the inversion of sea-bed parameters[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(1): 38-45.
- [2] 甘维明, 李风华, 张镇迈. 2001 亚洲海国际海洋声学联合实验声场垂直相关分析[J]. 声学技术, 2002, 21: 145-146.
GAN Weiming, LI Fenghua, ZHANG Zhenmai. Data analysis on the vertical correlation from the asian sea international acoustic experiment(ASIEAX 2001)[J]. Technical Acoustics, 2002, 21: 145-16.
- [3] 黄益旺, 杨士莪. 海洋环境噪声的一般模型及声压空间相关系数[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 1004-1005.
HUANG Yiwang, YANG Shie. Spatial correlation coefficients of sound pressure for general ambient noise models[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 1004-1005.
- [4] 王明洲, 郝重阳, 黄晓文. 高频水声信号空间相关特性研究[J]. 声学与电子工程, 2002, 3: 22-26.
WANG Mingzhou, HAO Chongyang, HUANG Xiaowen. Study on the spatial correlation of high-frequency underwater acoustic signal[J]. Acoustics and electronics engineering, 2002, 3: 22-26.
- [5] 王鲁军. 斜坡海底条件下声场相关特性研究[D]. 中国科学院声学研究所博士论文, 2009 年.
WANG Lujun. Research on properties of the sound spatial correlation in the ocean-continent transition zone[D]. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. 2009.
- [6] Collins M D. A Self-starter for the parabolic equation method[J]. J. Acous. Soc. Am., 1992, 92(4): 2069-2074.
- [7] 李整林, 张仁和, 鄢锦, 彭朝晖, 李风华. 大陆斜坡海域宽带声源的匹配场定位[J]. 声学学报, 2003, 28(5): 425-428.
LI Zhenglin, ZHANG Renhe, YAN Jin, PENG Zhaohui, LI Fenghua. Broadband matched-field source localization in the continental slope environment[J]. Acta Acustica, 2003, 28(5): 425-428.

同济大学钱梦騫教授到声学所东海站进行学术访问

2010 年 7 月 9 日, 正值声学所东海站成立五十周年之际, 应东海站胡长青研究员的邀请, 同济大学钱梦騫教授到声学所东海站进行学术访问。

钱梦騫教授现任中国声学学会常务理事、学会副理事长、学会检测分会副主任委员兼光声学科组组长, 上海市声学学会理事长, 《声学学报》编委, 《声学技术》副主编, 自然科学基金委员会第七、八届学科评审组成员, 南京大学现代声学国家重点实验室学术委员会委员。

上午 10 点, 钱梦騫教授作了题为“高分辨率的近场声成像技术”的报告。胡长青研究员主持了报告会。

声成像是用声波为载体, 以图像的方式正确地记录和观测媒质的有关特性的技术, 与光学成像相比, 声成像具有不仅可对表面成像, 还可以对不透光的试样和活的生物体实现亚表面及内部物性的成像, 而像的反差主要反映的是物质的声学 and 力学特性的差异的特点。钱梦騫教授介绍了各种成像技术的实验结果, 分析了采用提高声频率, 使用造影剂声和近场成像技术实现空间分辨力声成像的有效途径, 并介绍了声成像技术的应用领域。

最后, 钱梦騫教授还与参加报告的专家和学生就上述问题展开了热烈的讨论。

《声学技术》编辑部