陆架斜坡海域信号水平纵向相关特性实验研究

邵炫, 孙超*

西北工业大学航海学院, 西安 710072

收稿日期: 2016-03-01; 接受日期: 2016-05-30; 网络出版日期: 2016-07-21

国家自然科学基金资助项目(编号: 11274252, 11534009)

摘要 对于复杂的海洋传播环境, 如波导环境扰动、各阶模态之间的干涉、环境噪声等, 声信号在传播过程中波形会随空间和时间起伏变化. 接收信号之间的空间相关性是直接影响阵列处理增益的重要因素之一, 因此研究信号的空间相关特性对提高信号处理的性能有重要意义. 本文中, 利用一次海上试验测量数据对陆架斜坡海域不同位置处接收信号的水平纵向相关特性以及水平纵向相关性随船运动的起伏变化情况进行了研究. 海上试验在中国南海海域开展. 试验中, 接收阵为一个192元水平拖曳阵, 以2 m/s的速度移动, 声源为一个宽带声源, 深度为95 m左右, 用钢缆与发射船船尾相连. 实验过程中发射船停机漂泊. 声源发射信号为260–360 Hz的线性调频信号. 为了降低环境噪声对水平纵向相关性测量结果的影响, 数据处理过程中先对接收信号进行带通滤波和匹配滤波处理. 然后, 将接收阵划分成若干个部分重叠的短的子阵列并对各子阵接收信号进行宽带波束形成处理. 最后, 利用各子阵宽带波束形成输出信号计算水平纵向相关系数. 结果发现, 该海域接收信号水平纵向相关长度的测量结果大体分布在13–60 m的范围内, 普遍小于浅海波导环境, 信号水平纵向相关特性易受斜坡海域声场干涉结构和海洋波导环境起伏的影响, 随空间和时间变化明显.

关键词 水平纵向相关性, 陆架斜坡, 相关长度, 实验数据处理, 宽带信号

PACS: 43.30.+m, 43.30.Re, 43.30.Nb

实际环境中, 由于海水介质及其边界在空间和时间上存在有规律的与随机起伏的变化, 声信号在传播过程中波形会随空间和时间起伏变化, 起伏程度高低由空时相关特性衡量^[1]. 信号空间相关性是直接影响阵列处理增益的重要因素之一; 同时, 信号时间相关特性对信号处理中积分时间的上限^[2]、匹配场处理中拷贝场数据的可用长度^[3–5]以及水声通讯中误码率的大小^[6]起决定性的作用. 因此, 深入了解信号空时相关特性对提高信号处理性能有重要的意义.

陆架斜坡介于大陆架和大洋底之间, 是联系海陆的桥梁, 在我国周边海域所占海域面积较大, 且是海上力量由浅海投向深海的必经之路, 具有战略咽喉的意义. 与浅海环境相比, 陆架斜坡海域海水深度大、海底坡度陡, 存在较强的模态耦合和波导环境起伏现象. 与此相应, 该海域信号空时相关性衰减情况较浅海严重、复杂, 阵列处理性能下降更加明显, 所以研究陆架斜坡海域阵列接收信号空时相关特性的需求更加迫切.

引用格式: 邵炫, 孙超. 陆架斜坡海域信号水平纵向相关特性实验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094307
Shao X, Sun C. Experimental study on horizontal longitudinal correlation of the signal at the continental slope area (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094307, doi: 10.1360/SSPMA2016-00124

科研人员从20世纪70年代开始对空间相关性进行研究. 研究初期得到一些实验和理论的结果, 但尚未建立起与波导环境密切相关的能够揭示客观规律的较为完整的理论体系^[7]. 研究后期随着声传播理论的逐渐完善, 人们利用水声波动理论对声场空间相关性进行分析^[8,9]. 在研究空间相关性的同时^[10-12], 各国研究人员对时间相关特性也进行了大量的理论^[13,14]及实验研究^[15-21]. 上述关于空时相关特性的研究主要集中在深远海和沿岸浅海海域, 介于两者之间的过渡海域却鲜有提及.

最近几年, 人们把注意力从浅海逐渐转移到地理环境更加复杂的大陆架和大陆坡等过渡海域, 但大部分集中在过渡海域波导环境对声场空时结构的影响^[22-25], 只有少数几篇文章研究斜坡海底对空间相关特性的制约关系. 2011年, Duda等人^[26]采用固定声源和L型阵在美国德拉华湾进行了长时间的海上实验, 并通过大量接收数据对内波出现前后大陆架海域的水平纵向相关特性进行研究. 实验结果显示内波很大程度上影响水平纵向相关特性, 受内波影响在某些情况下水平纵向相关半径从40个波长迅速下降到只有5个波长左右. 同年, 王鲁军等人^[27,28]研究了斜坡海底对声场空间相关性的影响, 利用楔形简正波理论对仿真结果进行分析, 并进行了实验验证. 文中发现, 声场空间相关特性在斜坡海底条件下与在水平海底条件下存在显著差异; 声场空间相关系数与斜坡角度、接收距离和接收深度有关; 对于上坡和下坡海底, 声场空间相关特性也存在明显的差异. 但该文中采用等声速剖面, 并且斜坡角度较小, 与实际陆架斜坡海域的海洋环境存在较大差距.

本文利用一次海上实验测量数据对陆架斜坡海域阵列接收信号的水平纵向相关特性进行研究, 主要利用已有数据计算该海域水平纵向相关长度, 并分析距离、空间间隔和时间延迟等参数对该海域水平纵向相关性的影响, 为后续环境适应性阵列处理方法提供先验信息.

1 水平纵向相关性定义及计算方法

本节给出了接收信号水平纵向相关系数的定义并介绍了常用的相关系数测量方法.

信号水平纵向相关特性描述了同一时刻具有

定纵向间隔不同阵元上接收信号的相似程度, 其大小由水平纵向相关系数衡量. 当水平纵向相关系数低于某一数值时(通常为0.707), 对应的纵向间隔定义为水平纵向相关长度 L . 假设水听器位于同一深度且具有一定纵向间隔的 $(r, z_r), (r+l, z_r)$ 两点(满足 $l \ll r$), 则这两个水听器同一时刻内接收信号波形之间的互相关函数最大值与信号能量的比值为水平纵向相关系数, 其表达式为

$$\rho(r, r+l) = \max_{\tau} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} p_r(t) p_{r+l}(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} p_r^2(t) dt \int_{-\infty}^{+\infty} p_{r+l}^2(t+\tau) dt}}, \quad (1)$$

其中, $p_r(t)$ 和 $p_{r+l}(t)$ 为接收信号, $p_{r+l}(t+\tau)$ 为经过延时 τ 的信号 $p_{r+l}(t)$, 利用傅里叶变换可得频域内的水平纵向相关系数表达式

$$\rho(l) = \max_{\tau} \frac{\operatorname{Re}[\int_{\omega_1}^{\omega_2} p_r(\omega) p_{r+l}^*(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega]}{\sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |p_r(\omega)|^2 d\omega \int_{\omega_1}^{\omega_2} |p_{r+l}(\omega)|^2 d\omega}}, \quad (2)$$

其中, $p_r(\omega)$ 和 $p_{r+l}^*(\omega)$ 分别为两水听器接收信号的频谱, ω 表示角频率, ω_1 和 ω_2 分别为发射信号的截止角频率.

在后面的实验分析中, 利用式(1)计算接收信号的水平纵向相关系数.

2 实验介绍及数据处理

实验是在我国南海某斜坡海域进行的, 海深从103 m变化到1570 m. 实验声源为一宽带声源, 由拖船吊放入水中, 深度保持在95 m附近, 实验过程中拖船停机漂泊. 用于接收数据的拖曳阵共有192个阵元, 阵元间距为1.5 m, 拖曳阵深度在100 m附近, 实验过程中由另一艘拖船牵引以4节的速度拖行. 实验布设如图1所示. 本次实验中采用线性调频脉冲作为声源发射信号, 其中心频率310 Hz, 带宽100 Hz, 脉冲宽度为1 s, 周期为2 s.

文中对该海域中4个不同位置(A-D)的接收数据进行了分析. 位置A、B具有相似的海底地形并与位置C、D的地形存在较大的差异. 图2给出了对应的海底

图1 实验布设示意图
Figure 1 The diagram of the experimental setting.

地形.

根据文献[15,16,19],若信号 s 由两个不相关的部分组成, $s = s_s + s_n$, 则信号 s 的空间相关性由信号 s_s 和 s_n 的相关性共同决定, 其空间相关系数可以表示为

$$\rho(\tau) = \rho_s \frac{S_s^2}{S^2} + \rho_n \frac{S_n^2}{S^2}, \quad (3)$$

其中, S_i 和 ρ_i 分别为信号 s_i 的能量和空间相关系数, $i = s, n$. 为了减小噪声对相关系数测量值的影响, 文中对子阵波束形成输出的信号进行信号的相关性分析, 令各子阵阵元个数为10.

文中首先对水平拖曳阵接收的声传播信号进行260–360 Hz的带通滤波, 再对经过滤波后的信号进行脉冲压缩, 然后将水平阵划分为若干个彼此有重叠部分的子阵, 对各子阵接收信号进行宽带波束形成, 最后截取各子阵输出信号中的峰值部分按式(1)计算水

平纵向相关系数.

2.1 接收信号的水平纵向相关性

本节主要对4个不同位置处水平阵某一时刻接收信号的纵向相关性进行研究.

图3给出了4个不同位置上接收信号水平纵向相关系数随纵向间隔的变化曲线, 其中纵向间隔 d_l 满足 $d_l = d \cos(\theta)$, d 为两阵元实际距离, θ 表示根据实验记录计算出的声源和阵列中心的连线与阵列水平方向的夹角, 文中用信号到达方向与阵列水平方向的夹角来代替. 每张图上半部分的曲线表示同一时刻信号水平纵向相关系数在阵列上和短时间内的平均值, 即从首阵元开始对满足纵向间隔要求的阵元接收信号的水平纵向相关系数求平均, 并将10 s内的结果进行平均; 直线上各个点的相关系数为0.707, 曲线与直线交点的横坐标为信号的水平纵向相关长度. 每张图下半部分给出了对应距离上水平纵向相关系数的方差.

由图3可以看出, 该海域4个不同位置上接收信号的水平纵向相关系数总体上随纵向间隔的增加出现下降的现象, 只在某些区域出现小幅度的起伏现象; 4个不同位置上接收信号的水平纵向相关长度分别为13, 16, 19和38 m, 说明位置D处具有较好的水平纵向相关性; 各图中不同纵向距离上水平纵向相关系数的方差基本都在 10^{-3} 以下, 说明该结果有较高的稳定性.

2.2 水平纵向相关性随船运动的起伏情况

本节主要研究4个不同位置上水平阵接收信号的纵向相关性随船运动的起伏情况.

图2 (网络版彩图)不同位置的海底地形图. (a) 位置A, B; (b) 位置C, D
Figure 2 (Color online) Bathymetric chart at different locations. (a) Location A and location B; (b) location C and location D.

图3 (网络版彩图)不同位置处信号空间相关系数随空间间隔的变化曲线. (a) 位置A; (b) 位置B; (c) 位置C; (d) 位置D
Figure 3 (Color online) The curve of signal correlation coefficient changing with spatial interval at different locations. (a) Location A; (b) location B; (c) location C; (d) location D.

图4给出了4个不同位置上200 s内声源的时间方位历程图. 仿真中, 采用常规宽带波束形成方法对目标方位信息进行估计, 每次选取的信号长度为1 s. 根据发射信号的特征, 可以得知时间方位历程图中明暗相间的线条对应于声源各个时刻的方位. 图4中, 位置A和B处声源的方位大致相同且变化不大, 在 66° 附近, 位置C和D处声源的方位变化不大, 分别在 50° 和 48° 附近.

图5给出了4个不同位置上接收信号的水平纵向相关性200 s内随船运动的起伏情况. 图中, 横坐标为时间, 纵坐标表示纵向间隔, 黑色实线表示相关系数等于0.707的等高线. 由图可知, 位置A和B处接收信号的水平纵向相关长度随船的移动存在一定的起伏, 总体变化不大, 这两个位置上接收信号的水平纵向相关长度分别在13–15和13–18 m的范围内; 位置C处水平阵随船移动的前50 s内, 信号水平纵向相关长度从20 m增加至30 m, 然后信号的水平纵向相关长度迅速增加

至60 m以上, 并在随后的150 s内一直维持在60 m左右; 与位置A–C相比, 位置D处水平阵随船移动的前60 s内, 接收信号具有很好的水平纵向相关性, 信号水平纵向相关长度绝大多数在50 m以上, 有时甚至超过了60 m, 和位置C处类似, 在随后的140 s内, 信号水平纵向相关长度出现大幅下降的现象, 但仍在21 m以上. 由图5可知, 位置A和B处接收信号的水平纵向相关性不如位置C和D, 但海洋环境变化稳定性高、起伏变化小.

表1对实验海域不同位置处接收信号水平纵向相关性的实验结果进行了汇总. 从中可以看出, 该海域接收信号水平纵向相关特性随位置变化明显, 水平纵向相关长度大体分布在10–60 m的范围内. 该结果普遍小于浅海波导环境^[1], 说明相比于浅海海域, 陆架斜坡海域声场干涉结构更加复杂, 波导环境起伏较大.

2.3 测量结果分析

表1中位置A和B对应的水平纵向相关长度小于其

图 4 (网络版彩图)不同位置上200 s内声源的时间方位历程图. (a) 位置A; (b) 位置B; (c) 位置C; (d) 位置D

Figure 4 (Color online) The time-bearing display of the source in 200 s at different locations. (a) Location A; (b) location B; (c) location C; (d) location D.

图 5 (网络版彩图)信号水平纵向相关系数随船运动的变化趋势图. (a) 位置A; (b) 位置B; (c) 位置C; (d) 位置D

Figure 5 (Color online) The curve of signal horizontal longitudinal correlation coefficient changing with the movement of the ship. (a) Location A; (b) location B; (c) location C; (d) location D.

表 1 不同位置对应的收发距离、目标方位、空间相关长度及方差数量级**Table 1** Transmitter-receiver distance, target bearing, spatial coherence length and order of the variance magnitude at different locations

位置	收发距离 (km)	目标方位 (°)	水平纵向相关长度 (m)
A	33.53	66	13–15
B	31.43	66	13–18
C	19.31	49	20–60
D	18.45	48	21–60

他两组数据. 这里对4个不同位置子阵波束形成输出信号进行研究, 分析导致水平纵向相关性下降的原因. 图6给出了4个不同位置处第1个子阵波束形成输出信号的时域波形. 通过对比发现, 位置C和D处输出信号时域波形的峰值比较集中, 噪声得到了很好的抑制; 而位置A和B处输出信号时域波形的峰值不集中且不突出. 一种合理的解释是, 位置A和B处声源与接收阵列距离较远, 信噪比较低, 同时位置A和B声场干涉结构更为复杂. 表2列出了不同位置处经子阵波束形成处理后输出信号最大峰值的信噪比.

3 小结

本文利用一次海上实验测量数据对陆架斜坡海域接收信号水平纵向相关特性进行研究. 文中在实验海域对4个不同位置接收数据进行处理, 给出了各阵元接收信号的水平纵向相关系数测量值和水平纵向相关系数随纵向间隔以及船移动时间的变化曲线.

结果表明, 该海域接收信号水平纵向相关长度大

图 6 (网络版彩图)4个不同位置处第1个子阵输出信号时域波形. (a) 位置A; (b) 位置B; (c) 位置C; (d) 位置D**Figure 6** (Color online) The time domain waveforms of the output signals of the 1st subarrays at different locations. (a) Location A; (b) location B; (c) location C; (d) location D.**表 2** 不同位置处的经子阵波束形成处理后输出信号最大峰值的信噪比**Table 2** The signal-to-noise ratios of the highest peaks of the output signals after the subarray beamforming at different locations

位置	信噪比 (dB)
A	37.18
B	34.64
C	39.80
D	38.10

体分布在13–60 m的范围内, 测量结果普遍小于浅海波导环境, 该海域水平纵向相关特性随空间和时间变化明显, 易受到斜坡海域声场干涉结构和海洋波导环境扰动的影响.

致谢 感谢参加2014年南海综合调查实验的全体工作人员, 他们的辛勤工作为本文提供了可靠宝贵的实验数据.

参考文献

- Zhang R H, Zhang S R, Xiao J Q, et al. Spatial correlation and temporal stability of long-range sound field in shallow water (in Chinese). *Acta Acust*, 1981, 6: 9–19 [张仁和, 张双荣, 肖金泉, 等. 浅海远程声场的空间相关性与时稳定性. *声学学报*, 1981, 6: 9–19]
- Carter G C. Coherence and time delay estimation. *Proc IEEE*, 1987, 75: 236–255
- Yoo K, Yang T C. Broadband source localization in shallow water in the presence of internal waves. *J Acoust Soc Am*, 1999, 106: 3255–3269
- Li Z L, Yan J. The effects of internal waves on broadband source localization in shallow water. In *Theoretical and Computational Acoustics 2001*. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2002. 201–207
- Ji G H, Li Z L, Dai Q X. The effects of the internal waves on temporal correlation of matched-field processing in shallow water (in Chinese). *Acta*

- Acust, 2008, 33: 419–424 [季桂花, 李整林, 戴琼兴. 浅海中内波对匹配场时间相关的影响. 声学学报, 2008, 33: 419–424]
- 6 Ren Y, Wu L X, Li Z L, et al. The signal temporal correlation length with the existence of solitons in the South China Sea (in Chinese). *Acta Acust*, 2010, 35: 515–522 [任云, 吴立新, 李整林, 等. 南中国海存在孤立子内波条件下的声场时间相关半径. 声学学报, 2010, 35: 515–522]
- 7 Shang E C. Theory of horizontal coherence of signal field in shallow water (in Chinese). *Acta Acust*, 1979, 4: 30–33 [尚尔昌. 随机浅海信道中信号场横向相干理论. 声学学报, 1979, 4: 30–33]
- 8 Rozenfeld I, Cable P, Carey W M, et al. Spatial coherence in shallow water. In: *Proceedings of OCEANS '97 MTS/IEEE Conference*. Halifax: IEEE, 1997. 597–601
- 9 Zhu R. Spatial horizontal coherence of sound in shallow water. *J Acoust Soc Am*, 1992, 92: 956–961
- 10 Morgan D R. Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with applications to large-array matched-field beam-forming. *J Acoust Soc Am*, 1990, 87: 737–747
- 11 Green M C. Gain of a linear array for spatially dependent signal coherence. *J Acoust Soc Am*, 1976, 60: 129–132
- 12 Zhang A M, Huang X D, Lin J. Effect of spatial correlation of sound field on subspace-based high-resolution spatial spectrum estimation. *Acta Acust*, 2006, 31: 132–139 [张爱民, 黄晓砥, 林京. 声场空间相关对基于子空间的高分辨率空间谱估计的影响. 声学学报, 2006, 31: 132–139]
- 13 Voronovich A G, Ostashev V E, Colosi J A. Temporal coherence of acoustic signals in a fluctuating ocean. *J Acoust Soc Am*, 2011, 129: 3590–3597
- 14 Yang T C. Temporal coherence of acoustic rays and modes using the path integral approach. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131: 4450–4460
- 15 Yang T C. Temporal coherence of sound transmissions in deep water revisited. *J Acoust Soc Am*, 2008, 124: 113–127
- 16 Spiesberger J L. Temporal and spatial coherence of sound at 250 Hz and 1659 km in the Pacific Ocean: Demonstrating internal waves and deterministic effects explain observations. *J Acoust Soc Am*, 2009, 126: 70–79
- 17 Duda T F. Temporal and cross-range coherence of sound traveling through shallow-water nonlinear internal wave packets. *J Acoust Soc Am*, 2006, 119: 3717–3725
- 18 Mignerey P C, Orr M H. Observations of matched-field autocorrelation time in the South China Sea. *IEEE J Oceanic Eng*, 2004, 29: 1280–1291
- 19 Yang T C. Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water. *J Acoust Soc Am*, 2006, 120: 2595–2614
- 20 Huang X, Li Z, Zhang R. Effects of the internal waves on the time correlation of the acoustic fields in the East China Sea. *Prog Nat Sci*, 2004, 14: 945–949
- 21 Ji G H, Li Z L, Dai Q X. Coherence-time of matched-field processing in shallow water in the presence of linear internal waves. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 094301
- 22 Ballard M S, Lin Y T, Lynch J F. Horizontal refraction of propagating sound due to seafloor scours over a range-dependent layered bottom on the New Jersey shelf. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131: 2587–2598
- 23 Colosi J A, Duda T F, Lin Y T, et al. Observations of sound-speed fluctuations on the New Jersey continental shelf in the summer of 2006. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131: 1733–1748
- 24 Heaney K D, Campbell R L, Murray J J. Comparison of hybrid three-dimensional modeling with measurements on the continental shelf. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131: 1680–1688
- 25 Knobles D P, Stotts S A, Koch R A. Low frequency coupled mode sound propagation over a continental shelf. *J Acoust Soc Am*, 2003, 113: 781–787
- 26 Duda T F, Collis J M, Lin Y T, et al. Horizontal coherence of low-frequency fixed-path sound in a continental shelf region with internal-wave activity. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131: 1782–1797
- 27 Wang L J, Peng Z H, Yuan Y Y, et al. The effects of sloping bottom on horizontal longitudinal coherence (in Chinese). *Tech Acoust*, 2011, 30: 311–315 [王鲁军, 彭朝晖, 袁延义, 等. 斜坡海底对声场水平纵向相关性的影响. 声学技术, 2011, 30: 311–315]
- 28 Wang L J, Peng Z H, Li Z L. The effects of sloping bottom on the vertical correlation (in Chinese). *Acta Acust*, 2011, 36: 596–604 [王鲁军, 彭朝晖, 李整林. 斜坡海底条件下声场垂直相关特性研究. 声学学报, 2011, 36: 596–604]

Experimental study on horizontal longitudinal correlation of the signal at the continental slope area

SHAO Xuan & SUN Chao^{*}

School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Due to the complex underwater propagation environment, such as environment disturbance, interference between normal modes, and ambient noise, the waveforms of received signals change over space and time and cause the attenuation of the spatial correlation between the received signals. The spatial correlation between the received signals affects the performance of the array signal processing directly. Thus, it is important to study the spatial correlation characteristics between received signals. In the paper, the horizontal longitudinal correlations between the received signals for 4 different locations at the continental slope area and the changes of the horizontal longitudinal correlations during the movement of the ships are studied by analyzing the experiment data. The experiment is carried out in the South China Sea. In the experiment, the receiving array, a horizontal linear array with 192 sensors, is dragged by a ship moving with 2 m/s, and the source with a depth of 95 m is dragged by another ship drifting at sea. The transmit signal is linear frequency modulation signal, with a frequency of 260 to 360 Hz. To reduce the effects of the ambient noise on the horizontal longitudinal correlations, the band-pass filter and the matched filter are applied first. Then the receiving array is divided into many partly overlapped short subarrays and the broadband beamforming is applied to the signals after filtering on each subarrays. Finally the beamforming outputs are used to calculate the horizontal longitudinal correlation coefficients between received signals. Results show that the horizontal longitudinal correlation length of the received signal is at the range of 13 to 60 m, which is generally less than the correlation length in the shallow water environment, and that the horizontal longitudinal correlations between the received signals change over space and time obviously and are dependent on the interference structure of the sound field and the environment disturbance.

horizontal longitudinal correlation, continental slope, correlation length, experimental data processing, broadband signal

PACS: 43.30.+m, 43.30.Re, 43.30.Nb

doi: [10.1360/SSPMA2016-00124](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00124)