2001ASIAEX 南中国海实验声场的统计特征

吴立新^{①*}, 任云^①, 牛海强^{①②}, 汪俊^①, LYNCH James F.^③, DUDA Timothy F.^③

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 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 美国 Woods Hole 海洋研究所, MA 02543-1053, USA

*联系人, E-mail: wlx@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2012-09-29; 接受日期: 2012-11-01

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10974218, 11174312, 11125420)

摘要 内波是引起海洋环境变化的主要原因之一, 频繁的内波活动使得水声信道的时空稳定性变差, 形成具有时-空-频变特征的复杂水声快变信道。对 2001ASIAEX 南中国海实验中 400 Hz 声场数据的统计特征进行了分析, 着重分析了 5 月 2 日-5 月 17 日 16 元垂直阵观测数据的时间相关特征, 声源位于接收阵以南 31.3 km 处, 分析结果表明: 声场时间相关半径与内波特性密切相关, 最大的内波特别是非线性孤子内波(dnoidal 内波)使声场时间相关尺度严重下降。利用 2001ASIAEX 南中国海实验的水文数据, 数值仿真研究了 dnoidal 波参数(幅度、非线性系数、弥散系数和线性速度)对声场时间相关半径的影响, 研究结果表明: 声源频率越高, 声场受内波的影响越大, 声场时间相关半径与声源频率的-1.1 次方成正比; dnoidal 波初始幅度越大, 声场时间相关半径越小, 声场时间相关半径与 dnoidal 波初始幅度的-1.3 次方成正比; 随着 dnoidal 波非线性系数的增大, 弥散系数的减小以及线性速度的增大, 声场时间相关半径减小。

关键词 内波, 孤子内波, 时间相关半径

PACS: 43.30.Re, 43.60.Cg, 43.60.Gk

doi: 10.1360/132012-826

在南海北部海域, 内波是引起海洋声场起伏的主要原因^[1,2]。频繁的内波特别是孤子内波^[3]活动使得水声信道的时空稳定性变差, 形成具有时-空-频变特征的复杂水声快变信道。

海洋内波是活动于海洋内部的重力波, 它广泛出现在密度稳定层化了的世界各地海洋中。海洋内波活动导致海水声速分布随时间和空间变化, 从而引起在海洋中传播声信号的起伏, 包括声场幅度、本

征值、相位以及传播时间起伏等。海洋内波活动引起的动态声速场环境造成了声信号起伏^[4]、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关性能下降等。其中声场的时间相关特性由于其重要的应用价值已成为一个研究热点。

Duda 等人^[2]分析研究了 2001ASIAEX 南中国海实验的声场起伏特征。结果表明: 声场时间相关半径与内波特性密切相关, 非线性孤子内波使声场时间

引用格式: 吴立新, 任云, 牛海强, 等. 2001ASIAEX 南中国海实验声场的统计特征. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: s91-s98

Wu L X, Ren Y, Niu H Q, et al. Statistic characteristics of the sound fields in the 2001ASIAEX South China Sea experiment (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: s91-s98, doi: 10.1360/132012-826

相关半径严重下降. Mignerey 和 Ren 等人利用 2001ASIAEX 南中国海实验的水文和水声实验数据^[5], 分别研究了沿大陆架方向和跨大陆架方向上内波对声场时间相关的影响^[5,6]. 结果表明, 来自吕宋海峡或者本地产生的内潮汐和非线性内波扰动了声传播路径上的声速场并导致声场时间相关半径的变化. Yang 和 Ji 等人^[7-10]分别通过处理实验数据和数值仿真研究了内波对声场时间相关的影响, 同时得到了声场时间相关半径与声源频率、收发距离、声速标准差的关系. Spiesberger^[11]利用实验数据计算了太平洋上 250 Hz 声信号的时间和空间相关, 并分析了内波对声场时间和空间相关的影响.

内波分为两类: 一类是假定由很多不相关的源所引起的随机内波(线性内波), 另一类是在一些不规则海底地形附近, 出现垂直密度分层结构且存在强潮汐的情况下, 普遍存在具有高度非线性特征的特殊内波——孤子内波^[3]. 其中, 非线性内波在传播方向上的演变过程受 KDV 方程所控制, 包括由双曲正弦函数所描述的单个孤子内波, 以及由雅克比椭圆函数所描述的 dnoidal 波和 cnoidal 波等, 它们都会对声场时空相关等统计特征产生严重影响. 本文对 2001ASIAEX 南中国海实验中物理海洋环境数据和 400 Hz 声场数据统计特征进行了分析, 利用 2001ASIAEX 南中国海实验的水文数据, 数值仿真研究了 dnoidal 波参数(幅度、非线性系数、弥散系数和线性速度)对声场时间相关半径的影响.

1 海洋孤子内波及海洋内波引起声传播起伏的基本理论

声速 $c(r, z, t)$ 可表示为与时间无关的确定性声速 $\bar{c}(r, z)$ 和随时空变化的随机性声速 $\delta c(r, z, t)$ 之和. 假定水体的随机起伏主要由内波引起, $\eta(r, z, t)$ 为内波引起的质点位移, 则^[12,13]

$$\begin{aligned} \delta c(r, z, t) &= \int_z^{z+\eta(r, z, t)} \frac{\partial c_p(r, z')}{\partial z'} dz' \\ &= \int_z^{z+\eta(r, z, t)} \bar{c}(r, z') G(r, z') N^2(r, z') dz', \quad (1) \end{aligned}$$

其中 $c_p(r, z)$ 为势声速,

$$N^2(r, z) = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \rho_p(r, z)$$

为浮力频率, $G(r, z)$ 是温度膨胀系数和盐度浓缩系数以及温度和盐度在深度方向微分的函数. $\eta(r, z, t)$ 可由线性内波和孤子内波引起. 即 $\eta(r, z, t) = \eta_D(r, z, t) + \eta_S(r, z, t)$, 其中 $\eta_D(r, z, t)$ 表示线性内波的贡献, $\eta_S(r, z, t)$ 表示孤子内波的贡献.

非线性内波活动引起质点垂直位移的完全解 $\eta(r, z, t)$ 可由分离变量法得到^[14]:

$$\eta(x, z, t) = \sum_n \eta_{0n} \varphi_n(z) A_n(x, t), \quad (2)$$

其中 $\varphi_n(z)$ 为第 n 阶内波模态, 即等密度面位移幅度在深度方向上的分布函数; η_{0n} 给出了第 n 阶内波模态的幅度; $A_n(x, t)$ 是第 n 阶内波模态对应的孤子波包的归一化的波动幅度, 它表示等密度面在孤子波包范围内不同距离处离开平衡位置的垂直位移, 满足 KDV 方程:

$$A_t + C_0(A_x + \alpha A A_x) + C_0 \gamma A_{xxx} = 0, \quad (3)$$

其中, $\alpha(\text{m}^{-1})$ 是非线性系数, $\gamma(\text{m}^2)$ 弥散系数, $C_0(\text{m/s})$ 线性速度. 一般来说, 浅海中的孤子内波 1 阶模态占主导地位, 因此我们只需要处理第 1 阶模态, (2)式改写为

$$\eta(x, z, t) = \eta_0 \cdot \varphi(z) \cdot A(x, t). \quad (4)$$

当考虑存在的平均背景剪切流时内波模态函数 $\varphi(z)$ 满足 Taylor-Goldstein 方程^[15]:

$$\left[\frac{d^2}{dz^2} - \frac{U_{zz}(z)}{U(z) - C_0} + \frac{N^2(z)}{(U(z) - C_0)^2} \right] \varphi(z) = 0, \quad (5)$$

并满足海面 and 海底处的边界条件 $\varphi(0) = \varphi(-H) = 0$. 其中 $U(z)$ 为平均背景剪切流, 下标“zz”表示在深度方向上的二次导数.

王少强^[16]从(3)式出发并利用几个正反变换得到了以下孤子波包解.

在海洋中常见的孤子波包的缓变参量解, 其解形式如下:

$$\begin{aligned} A(x, t) &= A_0 dn^2 \left\{ \left(\frac{\alpha A_0}{12\gamma} \right)^{1/2} \left[x - \left(1 + \frac{2-s^2}{3} \alpha A_0 \right) C_0 t \right], s^2 \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\frac{x - C_0 t}{\alpha A_0 C_0 t} = \frac{2-s^2}{3} - \frac{1}{3} \frac{s^2(1-s^2)K(s^2)}{E(s^2) - (1-s^2)K(s^2)}. \quad (7)$$

将(6)式代入(4)式, 完整的 dnoidal 波模型可以写为下式:

$$\eta(x, z, t) = \left(\eta_0 \varphi(z) d n^2 \right)^{1/2} \left\{ \left(\frac{\alpha \eta_0}{12 \gamma} \right) \left[x - \left(1 + \frac{2-s^2}{3} \alpha \eta_0 \right) C_0 t \right], s^2 \right\} I(x, t), \quad (8)$$

其中, $I(x, t)$ 是 Apel 等人^[17]用来模拟海洋中孤子波包尾迹以及传播过程中幅度衰减的函数.

2 实验简介

图 1 显示了 ASIAEX 2001 实验区域平面图, 及主要实验设备布放情况.

2001ASIAEX 声学实验部分, 在实验海域的中心位置处布放一条垂直线性接收阵(VLA), 其 16 个水听器覆盖了大部分的海水垂直跨度, 接近海面的前 10 个水听器间隔 3.75 m, 底下 6 个则间隔 7.5 m. 在接收阵以南约 31.3 km 深水处布放两个低频声源 s400 和 s224, 中心频率分别为 400 和 224 Hz, 带宽分别为 100 和 16 Hz.

垂直于大陆架方向由浅水到深水依次布放 3 个环境锚系系统 env120, env200, env350, 其上分别附带一条温度链.

图 2 为声传播路径上的 3 条温度链所测的温度数据, 由图可见该海区有丰富的孤子内波活动, 5 月 2 日-5 月 5 日非线性孤子内波活动相对较弱, 而 5 月 6 日-5 月 12 日为非线性孤子内波活动强盛期, 其中最强烈的孤子内波幅度超过 140 m. 图 2 的温度链数据明

图 1 ASIAEX 2001 实验区域平面及主要实验设备图
Figure 1 Configuration of the ASIAEX2001 experiment.

显可见 M_2 内潮汐(潮周期为 12.43 h), 其上迭加有许多孤子内波(图 3), 幅度最大的孤子波包产生于 M_2 内潮汐的开始部分.

3 内波对声场时间相关的影响

内波特别是非线性孤立子内波对声场的时间相关特征有显著影响. 声场时间相关下降到 0.707 时的延迟时间定义为声场时间相关半径. 图 4 给出了 5 月 3 日-5 月 12 日 10 天时间内声场的时间相关半径, 其中, 图(a)是由 16 元垂直阵测量数据得到的时间相关处理结果, 图(b)和(c)分别是以 env350 和 env200 温度链测量数据为平流模型^[5]环境数据, 用 PE 声场模型仿真计算得到的时间相关半径结果. 由图可见, 非线性孤子内波活动使声场时间相关半径产生明显的起伏变化. 5 月 3 日-5 月 6 日非线性孤子内波活动相对

图 2 声传播路径上的环境锚系系统和温度链所测温度数据
(a) env350 温度测量结果; (b) env200 温度测量结果; (c) env120 温度测量结果

Figure 2 Measured temperature along the sound propagation path by (a) env350, (b) env200, and (c) env120.

图 3 env350 温度链测量到的 dnoidal 孤立子内波
Figure 3 Dnoidal internal waves measured by env350.

图4 声场时间相关半径

(a) 为垂直阵数据得到的声场时间相关半径; (b) 为 env350 温度链数据为环境数据仿真处理的声场时间相关半径; (c) 为 env200 温度链数据为环境数据仿真处理的声场时间半径

Figure 4 Temporal correlation length of the acoustic field. (a) is the result of the VLA data, (b) and (c) are the simulated results with the temperature measured by the temperature line arrays env350 and env200, respectively.

较弱时, 声场时间相关半径接近 200 s, 5 月 7 日–5 月 12 日非线性孤子内波活动相对较强时, 声场时间相关半径下降到只有 50 s 左右, 特别是在 5 月 10 日非线性孤子内波最强时, 声场时间相关半径进一步下降到不足 20 s.

4 Dnoidal 波对声场时间相关半径的影响

第 3 节通过实验数据定性分析了内波特别是孤

立子内波对声场时间相关半径的影响, 本节将对 dnoidal 波参数对声场时间相关半径的影响进行分析研究. 具体思路是: 首先, 利用 2001ASIAEX 南海实验的水文数据, 通过(7)和(8)式 dnoidal 波模型重构存在 dnoidal 波时的声速场; 然后, 把声速场带入声场计算模型(RAM-PE)计算存在 dnoidal 波时不同时刻的声场; 最后, 根据声场时间相关半径的定义, 分析 dnoidal 波参数对声场时间相关半径的影响.

由 ASIAEX2001 南海实验的水文数据, 通过(7)和(8)式 dnoidal 波模型可重构存在 dnoidal 波时的声速场. 图 5(a)和(b)分别是 CTD 测量的盐度和温度数据, (c)是由温度和盐度计算得到的浮力频率, (d)是 ADCP 测得的背景剪切流. 图 6 是根据图 5 中 CTD 测量数据(a)和(b)计算得到的数值仿真所用的确定性声速. 根据以上海洋环境参数可重构存在 dnoidal 波时的声速场, 如图 7 所示. 其中幅度 η_0 、非线性系数 α 、弥散系数 γ 和线性速度 C_0 的值分别是 60 m, 0.008 m^{-1} , 4134 m^2 和 1.16 m/s.

为了去除海深变化的影响, 数值仿真时海深选取固定值 300 m. 用 RAM-PE 计算声场时, 声源的深度是 290 m, 接收深度是从海面下 1–200 m、间隔 1 m. 所用的仿真环境如图 8 所示.

假设声场时间相关半径 $\tau_{0.707}$ 与声源频率 f 的关系满足(9)式:

$$\tau_{0.707} = a \cdot f^b. \quad (9)$$

图5 CTD 测量数据和 ADCP 测量数据

(a) 盐度剖面; (b) 温度剖面; (c) 浮力频率剖面; (d)平均背景剪切流剖面

Figure 5 Measured data by CTD and ADCP. (a) Salinity profile; (b) temperature profile; (c) buoyancy frequency profile; (d) shear-flow profile.

图 6 数值仿真所用的确定性声速剖面

Figure 6 Sound velocity profile use of the simulation.

图 7 存在 dnoidal 波时声速剖面的空间分布

Figure 7 Sound velocity section when dnoidal internal waves exist.

图 8 数值仿真环境示意图

Figure 8 Geometry of the simulation.

在不同 dnoidal 波幅度的情况下, 数值仿真声场时间相关半径与声源频率的关系, 拟合数值仿真结果得到(9)式中指数项 b 的值. 频率的取值范围是 300–

1200 Hz, 间隔为 100 Hz. 图 9(a)是距离 31 km 处, dnoidal 波幅度 η_0 分别为 40 m 和 70 m 时声场时间相关半径和声源频率关系的拟合结果. 由图可见, 不同参数只是影响了(9)式中的 a 值, 而得到的 b 值都是 -1.1 . 所以声场时间相关半径和声源频率的 -1.1 次方成正比.

同理, 假设声场时间相关半径 $\tau_{0.707}$ 与幅度 η_0 的关系满足(10)式:

$$\tau_{0.707} = a \cdot \eta_0^b. \quad (10)$$

在不同声源频率的情况下, 数值仿真声场时间相关半径与幅度 η_0 的关系, 图 9(b)是距离 31 km 处, 声源频率 f 分别为 500 Hz 和 1000 Hz 时声场时间相关半径和 dnoidal 波幅度关系的拟合结果. 由图可见, 不同参数只是影响了(10)式中的 a 值, 而得到的 b 值都是 -1.3 . 所以声场时间相关半径和 dnoidal 波幅度的 -1.3 次方成正比.

同时, 在其他参数不变的情况下, 数值仿真了 dnoidal 波非线性系数、弥散系数和线性速度对声场时间按相关半径的影响, 如图 9(c)–(e)所示. 结果显示, 声场时间相关半径随非线性系数和线性速度的增大而减小, 随弥散系数的增大而增大.

5 结论

本文对 2001ASIAEX 南中国海实验中 400 Hz 声场数据的统计特征进行了分析, 利用 2001ASIAEX 南中国海实验的水文数据, 数值仿真研究了 dnoidal 波参数(幅度、非线性系数、弥散系数和线性速度)对声场时间相关半径的影响. 得到的结果如下.

声场时间相关特性与海洋内波特性密切相关, 海洋内波特别是非线性孤子内波使声场产生强烈的时间去相关效应, 时间相关尺度最小出现在强非线性孤子内波活动最活跃期.

存在 dnoidal 波时, 声源频率越高, 声场受内波影响越大, 声场时间相关下降越快, 声场的时间相关半径越小, 声场时间相关半径与 $f^{-1.1}$ 成正比; dnoidal 波初始幅度 η_0 越大, 声场时间相关下降越快, 声场的时间相关半径越小, 声场时间相关半径与 $\eta_0^{-1.3}$ 成正比; 声场时间相关半径随非线性系数和线性速度

图 9 声场时间相关半径与(a) 声源频率, (b) 幅度, (c) 非线性系数, (d) 弥散系数和(e) 线性速度关系的拟合结果

Figure 9 The simulated dependence of the temporal correlation length on (a) the source frequency, (b) the amplitude, (c) the nonlinear coefficient, (d) the dispersion coefficient, and (e) the linear speed of the dnoidal internal wave, respectively.

的增大而减小, 随弥散系数的增大而增大.

频繁的海洋内波特别是强非线性孤子内波活动

使得水声信道的时空稳定性严重下降, 形成具有时-空-频变特征的复杂水声快变信道.

致谢 特别感谢美国 WHOI 海洋研究所, 他们提供了本次 ASIAEX 2001 南中国实验的全部原始数据, 并开展了合作研究.

参考文献

- 1 Wang S Q, Wu L X, Wang H W, et al. Fluctuations of sound transmission and temperature field in South China Sea of ASIAEX 2001 experiment and inversion of the characterizations of internal tides (waves). Prog Natl Sci, 2004, 14(9): 793-799

- 2 Duda T F, Lynch J F, Newhall A E, et al. Fluctuation of 400-Hz sound intensity in the 2001 ASIAEX South China Sea experiment. *J Acoust Soc Am*, 2004, 29(4): 1264–1279
- 3 Farmer D, Armi L. The generation and trapping of internal solitary waves over topography. *Science*, 1999, 283: 188–190
- 4 Wang N, Zhang H Q, Wang H Z, et al. Fluctuation of acoustic modal amplitude and depth dependence due to internal waves and tide (in Chinese). *Acta Acust*, 2010, 35(1): 38–44 [王宁, 张海青, 王好忠, 等. 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]
- 5 Mignerey P C, Orr M H. Observations of matched-field autocorrelation time in the South China Sea. *IEEE J Ocean Eng*, 2004, 29(4): 1280–1291
- 6 Ren Y, Wu L X, Li Z L. The signal temporal correlation length with the existence of solitons in the South China Sea (in Chinese). *Acta Acust*, 2010, 35(5): 515–522 [任云, 吴立新, 李整林. 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(5): 515–522]
- 7 Yang T C. Measurement of temporal coherence of sound transmissions through shallow water. *J Acoust Soc Am*, 2006, 120(5): 2595–2614
- 8 Yang T C. Temporal coherence of sound transmissions in deep water revisited. *J Acoust Soc Am*, 2008, 124(1): 113–127
- 9 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(5): 419–424 [季桂花, 李整林, 戴琼兴. 浅海内波对匹配场时间相关的影响. *声学学报*, 2008, 33(5): 419–424]
- 10 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*, 2009, 26(9): 0943011–0943014
- 11 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
- 12 Flatte S M, 著, 高天赋, 译. 起伏海洋中的声传播. 北京: 海洋出版社, 1985
- 13 Dirk T. Acoustic propagation through a internal wave field in a shallow water waveguide. *J Acoust Soc Am*, 1997, 101(2): 789–808
- 14 Apel J R. *Oceanic Internal Waves and Solitons*. Maryland: Silver Spring, 2002
- 15 Liu A K. Analysis of nonlinear internal waves in the New York Bight. *J Geophys Res*, 1988, 93(C10): 12317–12329
- 16 王少强. 海洋孤子内波及其引起的声场起伏规律——理论模型与数值模拟研究. 博士学位论文. 北京: 中科院研究生院, 2006
- 17 Apel J R, Badiey M, Ching-Sang C, et al. An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment. *IEEE J Ocean Eng*, 1997, 22(3): 465–500

Statistic characteristics of the sound fields in the 2001ASIAEX South China Sea experiment

WU LiXin^{1*}, REN Yun¹, NIU HaiQiang^{1,2}, WANG Jun¹, LYNCH James F.³
& DUDA Timothy F.³

¹ State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³ Woods Hole Oceanographic Institution, MA 02543-1053, USA

Internal waves are one of the primary sources of ocean variations in shallow water. The temporal-spatial stability of the sound channel may degrade at the presence of internal waves. The statistical characteristics of acoustic signals transmitted by 400-Hz sources moored in the ASIAEX 2001 South China Sea (SCS) experiment are presented. The source was 31.3 km offshore from the receiving array. Time series data of signal intensity were obtained at individual phones of an 16-element vertical line array, and temporal correlations were observed from May 2 to May 17. The temporal correlation scales are closely related to internal wave properties. The largest internal waves, especially solitary wave packets (dnoidal internal waves), are the principal contributors to the reduction of the temporal correlation scales. The signal temporal correlation length is simulated at different frequencies by using the oceanic data of ASIAEX2001, as are the amplitudes, nonlinear coefficients, dispersion coefficients, and linear speeds of the soliton. It is found that the temporal correlation length is -1.1 power dependent on the signal frequency and -1.3 power dependent on the amplitude. It is also found that the temporal correlation length decreases when the nonlinear coefficient α and the linear speed C_0 increase, and it decreases when the dispersion coefficient γ decreases.

internal wave, solitary internal wave, temporal correlation length

PACS: 43.30.Re, 43.60.Cg, 43.60.Gk

doi: 10.1360/132012-826