

南中国海存在孤立子内波条件下 的声场时间相关半径^{*}

任 云¹ 吴立新¹ 李整林¹ 周仕锋²

(1 中国科学院声学所声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国人民解放军 91557 部队 舟山 316041)

2009 年 11 月 9 日收到

2010 年 3 月 2 日定稿

摘要 在动态的海洋环境中, 由于数据向量和拷贝场之间的失配, 匹配场处理器的性能会发生退化。数据向量的时间相关半径是这种退化的一种量度。通过 2001 年 ASIAEX 南海实验中垂直阵上水听器接收到的声场数据求取了 400 Hz 窄带信号的声场时间相关。从实验数据处理结果观察到, 伴随着传播路径上非线性内波的进入, 声场的时间相关半径减小。同时利用一个二维的平流冻结海洋模型和传播路径上三个温度链的温度数据对声场进行了数值仿真, 分析了不同频率下的声场时间相关半径。结果表明: 实验结果与仿真的 400 Hz 信号的声场时间相关较为一致。可见, 在时变的海洋环境下, 声信道中存在孤立子内波将会使声场的时间相关半径大大缩短。

PACS 数: 43.30

The signal temporal correlation length with the existence of solitons in the South China Sea

REN Yun¹ WU Lixin¹ LI Zhenglin¹ ZHOU Shifeng²

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

(2 The 91557th unit of PLA Zhou Shan 316041)

Received Nov. 19, 2009

Revised Mar. 2, 2010

Abstract Matched-field processors can suffer degradation in dynamic ocean environments due to mismatch between data and replica vectors. One measure of such degradation is the temporal correlation length of the data vectors. Temporal correlation length for 400 Hz narrow band signals has been extracted from the acoustic data received by a vertical hydrophone array of the 2001 Asian Seas International Acoustics Experiment(ASIAEX). With nonlinear internal waves entering the acoustic signal propagation path, signal temporal correlation length dropped fast. In addition, sound field is simulated from the temperature data of three temperature sensor arrays on the propagation path with a two-dimensional advective frozen-ocean model. Signal temporal correlation length of the simulation for 400 Hz signals can be compared with the experimental data qualitatively. It is concluded that, in this environment, nonlinear internal waves propagating in the acoustic path will shorten the signal temporal correlation length.

引言

声速场是温度、盐度、压力的函数。通常温度是最主要的因素。在动态的浅海中, 由于非线性内波和

内潮汐等活动引起的物理海洋环境要素变化, 使温度和盐度随着时间变化。这些活动的时间尺度从内波的几分钟变化到内潮汐的几天或更长。这种动态的声速场环境造成了声信号起伏^[1]、声传播损失异常、复杂的多途效应、严重的频散效应和声场时间相

* 国家自然科学基金资助 (10874200)、中国科学院重大科研装备研制项目资助 (YZZ00745) 和中国科学院知识创新工程重大项目资助 (KZCX1-YW-12-2)。

图2给出了5月5日UTC时间2214海洋表面存在非线性内波时的合成多孔径雷达卫星照片。来自吕宋海峡的非线性内波以倾斜的角度穿过声传播路径,首先到达声源S2,然后到达接收阵R。

图3是3个温度链上从5月3日到17日长达15天的温度变化。可以把这段时间内的内波活动分成两类:5月3—6日和5月15—17日,主要存在小振幅线性内波;5月7—14日,存在线性内波的同时伴有大振幅的孤立子内波出现。为了说明问题,选取图3中对应于5月4、7和11日这三天具有典型内波特征的温度剖面局部进行放大并由图4—图6分别给出。可见,5月4日主要存在线性内波,5月7日非线性内波开始进入传播路径,5月11日几乎全天都有非线性内波。图4显示了5月4日温度随时间和深度的变化,(a),(b)和(c)三个位置上内波前沿的到达时间在图中用箭头标出,分别是7:00,10:30和12:06。图4(a)和图4(c)两处内波前沿到达时间差大约是306 min。在图5(a)、图5(b)和图5(c)中伴随内潮汐出现的大振幅的非线性内波到达三个位置的时间分别是5月7日8:06,11:40和13:16,(a)和(c)两处的到达时间差大约是310 min,两个到达

时间差基本吻合。图6中5月11日env200和VLA处一直有非常强烈的非线性内波活动,前后内波重叠在一起,无法分辨出内波前沿。由图5和图6中大幅度孤立子内波在各站点的到达时间差及站点间距离可得到非线性内波在传播路径上的速度,最后估计出内波沿S2到R共31.9 km声传播路径上的平均传播速度是1.7 m/s。

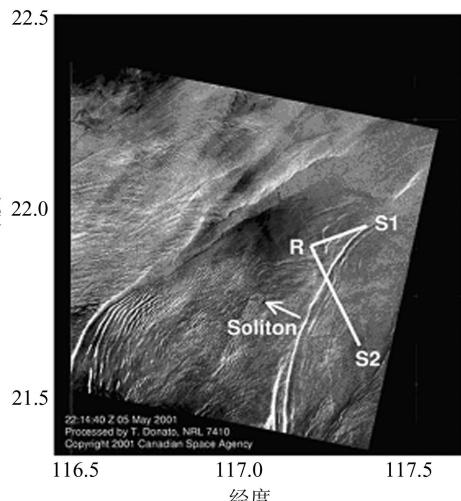


图2 内波穿过声传播路径(S1-R)和(S2-R)的雷达卫星图像

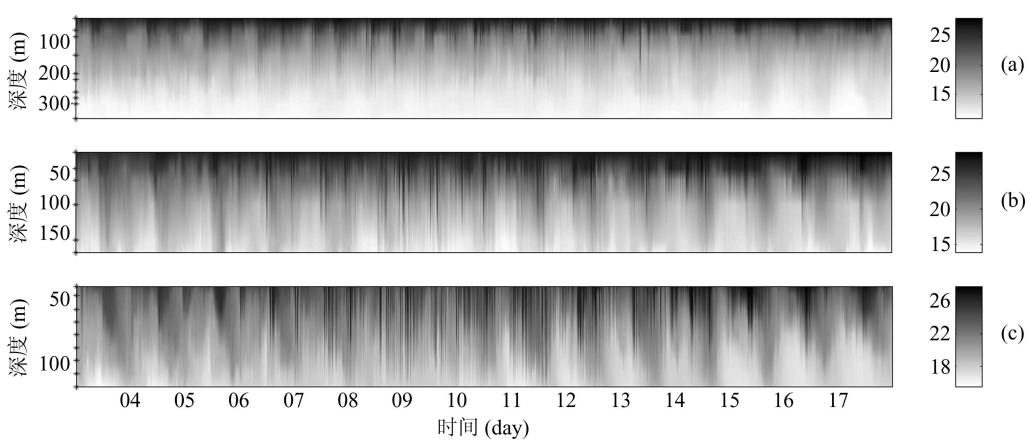


图3 5月3—17日之间三个温度链处温度随时间和深度的变化 ((a) env350; (b) env200; (c) VLA)

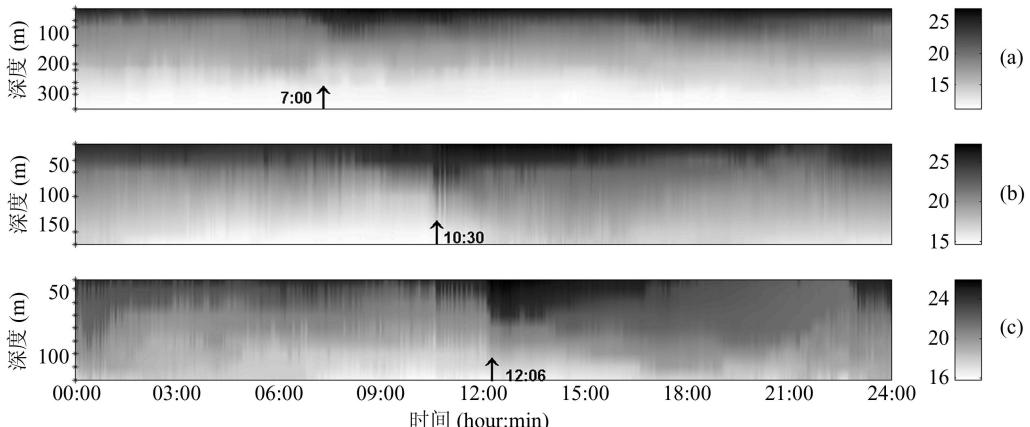


图4 5月4日三个温度链处温度随时间和深度的变化 ((a) env350; (b) env200; (c)VLA; 箭头标出内波前沿的到达时间)

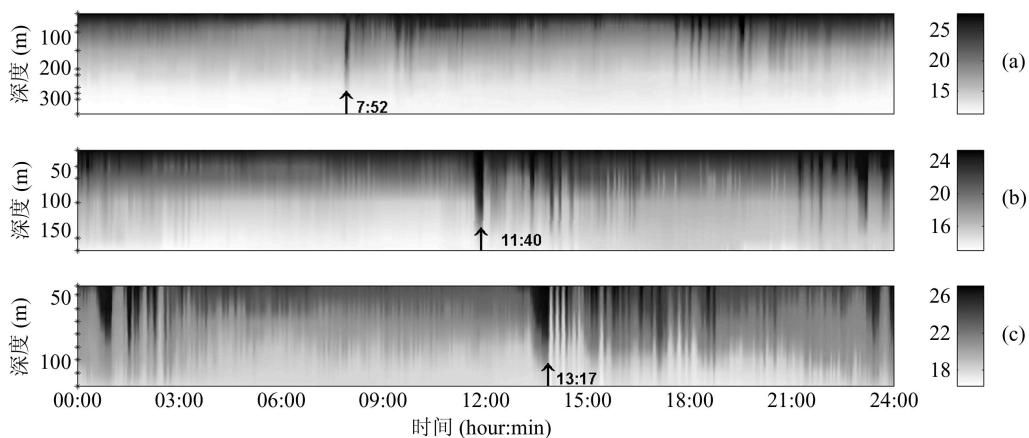


图 5 5月7日三个温度链处温度随时间和深度的变化 ((a) env350; (b) env200; (c) VLA; 箭头标出内波前沿的到达时间)

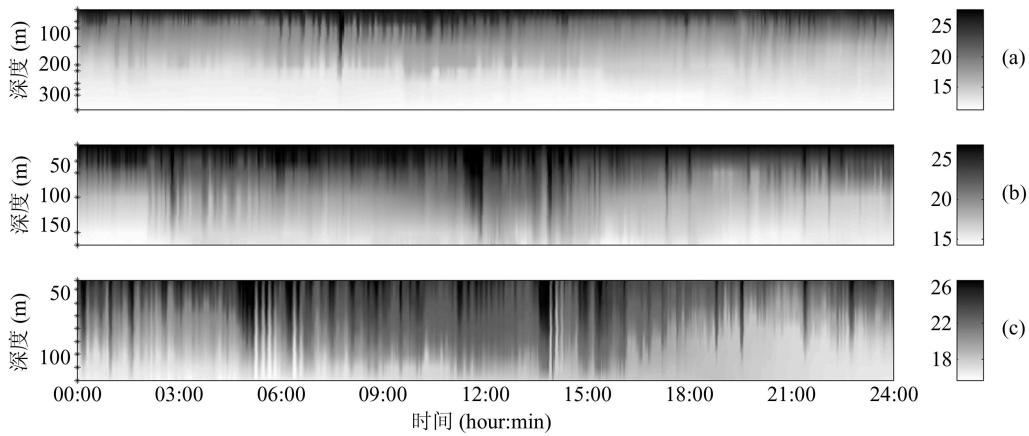


图 6 5月11日三个温度链处温度随时间和深度的变化 ((a) env350; (b) env200; (c) VLA)

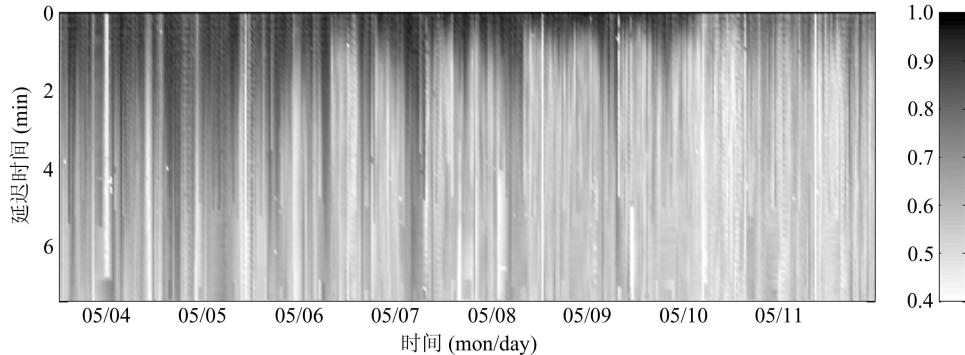


图 7 5月3日到11日实验数据 400 Hz 声信号的时间相关随时间和延迟时间的变化

2 声场时间相关实验分析

为了研究存在内波时声传播信号的稳定性,首先研究实验数据的声场时间相关。实验中 400 Hz 声源信号的发射形式为每隔半个小时重复发射一组由 88 个持续时间长度为 5.11 s 的 M 序列信号,等效于每组信号发射时间持续长度约 7.5 min,每组之间的时间间隔为 $\Delta t = 30$ min。在声场时间相关实验分析中,把水听器接收到的声源在时刻 $t = k\Delta t$ (k 为发射信号的组序号)发出的 88 个 M 序列信号中的第 1

个脉冲信号作为 $p_1(t')$,让 $p_1(t')$ 与组内的所有 88 个 M 序列信号(标识为 $p_2(t' + \tau)$)按下式求相关:

$$\rho(t, \tau) = \max_{\tau} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p_1(t') p_2(t' + \tau) dt'}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} p_1^2(t') dt' \right]^{1/2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} p_2^2(t') dt' \right]^{1/2}}. \quad (1)$$

并定义声场时间相关半径 $\tau_{0.707}$ 为声场时间相关下降到 0.707 时对应的延迟时间,即 $\rho(t, \tau_{0.707}) = 0.707$ 。为了减小分析误差,求得垂直阵不同水听器信号的时间相关后,进行深度统计平均得到最终的声场时间相关实验结果。

图 7 给出不同时刻的声场时间相关,其中横坐

标和纵坐标分别对应于 $\rho(t, \tau)$ 中的绝对时间 t 和延迟时间 τ 。对比图 3 和图 7, 可以定性的看出: 从 5 月 3 日到 6 日, 传播路径上只有小振幅的线性内波, 在图 7 所示的声场时间相关半径基本可达到 5 min 以上。从 5 月 7 日到 5 月 11 日, 由于大振幅非线性内波的存在, 有时声场时间相关半径只有不到 1 min。

3 声场时间相关理论分析

为了进一步说明图 7 中声场时间相关半径变化与图 3 中大振幅孤立子内波出现的关系, 这里利用同步实验中获得的海洋环境对声场时间相关特性进行了理论分析。分析的基本思路是: 利用实验的温度链数据和 CTD 数据结合一个二维平流模型重构出随时间和空间变化的海洋声速场分布; 带入二维声场传播程序计算不同时刻存在内波时的声场, 并根据声场时间相关的定义理论分析声场时间相关半径。

图 3 只是给出了 3 个空间站位点上不同时间测量的温度剖面, 而在声场时间相关分析中需要用到随时间和空间变化的声速剖面。根据二维平流模型, 假设在声传播路径上, 声速剖面以稳定的速度平流传输经过温度链, 这样即可把 3 个温度链位置处测得的随时间变化温度剖面转化成某一时刻随距离变化的温度剖面。在第 1 节中已根据大幅度的孤立子内波的到达时间差和温度链位置推算出了内波沿传播方向的传播速度为 $a = 1.7 \text{ m/s}$, 假设 r_0 为温度链的位置, 则 r_0 点 t_0 时刻的温度剖面在时刻 t 传播到距离 r :

$$r = r_0 + a(t - t_0). \quad (2)$$

对于本文坐标定义, env350 上的温度数据 $r_0 = 0 \text{ m}$, env200 上的温度数据 $r_0 = 24500 \text{ m}$, VLA 上的温度链 $r_0 = 31900 \text{ m}$ 。有了温度场空间分布, 即可

结合 CTD 测量的盐度剖面计算出声速场随时间和空间的分布。作为例子, 图 8 给出根据 env350 上的温度数据在 5 月 13 日 10:30 时刻得到的一个声速场空间分布。

考虑到声波速度远大于内波的传播速度, 声信号传播到达接收器的时间里, 内波传播距离极为有限, 可以视内波场为准静态。使用 RAM-PE^[11] 计算存在内波时水平变化环境下的声场, 并数值分析声场时间相关。图 9(b) 和图 9(c) 分别是利用温度链 env350 和 env200 数据重构的声速场仿真计算得到的 5 月 3 日—5 月 11 日期间的声场时间相关, 横坐标和纵坐标定义同图 7。为了便于与实验结果比较, 把图 7 实验结果放在图 9(a) 中一并给出。对比图 9 中的实验结果和仿真结果及图 3 的温度剖面可见, 存在孤立子内波时声场时间相关有明显的下降。

根据式(1)下面的定义, 可求出图 9 中不同时刻 t 时的声场时间相关半径 $\tau_{0.707}$ 。从图 3 可以看出, 5 月 3—6 日和 5 月 15—17 日主要存在小振幅线性内波, 而 5 月 7—14 日, 存在线性内波的同时伴有大振幅的孤立子内波出现。下面选取 5 月 3 日—5 月 5 日和 5 月 9 日—5 月 11 日两个时间段, 分别求取不同时刻的时间相关半径, 并进行统计分析, 得到声场时间相关半径的概率分布如图 10 和图 11 所示。图 10 是 5 月 3 日—5 月 5 日 400 Hz 声信号时间相关半径的概率分布, 可见无论是实验声场时间相关半径, 还是用两个不同温度链数据重构的声速场仿真结果, 基本上最大概率位于时间相关半径为 200 s 左右处。而图 11 中显示 5 月 9 日—11 日的声场时间相关半径集中分布在 50~100 s 之间, 时间相关长度比 5 月 3 日—5 月 5 日要短很多。这主要是由于图 6 所示的孤立子内波频繁出现所致。

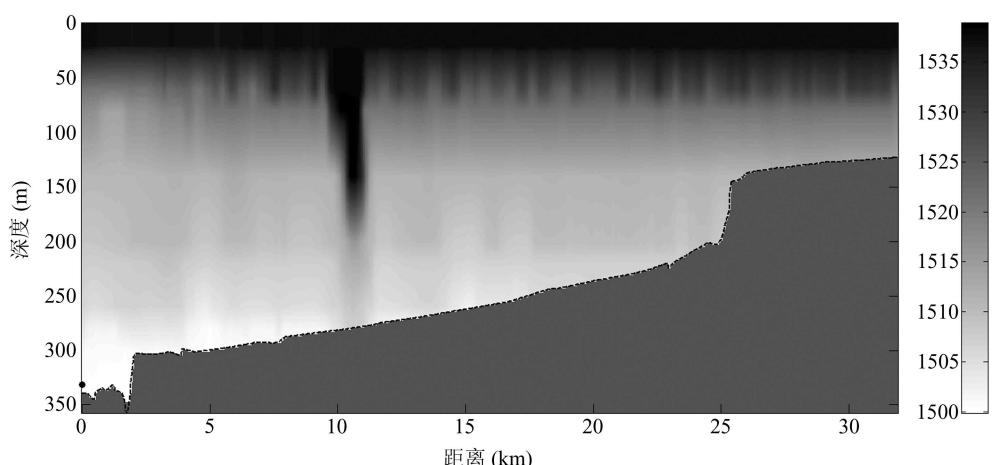


图 8 根据 env350 上的温度数据重构的 5 月 13 日 10:30 时 S2-R 声传播路径上的声速空间分布

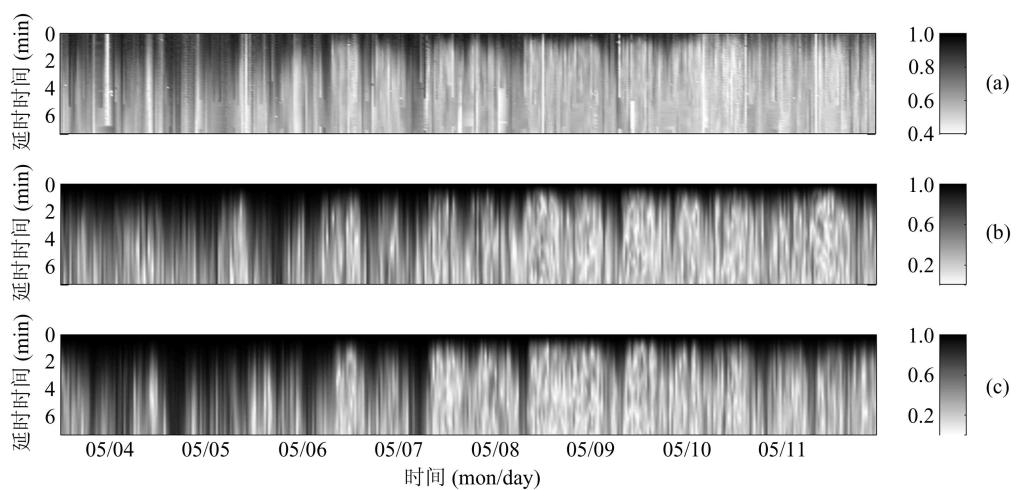


图 9 5月3日—5月11日 400 Hz 声信号时间相关随时间和延迟时间的变化

(a) 实验数据; (b) 利用 env350 的温度数据仿真结果; (c) 利用 env200 的温度数据仿真结果

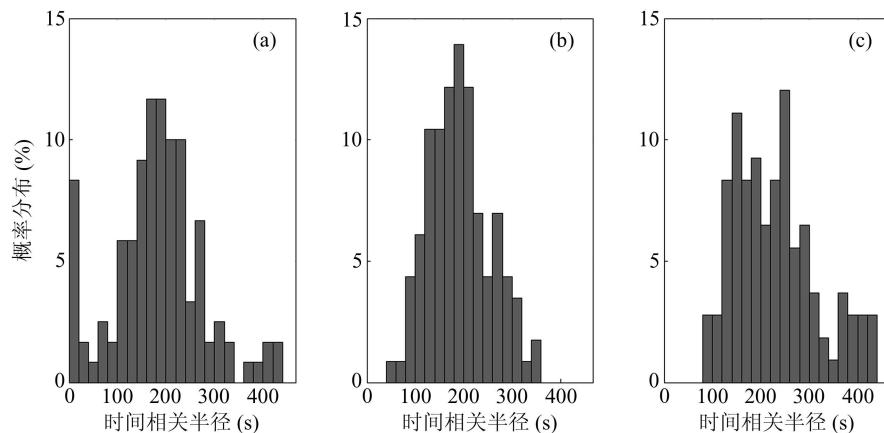


图 10 5月3日—5月5日 400 Hz 声信号时间相关半径的概率分布

(a) 实验数据; (b) 利用 env350 的温度数据仿真结果; (c) 利用 env200 的温度数据仿真结果

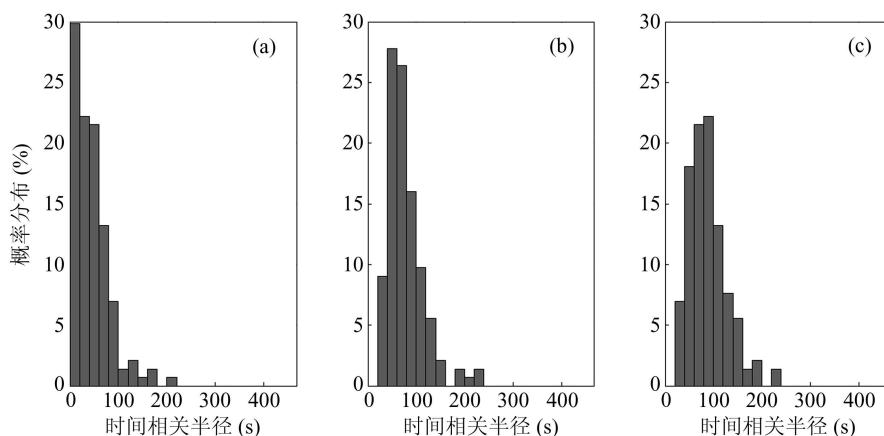


图 11 5月9日—5月11日 400 Hz 声信号时间相关半径的概率分布

(a) 实验数据; (b) 利用 env350 的温度数据仿真结果; (c) 利用 env200 的温度数据仿真结果

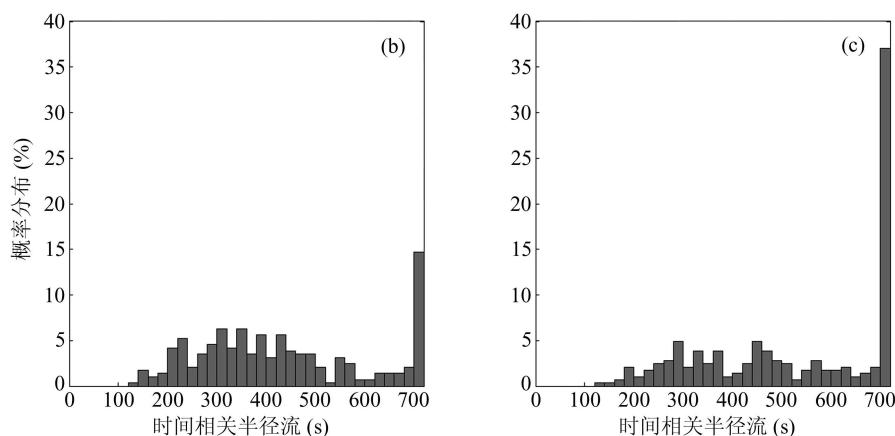


图 12 5月4日 224 Hz 声信号时间相关半径的概率分布

(b) 利用 env350 的温度数据仿真结果; (c) 利用 env200 的温度数据仿真结果

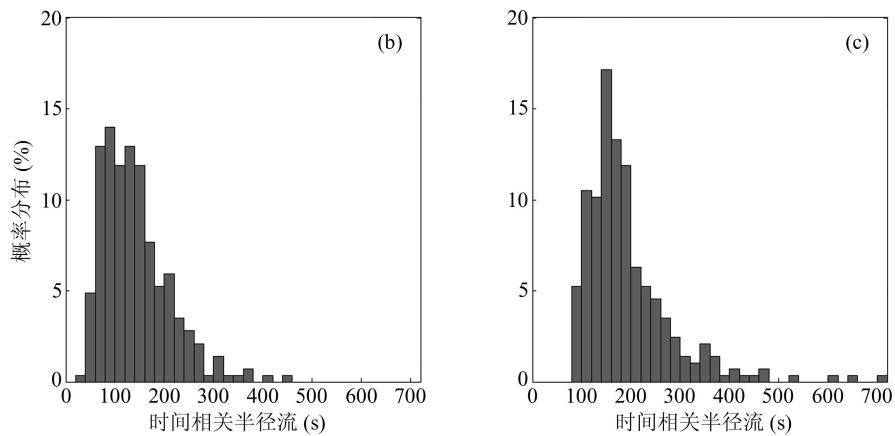


图 13 5月11日 224 Hz 声信号时间相关半径的概率分布

(b) 利用 env350 的温度数据仿真结果; (c) 利用 env200 的温度数据仿真结果

为了研究内波对不同频率声场时间相关半径的影响, 这里也仿真研究了声源频率是 224 Hz 时, 在 5 月 4 日和 11 日两天不同的海洋环境下的声场时间相关半径, 并得到如图 12 和图 13 所示的概率分布。对比图 10(b-c) 和图 12(b-c) 可见, 相同环境条件下, 对于 224 Hz 声场信号出现概率最大的时间相关半径要比 400 Hz 声信号的时间相关半径大将近 1 倍以上。对利用 env200 温度数据仿真的 400 Hz 和 224 Hz 信号在 5 月 11 日一天内的时间相关半径进行平均, 得到两个频率信号在该天内的平均时间相关半径分别是 98 s 和 193 s。可以看出时间相关半径与频率的 -1.2 次方成正比。T.C.Yang 处理多次实验数据得到的结果是: 时间相关半径与频率的 -1.5 次方成正比; Ji G H 利用数值仿真得到的结果是: 存在线性内波时声场时间相关半径与频率的 -1.1 次方成正比。由于本文与 Ji G H 都是利用数值仿真来得到时间相关半径和频率的关系, 所以两个结果相差不大, 不完全一致的原因是 Ji G H 只考虑了线性内波, 而本文同时考虑了线性内波和孤立子内波。本

文结果与 T.C.Yang 通过处理实验数据得到的结果差别较大。原因是实验环境比数值仿真环境要复杂, 如实验数据中包含噪声、海面起伏及声场的三维效应等因素的影响, 而数值仿真时没有考虑上述因素只考虑了内波的影响。

4 结论

实验分析了 2001 年 ASIAEX 南海实验中跨大陆架环境条件下 400 Hz 声信号的声场时间相关, 并发现伴随着传播路径上孤立子内波的进入、幅度和出现频繁程度加大, 声场时间相关半径减小。利用二维的平流冻结海洋模型和传播路径上的三个温度链的温度数据数值仿真不同频率下的声场时间相关半径, 并获得了与实验结果较为一致的时间相关半径概率分布。不完全一致的原因有以下两个方面: 一是二维的平流冻结海洋模型简化了内波在传播过程中的变化; 另外, 实验数据中不可避免的有噪声成分, 而仿真数据则没有考虑噪声。

实验数据和仿真结果说明声传播路径上的大振幅非线性内波是造成声场时间相关半径下降的重要原因,且声信号频率越高受内波的影响就越大,时间相关半径越小。内波引起声散射和模式耦合,从而导致时间相关的下降。声源频率较高时,内波引起声场耦合模式更复杂,接收声场不仅包含低阶模态,还包含相关性较差的高阶模态,声场的时间相关下降的更快。

参 考 文 献

- 1 王宁, 张海青, 王好忠, 高大治. 内波、潮导致的声简正波幅度起伏及其深度分布. 声学学报, 2010; **35**(1): 38—44
- 2 Yoo K, Yang T C. Broadband source localization in shallow water in the presence of internal waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999; **106**(6): 3255—3269
- 3 Li Z L, Yan J. The effects of internal waves on broadband source localization in shallow water. In Fifth International Conference on Theoretical and Computational Acoustics 2001, ed By Shang E C, Li Q H, Gao T F. Beijing China, 2001: 201—207
- 4 Huang X D, Li Z L, Zhang R H. Effects of the internal waves on the time correlation of the acoustic fields in East China Sea. *Progress in Nature Science*, 2004; **14**(11): 945—949
- 5 Mignerey P C, Orr M H . Observations of matched-field autocorrelation time in the South China Sea. *IEEE Journal Of Oceanic Engineering*, 2004; **29**(4): 1280—1291
- 6 Yang T C. Measurement of temporal coherence of sound transmissions through shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2006; **120**(5): 2595—2614
- 7 Yang T C. Temporal coherence of sound transmissions in deep water revisited. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008; **124**(1): 113—127
- 8 季桂花, 李整林. 浅海内波对匹配场时间相关的影响. 声学学报, 2008; **33**(5): 419—424
- 9 Ji G H, Li Z L. Coherence-time of matched-field processing in shallow water in the presence of linear internal waves. *Chin. Phys. Lett.*, 2008; **26**(9): 0943011—0943014
- 10 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**(1): 70—79
- 11 Collins M D. A split-step Pade solution for parabolic equation method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993; **93**(4): 1736—1742